



Rancang bangun solar dryer konveksi alamiah untuk biji kopi dengan sistem monitoring berbasis internet of things

***Nurdin¹, Irwin Syahri Cebro², Azhar³, Hendrawati⁴**

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe,

^{3,4} Jurusan Teknologi Informasi dan Komputer Politeknik Negeri Lhokseumawe
Lhokseumawe, 24301, Indonesia

*Email: nurdin@pnl.ac.id

Abstrak

Proses monitoring pengeringan biji kopi selama ini masih dilakukan secara tradisional sehingga efektivitas proses pengeringan masih rendah. Proses monitoring pengeringan berbasis IoT diharapkan mampu memberikan efektifitas dan efisiensi waktu yang lebih baik. Penelitian ini mendesain dan membuat pengering tenaga surya (*solar dryer*) dengan perpindahan panas konveksi secara alamiah untuk biji kopi yang dilengkapi dengan sistem monitor berbasis *Internet of Things*. Tujuan dari penelitian ini mengembangkan kinerja pengering tenaga surya dengan konveksi alamiah dengan penambahan unit monitoring berbasis IoT. Penelitian diawali dengan merencanakan secara teknik komponen utama dari alat pengering. Komponen yang telah direncanakan bentuk, dimensi dan materialnya akan dituangkan dalam bentuk gambar teknik detail. Gambar teknik detail akan menjadi panduan dalam proses manufaktur alat pengering. Komponen utama dari alat pengering yaitu kolektor surya, ruang pengering dan sistem monitoring berbasis IoT. Kolektor surya akan berfungsi untuk menangkap panas dari sinar matahari yang akan mengalir secara alamiah ke ruangan pengering. Sebuah sistem monitoring berbasis IoT akan menangkap besaran suhu dan kelembapan (sensor DFRobot DHT22) di dalam kolektor surya, ruangan pengeringan dan lingkungan dari alat pengering. Selain itu, sebuah sensor Bh1750 untuk menangkap intensitas matahari juga disematkan pada sistem monitoring ini. Sistem monitoring ini akan terhubung dengan jaringan internet yang mana data-data tersebut akan dikirimkan ke sebuah *cloud data server*. Data yang terekam selanjutnya dapat diunduh menggunakan perangkat mobile ataupun personal komputer yang terhubung dengan jaringan internet. Sistem monitoring berbasis IoT ini dipilih agar data performansi dari alat pengering dapat dipantau secara *real-time* dan online. Hasil dari penelitian ini sebuah prototipe alat pengering dengan kapasitas rumah tangga 9 Kg yang dilengkapi dengan sistem monitoring berbasis IoT telah dibangun dan dapat diimplementasikan dengan baik.

Kata Kunci: biji kopi, IoT, konveksi alamiah, *solar dryer*

Design of Natural Convection Solar Dryer for Coffee Beans with Monitoring System Based on Internet of Things

Abstract

The process of monitoring the drying of coffee beans so far is still done traditionally so that the effectiveness of the drying process is still low. The IoT-based drying monitoring process is expected to provide better effectiveness and time efficiency. This research designs and manufactures a solar dryer with natural convection heat transfer for coffee beans equipped with an Internet of Things-based monitoring system. The purpose of this study is to develop the performance of a solar dryer with natural convection with the addition of an IoT-based monitoring unit. The research begins with a technical plan for the main components of the dryer. Components whose shapes, dimensions, and materials have been planned will be outlined in the form of detailed technical drawings. Detailed technical drawings will be a guide in the dryer manufacturing process. The main components of the dryer are solar collectors, drying chambers, and an IoT-based monitoring system. The solar collector will function to capture heat from the sun which will flow naturally into the drying room. An IoT-based monitoring system will capture the temperature and humidity (DFRobot DHT22 sensor) in the solar collector, drying room, and the environment of the dryer. In addition, a Bh1750 sensor to capture the intensity of the sun is also embedded in this monitoring system. This monitoring system will be connected to the internet network where the data will be sent to a cloud data server. The recorded data can then be downloaded using a mobile device or personal computer connected to the internet network. This IoT-based monitoring system was chosen so that performance data from the dryer can be monitored in real-time and online. The results of this study are a prototype dryer with a household capacity of 9 Kg equipped with an IoT-based monitoring system has been built and can be implemented properly.

