

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Kayu Sengon

Kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*) memiliki karakteristik fisik dan anatomi yang berpengaruh signifikan terhadap proses pengeringan. Dengan massa jenis 0,26–0,43 g/cm³, kayu ini tergolong ringan dan memiliki struktur pori besar yang terdistribusi merata, sehingga memfasilitasi penetrasi udara panas dan mempercepat evaporasi air bebas hingga mencapai titik jenuh serat ($\pm 30\%$). Namun, tekstur halus dan serat lurus menyebabkan kerentanan terhadap retak permukaan dan deformasi jika pengeringan dilakukan terlalu cepat atau pada temperatur tinggi [13].

Pengeringan kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*) dengan pendekatan kombinasi pemanas inframerah dan udara panas—pada suhu lebih tinggi serta kecepatan aliran udara yang ditingkatkan—mampu mempercepat reduksi kadar air hingga di bawah 20%, sesuai ketentuan standar ISPM-15. Model Page terbukti sebagai model optimal untuk memprediksi kinetika proses pengeringan tersebut [14]. Konduktivitas termal yang relatif rendah memungkinkan penggunaan sistem pengering hibrida atau berbasis IoT dengan pemantauan kadar air secara real-time, sehingga proses pengeringan dapat dioptimalkan tanpa merusak struktur seluler kayu [13].

2.2 Pengeringan Kayu

2.2.1 Pengertian Pengeringan Kayu

Pengeringan kayu adalah suatu metode untuk menghilangkan kelembapan dari dalam kayu sampai mencapai level kelembapan tertentu yang diperlukan untuk penggunaannya. Kelembapan dalam kayu dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu air bebas yang tersimpan di ruang sel dan air terikat yang berada di dinding sel kayu. Tujuan dari proses pengeringan adalah untuk menurunkan tingkat kelembapan tersebut hingga mencapai kelembapan kesetimbangan, yaitu titik di mana kayu tidak lagi mengambil atau melepaskan air dari sekitarnya [10].



Gambar 2.1 Proses Pengering Kayu

Berdasarkan Basri, Yuniarti, K., Wahyudi, I., & Pari, R. Dalam buku yang berjudul Teknologi Pengeringan Kayu yang diterbitkan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional, proses pengeringan kayu yang optimal perlu memperhatikan keseragaman dalam distribusi suhu, arah aliran udara, serta durasi pengeringan untuk mencegah terjadinya kerusakan seperti retak, melengkung, atau pecah pada serat kayu. Pengeringan yang tidak teratur bisa merusak kualitas kayu dan mengurangi kekuatan mekaniknya [10].

Di samping itu, proses pengeringan akan meningkatkan kestabilan ukuran kayu, meningkatkan kemampuan kayu untuk pemrosesan lebih lanjut seperti

perekat atau cat, serta memperpanjang masa pakai kayu dari serangan jamur dan hama. Jadi, pengeringan adalah langkah yang sangat krusial dalam industri pengolahan kayu sebelum kayu digunakan sebagai bahan bangunan, perabot, atau produk olahan lainnya.

2.2.2 Mekanisme Perpindahan Panas dan Massa

Proses pengeringan kayu adalah interaksi serentak antara perpindahan panas dan perpindahan massa:

- a. Perpindahan panas: energi panas ditransfer dari sumber (radiatif/konvektif) ke permukaan kayu lalu meresap ke dalam melalui konduksi.
- b. Perpindahan massa: air menguap dari permukaan (*fase constant rate*) lalu *diffusion-driven* transport dari interior menuju permukaan (*fase falling rate*).

Model matematis umumnya mengintegrasikan persamaan energi dengan persamaan difusi *Fick* untuk mensimulasikan laju pengurangan kadar air serta distribusi suhu internal. Parameter operasional yang esensial mencakup suhu udara, kelembapan relatif (RH), laju aliran udara, konfigurasi penumpukan kayu, serta karakteristik material seperti porositas dan koefisien difusi air. Pengaturan gradual, meliputi peningkatan suhu bertahap dan pengelolaan kelembapan relatif, diperlukan untuk mencegah tegangan internal yang dapat mengakibatkan kerusakan.

