

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Rempah-rempah dan tanaman herbal, seperti jahe, merupakan komoditas pertanian yang memiliki nilai ekonomis tinggi dan pemanfaatan yang luas dalam industri makanan maupun farmasi. Pada proses pascapanen, pengeringan menjadi tahapan yang sangat krusial untuk menurunkan kadar air bahan guna menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan memperpanjang umur simpan. Namun, komoditas rempah memiliki karakteristik termal yang sensitif karena mengandung senyawa volatil dan minyak atsiri. Proses pengeringan rempah membutuhkan temperatur yang relatif rendah dan stabil, yakni pada kisaran 40°C hingga 50°C. Paparan suhu pemanasan yang terlalu tinggi atau tidak stabil dapat menyebabkan degradasi warna, hilangnya aroma, serta rusaknya zat aktif pada bahan.

Selama ini, metode pengeringan konvensional yang mengandalkan penjemuran langsung di bawah sinar matahari sangat bergantung pada kondisi cuaca dan fluktuasi iradiasi surya. Untuk mengatasi keterbatasan cuaca, penggunaan alat pengering berbasis energi surya (*solar dryer*) berpanel surya dipandang sebagai solusi yang lebih modern. Sayangnya, pemanfaatan panel surya secara langsung untuk menyuplai elemen pemanas (*heater*) memunculkan masalah baru: fluktuasi intensitas cahaya matahari menyebabkan suhu di dalam ruang pengering menjadi sangat tidak stabil. Selain itu, proses pengeringan tidak dapat berlanjut pada malam hari atau saat cuaca mendung karena hilangnya suplai daya listrik.

Untuk mengatasi ketidakstabilan pasokan energi tersebut, teknologi *Thermal Energy Storage* (TES) atau penyimpanan energi termal menjadi solusi inovatif yang menjanjikan. Sistem ini memanfaatkan media pasir silika sebagai baterai pasir (*sand battery*) untuk menyimpan energi panas laten (sensibel) yang dihasilkan oleh pemanas berdaya surya pada siang hari. Panas yang terperangkap di dalam media pasir kemudian dapat diekstraksi dan didistribusikan secara perlahan ke dalam ruang pengering (*oven*). Penggunaan *Thermal Energy Storage* memungkinkan

ruang pengering tetap mendapatkan suplai panas secara konstan meskipun intensitas matahari menurun atau pada saat malam hari (*discharging*), sehingga kontinuitas proses pengeringan tetap terjaga.

Meskipun konsep *sand battery* mampu menyimpan panas, tantangan selanjutnya adalah bagaimana mengatur laju ekstraksi panas dari tumpukan pasir bersuhu sangat tinggi (dapat mencapai di atas 100°C) agar suhu di dalam ruang pengering tidak *overheat* dan tetap stabil pada *setpoint* yang aman bagi rempah, yakni 45°C. Untuk mencapai tingkat presisi tersebut, diperlukan sebuah sistem kontrol kendali cerdas dan sirkulasi aliran udara yang responsif. Metode distribusi panas konveksi paksa melalui perpipaian tembaga dengan aktuator *blower* harus dikendalikan secara otomatis berdasarkan pembacaan suhu *real-time*.

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem kendali suhu yang andal pada alat pengering berbasis TES. Sistem kontrol ini mengadopsi algoritma ON/OFF dengan histeresis untuk meminimalisasi osilasi suhu, serta menggunakan arsitektur mikrokontroler ganda (*Master-Slave*) yang mengintegrasikan Arduino Nano sebagai eksekutor aktuator dan ESP32 sebagai pusat pemantauan kelistrikan, antarmuka pengguna, serta *datalogging* jarak jauh berbasis *Internet of Things* (IoT). Dengan adanya integrasi perangkat keras dan algoritma kontrol ini, diharapkan alat pengering mampu meredam fluktuasi energi surya, mendistribusikan panas secara merata, serta menjaga stabilitas mutu komoditas yang dikeringkan.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penulis mengambil judul penelitian: **"Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu Pada Alat Pengering Rempah Berbasis Thermal Energy Storage"**

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang alat pengering yang mampu mempertahankan suhu sesuai dengan nilai yang telah diatur?
2. Bagaimana merancang mekanisme perpindahan panas dari baterai pasir menuju ruang pengering dengan rugi-rugi panas yang seminimal mungkin?

3. Bagaimana sistem pengaturan distribusi termal dari baterai pasir ke ruang tertutup (*enclosure*) pengering?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Dari rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem pengering yang mampu mempertahankan suhu sesuai dengan nilai yang diatur
2. Merancang dan membangun mekanisme penyerapan panas pada baterai pasir dan pelepasan panas pada pengering dengan rugi-rugi panas seminimal mungkin
3. Mengimplementasikan pengaturan distribusi panas dari baterai pasir ke pengering

1.4 Manfaat Tugas Akhir

1.4.1 Manfaat Teoritis

Secara teoretis, penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Menambah referensi ilmiah mengenai penerapan *Thermal Energy Storage* berbasis panas sensibel dengan pasir silika sebagai media penyimpanan energi termal.
2. Memberikan pemahaman mengenai hubungan antara massa pasir silika, kapasitas panas spesifik, perubahan temperatur, dan jumlah energi termal yang tersimpan.
3. Memperkuat kajian mengenai integrasi panel surya, elemen pemanas, media penyimpan panas, dan sistem pengering rempah-rempah.
4. Menjelaskan karakteristik temperatur pasir silika selama proses pengisian dan pelepasan energi termal.
5. Memberikan dasar teoretis untuk menganalisis kapasitas penyimpanan energi, laju kehilangan panas, efisiensi termal, dan durasi pelepasan panas pada sistem TES.
6. Menambah kajian mengenai penerapan sistem kendali temperatur berbasis mikrokontroler pada teknologi penyimpanan energi termal.