Keywords: *solar dryer, natural convection, coffee bean, IoT*

1. Pendahuluan

Kopi adalah salah satu komoditas perkebunan andalan Indonesia. Dari data statistik 2015 (angka estimasi), Indonesia memiliki luas areal perkebunan

kopi 1.254.382 Ha, dengan hasil produksi 739.005 ton, sedangkan untuk Aceh memiliki luas areal perkebunan 123.764 Ha, dengan hasil produksi 48.282 ton. Untuk wilayah Aceh hasil produksi kopi

yang paling banyak adalah Aceh Tengah. Berdasarkan data Dinas Perkebunan dan Kehutanan Aceh Tengah sampai akhir 2012 dengan hasil produksi kopi arabika mencapai 25.370 ton dan robusta 793 ton pertahun.

Dari observasi awal yang dilakukan sebagian besar petani di Aceh Tengah hanya menjual hasil panenya yaitu kopi yang masih berwarna merah (buah gelondong). Hal ini dikarenakan lamanya pengelolaan dan proses pengeringan menggunakan panas matahari, pada musim panas lama pengeringan biji kopi memakan waktu hingga 5-7 hari, sedangkan pada musim hujan lama pengeringannya 1-2 minggu bahkan lebih lama lagi. Udara yang lembab serta proses pengeringan biji kopi yang lama dapat menyebabkan tumbuhnya sejenis jamur yang menimbulkan bau yang tidak sedap dan berkurangnya kualitas biji kopi

Salah satu metode untuk mengeringkan biji kopi yang digunakan petani kopi di Bener Meriah dan Aceh Tengah yaitu metode pengeringan alami/tradisional yaitu dengan memanfaatkan sinar matahari. Penggunaan energi matahari sebagai sumber panas pengeringan masih banyak kelemahan karena panas energi matahari tidak terus menerus ada sepanjang hari dan pengeringan tidak dapat dilakukan pada saat musim hujan, kemudian higienis produk juga menjadi kendala karena biasanya penjemuran dilakukan di lahan terbuka, yang hanya dilapisi plastik atau terpal, lantai semen, bahkan ada yang langsung melakukan penjemuran di jalan atau tanah terbuka tanpa menggunakan alas sehingga mudah terkena kotoran-kotoran seperti binatang, serangga, tanah, ataupun krikil (Gambar 1)



Gambar 1. Penjemuran biji kopi tradisional

Tujuan umum penelitian ini adalah meningkatkan kualitas biji kopi sesuai dengan standar nasional. Sedangkan tujuan khusus dari penelitian ini adalah merancang dan membuat *solar dryer* dengan aliran panas secara konveksi alamiah, mengembangkan alat pengontrol suhu untuk setiap ruangan *solar dryer* dan mengintegrasikan informasi dari *solar dryer* melalui jaringan internet.

Untuk mempersingkat waktu dalam proses pengeringan biji kopi, dibutuhkan sumber panas pengganti, menggunakan alat pengering dengan jenis tabung roll yang berputar menggunakan pemanas kompor gas LPG [1].

Pada hasil pengukuran Studi eksperimental rumah pengering kopi menggunakan plastik ultra violet (*uv solar dryer*) dengan mekanisme konveksi alamiah menunjukkan pengaruh waktu pengeringan biji kopi terhadap distribusi temperatur di dalam ruangan rumah pengering, nilai temperatur ruangan lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur lingkungan [2].

Mesin Pengering Hybrid untuk kopi ini memanfaatkan cahaya matahari dan pembakaran dari kayu atau ampas kopi sebagai bahan bakarnya, dari hasil pengujian didapatkan proses pengeringan lebih cepat 2 hari dibandingkan dengan pengeringan matahari langsung [3].

Pengembangan desain alat pengering *hybrid* berenergi surya dan biomassa dengan sistem efek cerobong menunjukkan pengaliran udara secara efek cerobong sistem terpisah baik dari kolektor surya maupun *heat exchanger* berjalan dengan baik yang ditunjukkan oleh adanya perubahan suhu ruang pengering [4].