2.2.3 Cacat pada Proses Pengeringan Kayu

Apabila proses pengeringan dilakukan secara tidak terkendali, maka dapat menimbulkan cacat-cacat seperti:

- a. Retak (*checking*) akibat perbedaan kecepatan penyusutan antara permukaan dan bagian dalam kayu.
- b. Melengkung (*warping*) karena distribusi panas yang tidak merata.
- c. Pecah serat (*splitting*) akibat tegangan internal yang terlalu besar.
- d. *Discoloration* atau perubahan warna akibat suhu terlalu tinggi.

Oleh karena itu, sistem pengering kayu modern umumnya dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembapan untuk menjaga kestabilan kondisi pengeringan.

2.2.4 Standar Ketentuan ISPM No. 15 Terkait Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

- a) Suhu Inti Kayu 56 °C

Standar ISPM No. 15 mensyaratkan perlakuan panas (*Heat Treatment/HT*) pada material kemasan kayu, di mana suhu inti kayu (*core temperature*) harus mencapai minimal 56 °C dan dipertahankan selama sekurang-kurangnya 30 menit.

Ketentuan ini bertujuan untuk membunuh organisme pengganggu tumbuhan, seperti serangga, larva, telur, dan patogen yang berada di dalam struktur kayu.

- b) Penurunan Berat Kayu $\pm 20\%$ (Implikasi Tidak Langsung)

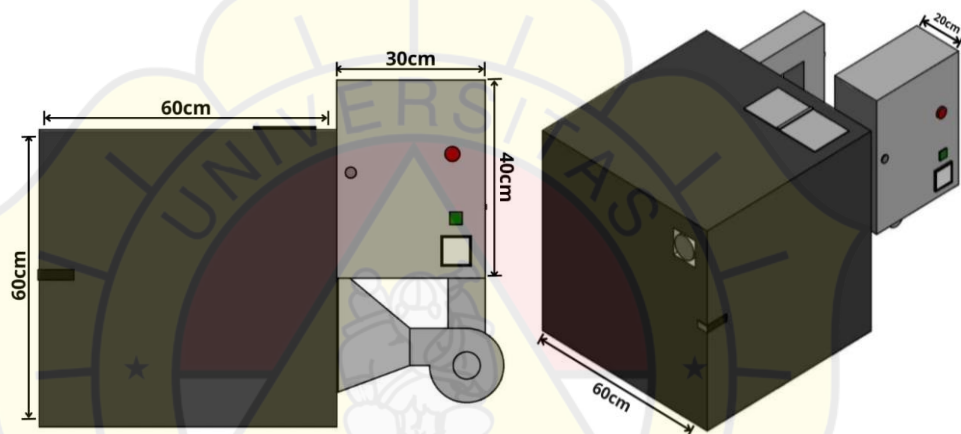
ISPM No. 15 tidak secara eksplisit menyebutkan angka “penurunan berat kayu 20%”, namun dalam praktiknya, perlakuan panas hingga suhu inti 56 °C menyebabkan penguapan air bebas dan sebagian air terikat dalam kayu. Proses ini secara teknis mengakibatkan penurunan kadar air yang signifikan, yang pada banyak penelitian dan penerapan industri berkorelasi dengan

penurunan berat kayu sekitar 15–25%, tergantung jenis kayu, dimensi, dan kadar air awal.