7. Menjadi sumber rujukan bagi penelitian selanjutnya yang membahas pengembangan media penyimpan panas, sistem pengering bertenaga surya, dan strategi pengendalian temperatur.

1.4.2 Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Menghasilkan prototipe TES berbasis pasir silika yang terintegrasi dengan panel surya untuk mendukung proses pengeringan rempah-rempah.
2. Memberikan rancangan sistem penyimpanan panas yang memanfaatkan pasir silika sebagai material yang mudah diperoleh, relatif murah, dan tahan terhadap temperatur tinggi.
3. Membantu mempertahankan suplai panas ketika intensitas radiasi matahari menurun atau daya keluaran panel surya mengalami fluktuasi.
4. Memperpanjang waktu operasi sistem pengering melalui pemanfaatan energi termal yang tersimpan di dalam pasir silika.
5. Membantu pengguna memantau dan mengatur temperatur sistem melalui sensor, mikrokontroler, LCD, dan *keypad*.
6. Mengurangi ketergantungan proses pengeringan terhadap bahan bakar fosil, jaringan listrik, dan baterai elektrokimia.
7. Memberikan acuan teknis dalam menentukan massa pasir silika, kapasitas elemen pemanas, dimensi tangki, jenis isolasi, posisi sensor, dan rentang temperatur operasi.
8. Mendukung petani dan pelaku usaha kecil dalam mengembangkan teknologi pengering rempah yang lebih terkontrol, ekonomis, dan ramah lingkungan.
9. Menjadi dasar untuk mengembangkan sistem TES dengan kapasitas yang lebih besar dan menyesuaikannya dengan kebutuhan industri pengolahan hasil pertanian.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan lebih terarah dan tidak melebar dari tujuan yang telah ditetapkan, maka penelitian ini dibatasi oleh beberapa ruang lingkup sebagai berikut:

1. Penelitian berfokus pada prototipe TES skala laboratorium.

2. Sistem memakai pasir silika sebagai media penyimpanan panas sensibel.
3. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama sistem.
4. Elemen pemanas mengubah energi listrik dari sistem panel surya menjadi energi termal.
5. Penelitian membahas proses pengisian dan pelepasan energi termal pada media pasir silika.
6. Sistem memakai thermocouple tipe K dan MAX6675 untuk mengukur temperatur.
7. ESP32 menjalankan fungsi pembacaan sensor, pengolahan data, algoritma kendali, dan pengaturan SSR.
8. Arduino Nano menangani keypad dan LCD sebagai antarmuka pengguna.
9. Sistem menerapkan metode kendali *ON/OFF* dengan histeresis berdasarkan batas temperatur minimum dan maksimum.
10. Pengujian meliputi waktu pemanasan, distribusi temperatur, laju penurunan temperatur, kapasitas energi termal, kehilangan panas, efisiensi termal, dan durasi pelepasan panas.
11. Penelitian menggunakan rentang temperatur yang sesuai untuk pengeringan rempah, yaitu sekitar 50 sampai 70°C.
12. Penelitian tidak membahas perancangan dan pembuatan sel fotovoltaik.
13. Penelitian tidak membahas sistem pelacak titik daya maksimum secara mendalam apabila prototipe memakai pengendali komersial.
14. Penelitian tidak menjalankan analisis siklus hidup material secara menyeluruh.
15. Penelitian tidak menjalankan analisis ekonomi skala industri secara terperinci.
16. Penelitian tidak membahas penyimpanan energi menggunakan baterai elektrokimia sebagai objek utama.
17. Penelitian menyesuaikan jenis dan jumlah rempah dengan kapasitas ruang pengering serta ketersediaan bahan selama pengujian.
18. Rempah yang digunakan untuk pengeringan adalah 300gram jahe dengan 100g jahe pada masing-masing tray

1.6 Sistematika Tugas Akhir

Penyusunan penulisan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi beberapa bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN menguraikan latar belakang, identifikasi masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI membahas penelitian terdahulu, kesenjangan penelitian, prinsip pengeringan rempah, energi surya fotovoltaik, konsep TES, penyimpanan panas sensibel, karakteristik pasir silika, mekanisme perpindahan panas, elemen pemanas, sensor temperatur, mikrokontroler, SSR, LCD, keypad, dan metode kendali temperatur.

BAB III METODOLOGI DAN PERANCANGAN SISTEM menjelaskan metode penelitian, tahapan pelaksanaan, kriteria perancangan, diagram blok, prinsip kerja, perancangan mekanik, perancangan tangki TES, perancangan sistem elektrik, pemilihan komponen, pengembangan perangkat lunak, serta metode pengujian dan analisis data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN memaparkan hasil realisasi prototipe, pengujian sensor, pengujian sistem kendali, pengujian pengisian energi termal, pengujian pelepasan energi termal, distribusi temperatur, kapasitas energi tersimpan, kehilangan panas, efisiensi termal, dan kemampuan sistem dalam mendukung proses pengeringan rempah.

BAB V PENUTUP memuat kesimpulan berdasarkan hasil penelitian dan saran untuk pengembangan sistem pada penelitian berikutnya.