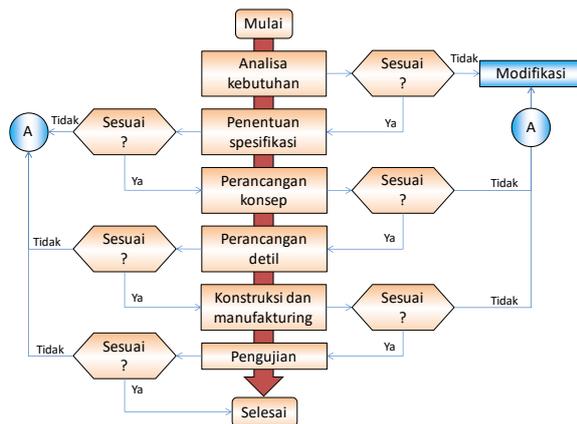
Pengering tenaga surya dengan sistem bekap panas tenaga biomass dapat dimanfaatkan untuk pengeringan berbagai hasil pertanian, dari hasil pengujian temperatur pengering berkisar 40 - 60°C [5]

2. Metode Penelitian

Penentuan dalam rekayasa alat berdasarkan kebutuhan pasar dan disesuaikan dengan parameter perancangan. Tahapan penentuan spesifikasi dilakukan melalui identifikasi *design requirements and objective* (DR&O) [6] yang terdiri dari tahapan pemilihan mekanisme dan konstruksi, proses bahan, kondisi operasi bahan, kapasitas

Tahapan perancangan konsep terdiri dari pembuatan konsep awal dengan penentuan kondisi batas (*boundary condition*), alternatif dan penentuan desain melalui *Quality Function Deployment* (QFD) dengan menghubungkan kebutuhan konsumen dan spesifikasi alat [7,8]. Tahapan perancangan detail dilakukan perhitungan, analisis dan simulasi menggunakan software perancangan, pemilihan material dan proses pembuatan, dan *detail engineering design* (*assy & part drawing*). Bahan dan peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini terbagi atas dua yaitu bahan dan alat untuk pembuatan alat pengering dan untuk *microcontroller* untuk monitor berbasis IoT.

Tahapan perancangan untuk pengembangan produk dilakukan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan perancangan pengembangan alat

Pada tahap ini dilakukan perancangan alat pengering *solar dryer* dan sistem monitoring berbasis IoT dilakukan secara terpisah. Metode yang digunakan untuk melakukan desain pengering *solar dryer 4.0* ini adalah *Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)* seperti yang digunakan oleh Barbosa and Carvalho dan Todic, et. al. Metode ini yaitu berfokus pada menyederhanakan suatu produk untuk mengurangi waktu dan biaya manufaktur maupun perakitan [9,10]. Penentuan dalam rekayasa alat berdasarkan kebutuhan pasar dan disesuaikan dengan parameter perancangan. Tahapan penentuan spesifikasi dilakukan melalui identifikasi *design requirements and objective (DR&O)* [6] yang terdiri dari tahapan pemilihan mekanisme dan konstruksi, proses bahan, kondisi operasi bahan, dan kapasitas.

Langkah-langkah desain pengering kopi tipe bak terdiri dari:

- **Observasi Kebutuhan**

Observasi kebutuhan dilakukan dengan mengestimasi kebutuhan energi yang diperlukan untuk pengeringan kopi. Manfaat dan harapan pengguna pengering untuk mengeringkan biji kopi, serta bila telah dibangun, dapat menggantikan cara pengeringan konvensional.

- **Penentuan Kriteria Desain**

Penentuan kriteria desain berdasarkan prinsip kerja pengering kopi yang ingin dibuat, dilakukan untuk menentukan kriteria dasar yang digunakan sebagai dasar perancangan berdasarkan observasi kebutuhan. Untuk itu dibuat skema dahulu agar dapat mengetahui diagram alir dari prinsip kerja pengering.

- **Perancangan**

Perancangan meliputi perancangan fungsional untuk menentukan fungsi dari komponen utama pengering kopi tipe bak dengan sumber panas dari tungku sekam kopi dan kolektor surya, sedangkan rancangan struktural untuk menentukan bentuk dan tata letak dari masing-masing komponen.