2.3 Mesin Pengering Hybrid

2.3.1 Desain Mesin Pengering Hybrid

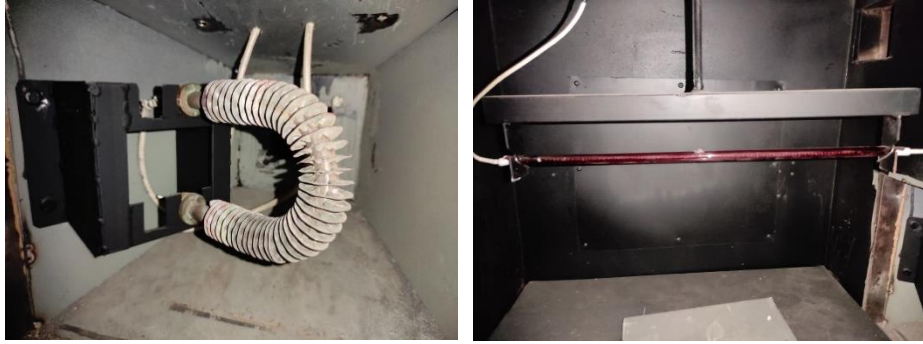
Mesin pengering hybrid ini didesain untuk pengujian pengeringan kayu dengan suhu maksimal 85°C,



Gambar 2.2 Desain Mesin Pengering Hybrid

2.3.2 Konsep Mesin Pengering Hybrid

Mesin pengering hybrid adalah sistem pengeringan yang menggunakan lebih dari satu sistem pemanas, yaitu *heatear* dan *infrared*. Sehingga proses pengeringan dapat berlangsung secara maksimal dan efisien.



Gambar 2.3 *Finned Heater & Infrared*

Menurut Mamengko, A., Pangkey, F., Khosuma, T., Sinurat, R., & Pangaila, B. Dalam *Jurnal AbdiTechno* Universitas Hasanuddin, sistem pengering hybrid memiliki kemampuan untuk mempertahankan suhu pengeringan pada rentang yang diinginkan secara stabil, meskipun terjadi perubahan kondisi lingkungan seperti cuaca mendung atau malam hari. Hal ini membuat sistem hybrid jauh lebih efisien dibandingkan sistem konvensional yang hanya mengandalkan satu sumber energi [11].

2.3.3 Komponen Utama Mesin Pengering Hybrid

- a. Ruang pengering (*drying chamber*) tempat proses pengeringan kayu.
- b. Sistem Pemanas (*heating unit*) berupa *finned heater* dan *infrared*.
- c. *Blower dan fan* untuk mengatur sirkulasi udara panas dan kelembapan di dalam ruangan pengering.
- d. *Tubular induktif proximity sensor* untuk mendeteksi apabila pintu mesin pengering belum tertutup dengan rapat.
- e. *Adjustable Infrared Proximity Switch* untuk mendeteksi posisi kayu sejajar dengan *infrared* dan *finned heater*.
- f. Sensor suhu (*Thermocouple Type K*) untuk mengetahui suhu di dalam kayu.

- g. Sensor kelembapan yang berfungsi untuk menjaga kondisi ideal selama pengeringan berlangsung.

Dalam penelitian Basri, Yuniarti, K., Wahyudi, I., & Pari, R. Disebutkan bahwa penggunaan sistem hybrid dapat menurunkan waktu pengeringan hingga 30–40% dibandingkan pengeringan alami, serta menghasilkan kadar air akhir yang lebih seragam [10].

2.4 *Internet of Things (IoT)* pada Sistem Pengeringan

2.4.1 Konsep Dasar IoT

Internet of Things (IoT) merujuk pada konsep yang mengintegrasikan perangkat fisik dengan jaringan internet, memungkinkan perangkat tersebut untuk saling bertukar data dan dikontrol dari jarak jauh. Dalam konteks sistem pengeringan kayu, teknologi IoT diterapkan untuk memantau serta mengatur parameter penting seperti suhu udara, kelembapan relatif, kadar air dalam kayu, dan durasi proses pengeringan secara langsung.

Sebagaimana dikemukakan oleh Sudiarsa, I. W., Sugiartawan, P., & Maharianingsih, N. M. Dalam *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems (IJEIS)* yang diterbitkan oleh Universitas Gadjah Mada, implementasi IoT pada sistem pengeringan kayu dapat meningkatkan efisiensi dan ketepatan proses. Hal ini karena pengguna dapat mengawasi kondisi ruang pengering melalui aplikasi atau antarmuka web tanpa perlu berada di lokasi secara fisik [12].

2.4.2 Komponen Sistem IoT pada Pengeringan

- a. Sensor suhu (ds18b20): berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur perubahan suhu (panas atau dingin) di dalam kayu, kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca oleh sistem pengendali seperti mikrokontroler, PLC, atau sistem IoT.
- b. Sensor suhu dan kelembapan (sht31): berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur kadar air (kelembapan) yang ada di dalam ruang mesin pengering, kemudian mengubah hasil pengukuran tersebut menjadi sinyal listrik yang bisa dibaca oleh sistem mikrikontroler atau sistem IoT
- c. Sensor *Tubular Inductive Proximity*: berfungsi untuk mendeteksi apabila pintu mesin pengering belum tertutup dengan rapat.
- d. *Adjustable Infrared IR Sensor Proximity Switch*: berfungsi untuk mendeteksi kayu apabila kayu sudah sejajar dengan *infrared* dan *finned heater*.
- e. ESP32: berfungsi untuk mengintergrasikan kemampuan Wi-Fi dan Bluetooth dalam satu chip, dan sebagai “otak” untuk sistem IoT.
- f. *Bread Board*: berfungsi untuk memudahkan perakitan, pengujian, dan modifikasi sirkuit elektronik.
- g. Kabel Jumper: digunakan untuk menghubungkan perangkat jaringan.

2.4.3 Keuntungan Penerapan IoT pada Pengeringan Kayu Dengan penerapan IoT:

- a. Melakukan pemantauan *real-time* terhadap kondisi pengeringan dari jarak jauh.

- b. Menjalankan sistem kontrol otomatis, di mana *finned heater* dan kipas menyala atau mati secara otomatis mengikuti perubahan suhu dan kelembapan.
- c. Menyimpan data historis pengeringan, yang dapat digunakan untuk analisis efisiensi dan optimasi proses.
- d. Mengurangi risiko kesalahan manusia dalam pengaturan suhu dan waktu pengeringan. Teknologi dan Sistem Komputer menunjukkan bahwa penggunaan IoT mampu menurunkan fluktuasi suhu pengeringan hingga $\pm 2^{\circ}\text{C}$, sehingga pengeringan menjadi lebih stabil dan seragam.

2.4.4 Pengaruh *Infrared*

Penelitian mengenai pengaruh radiasi *infrared* pada proses pengeringan kayu mengindikasikan bahwa penerapan radiasi *infrared* mampu mempercepat pengeringan secara superfisial. Studi komparatif yang melibatkan berbagai pendekatan pengeringan kayu, seperti pengeringan oven konvensional, pengeringan berbasis gelombang mikro, serta kombinasi *infrared* dan gelombang mikro, menunjukkan bahwa radiasi *infrared* memanaskan permukaan kayu secara langsung melalui absorpsi panas oleh material, tanpa bergantung pada medium udara sebagai perantara. Pendekatan ini memberikan keunggulan dalam efisiensi energi dan waktu pengeringan ketika diintegrasikan dengan metode lain, seperti pengeringan *microwave* [15].

2.5 Prinsip Kerja Mesin Pengering Hybrid

Proses pengeringan kayu pada mesin pengering hybrid berbasis IoT bekerja berdasarkan prinsip perpindahan panas dan massa yang dikendalikan secara otomatis melalui sistem *Internet of Things* (IoT) untuk menjaga kestabilan suhu dan kelembapan sesuai kebutuhan pengeringan. Pada sistem ini, sumber energi panas berasal dari dua komponen utama, yaitu pemanas listrik (*finned heater*) dan pemanas inframerah (*infrared*). Kedua sumber panas tersebut berfungsi secara hybrid, artinya dapat bekerja secara bersamaan. Energi panas yang dihasilkan akan meningkatkan suhu udara di dalam ruang pengering sehingga mempercepat proses evaporasi air dari permukaan dan bagian dalam kayu.

Udara panas kemudian disirkulasikan secara merata menggunakan kipas sirkulasi, sehingga distribusi panas di seluruh bagian ruang pengering menjadi homogen. Proses pengeringan berlangsung secara konveksi, di mana udara panas menyerap uap air dari kayu dan membawa keluar melalui saluran buang atau ventilasi. Sistem IoT berperan penting dalam mengatur dan memantau kondisi pengeringan secara *real-time*. Sensor suhu, kelembapan udara, dan mendeteksi kayu, mengirimkan data ke mikrokontroler (misalnya NodeMCU atau ESP32) yang terhubung ke jaringan internet. Data tersebut kemudian ditampilkan melalui platform IoT seperti *ThingSpeak*, memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengontrol proses pengeringan dari jarak jauh.

Jika suhu ruang pengering menurun dari nilai yang ditentukan, sistem otomatis akan mengaktifkan kembali elemen pemanas. Sebaliknya, bila suhu atau kelembapan melebihi batas, sistem akan menghentikan pemanas atau mengaktifkan kipas buang untuk menjaga kondisi ideal pengeringan.

Dengan demikian, prinsip kerja mesin pengering hybrid berbasis IoT menggabungkan efisiensi energi dari sistem hybrid dan akurasi pengendalian dari sistem IoT, sehingga menghasilkan proses pengeringan kayu yang lebih cepat, stabil, dan efisien dibandingkan metode konvensional.

2.6 Dasar Perhitungan Pengeringan Kayu

2.6.1 Mencari Massa Air yang Harus Dibuang

$$m_{loss} = \text{Massa awal} \times 20\% \quad (2.1)$$

2.6.2 Laju Pengeringan (*Drying Rate*)

$$DR = \frac{mc_1 - mc_2}{t} \quad (2.2)$$

2.6.3 Rumus Kalor

a) Kalor Sensibel Air

$$Q_a = m_{air} c \Delta T \quad (2.3)$$

b) Kalor Sensibel Bahan

$$Q_b = m_2 \times Q_c \times \Delta T \quad (2.4)$$

c) Kalor Laten (Penguapan)

$$Q_L = m_{air} L \quad (2.5)$$

d) Kalor Total

$$Q_{total} = Q_a + Q_b + Q_L \quad (2.6)$$

2.6.4 Efisiensi Pengeringan Kayu

a) Massa air:

$$m_{air} = m_1 - m_2 \quad (2.7)$$

b) Energi listrik:

$$E_l = P_{total} \times t \times 3.600 \text{ second} \quad (2.8)$$

c) Efisiensi:

$$\eta = \frac{Q_{total}}{E_l} \times 100\% \quad (2.9)$$

2.6.5 Rumus Energi Listrik Terhadap Panas yang dihasilkan

$$P = \frac{Q_a}{t} \quad (2.10)$$

2.7 Hipotesis penelitian

Penggunaan mesin pengering hybrid yang menggabungkan sumber panas dari *finned heater* dan *infrared* berpengaruh signifikan terhadap peningkatan laju pengeringan, penurunan kadar air, dan efisiensi energi pada proses pengeringan kayu dibandingkan sistem pengering konvensional.

2.7.1 Hipotesis Umum

Terdapat pengaruh signifikan antara variasi suhu pengeringan dan penggunaan *infrared* terhadap kinerja proses pengeringan kayu pada mesin pengering hybrid, baik dari segi laju penurunan kadar air maupun efisiensi energi yang dihasilkan.

2.7.2 Hipotesis Khusus

Penggunaan *infrared* secara bersamaan dengan *finned heater* mempercepat laju penurunan kadar air dibandingkan penggunaan heater saja.

Peningkatan suhu pengeringan (dari 40°C ke 70°C) meningkatkan laju pengeringan kayu, namun dapat menurunkan efisiensi energi jika suhu terlalu tinggi.

Kombinasi suhu menengah (sekitar 55°C) dengan penggunaan *infrared* menghasilkan keseimbangan terbaik antara waktu pengeringan, kualitas kayu, dan efisiensi energi.