Bahan dan alat untuk pembuatan pengering terdiri dari ruang pengering, kolektor surya, dan saluran buang. Bahan untuk pengering adalah besi *hollow* persegi 4x4, besi *hollow* persegi 2x2, plat siku

3x3, kayu kaso, seng, plat stainless steel berlubang, akrilik bening dan cat, sedangkan alat yang digunakan antara lain mesin las, gerinda potong, mesin bor, mata bor, *rivet nut*, paku rivet, elektroda, gergaji kayu, pisau pemotong akrilik, paku, meteran, penyiku magnet dan kuas cat. Adapun rancangan fungsional dari *solar dryer* dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Rancangan fungsional solar dryer

No	Bagian pengering surya	Fungsi
1	Rangka	Memperkokoh bangunan pengering (landasan untuk bak pengering)
2	Bak pengering	Sebagai tempat biji kopi dikeringkan
3	Atap penutup	Penutup ruangan pengering melindungi kopi apabila hujan
4	Pintu bak pengering	Membuka dan menutup ruang pengering saat rak pengering dimasukkan dan dikeluarkan
5	Kolektor surya	Pengumpul radiasi surya yang mengubah radiasi surya menjadi energi panas

Pengering kopi dengan konveksi alamiah dengan syarat untuk bahan dan perlengkapannya akan disesuaikan dengan kriteria pada Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan struktural solar dryer

No	Bagian pengering surya	Dimensi dan Bahan
1	Rangka	Rangka bak terbuat dari besi hollow (40x40 mm), dan besi siku (30 x 30) mm dengan total ukuran panjang 1480 mm, lebar 600 mm dan tinggi 1551 mm
2	Pintu ruang pengering	Rangka pintu dari besi hollow (30x30mm) dinding dari akrilik ukuran 540 x 610 mm
3	Dinding pengering	Akrilik transparan/bening
4	Rak pengering	Rak pengering berukuran 500 x 580 mm Plat aluminium berukuran dengan bingkai terbuat dari kayu kaso

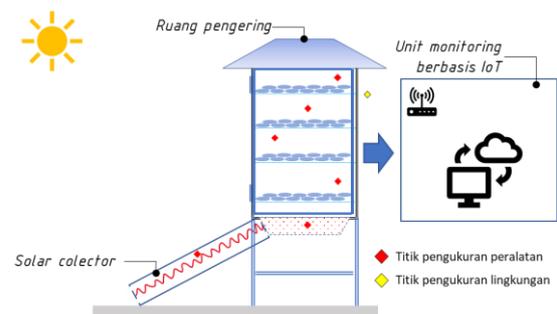
5	Kolektor	Kolektor surya terdiri dari kotak persegi berukuran 600 x 880 mm, bagian atas ditutup dengan akrilik, bagian yang lain ditutup menggunakan seng. Sellembar seng berukuran 540 x 850 mm yang dicat warna hitam dipasang di dalam kotak kolektor.
---	----------	---

Sebuah sistem monitoring berbasis IoT akan menangkap besaran suhu dan kelembapan (sensor DFRobot DHT22) di dalam kolektor surya, ruangan pengeringan dan lingkungan dari alat pengering. Selain itu, sebuah sensor Bh1750 untuk menangkap intensitas matahari juga disematkan pada sistem monitoring ini. Sistem monitoring ini akan terhubung dengan jaringan internet dengan data-data tersebut akan dikirimkan ke sebuah *cloud data server*. Bahan untuk *micro-controller* monitor berbasis IoT seperti terlihat pada tabel 3 berikut;

Tabel 3. Komponen-komponen penyusun sistem microcontroller

No	Item	Volume	Satuan
1	Box panel 555	1	Pcs
2	Mifi modem wifi 4G all operator huawei E5576 - hitam	1	Pcs
3	Cloud hosting rumah web	1	tahun
4	Sensor DHT22DF robot	3	Pcs
5	Sensor BH1750 LUX	2	Pcs
6	ESP8266 ESP 12E CH340G Node Mcu Kit	1	Pcs
7	USB female	4	Pcs
8	USB male	4	Pcs
9	Kabel awm 2464	8	m

Data yang terekam selanjutnya dapat diunduh menggunakan perangkat mobile ataupun personal komputer yang terhubung dengan jaringan internet. Sistem monitoring berbasis IoT ini dipilih agar data performansi dari alat pengering dapat dipantau secara *real-time* dan online (Gambar 3).

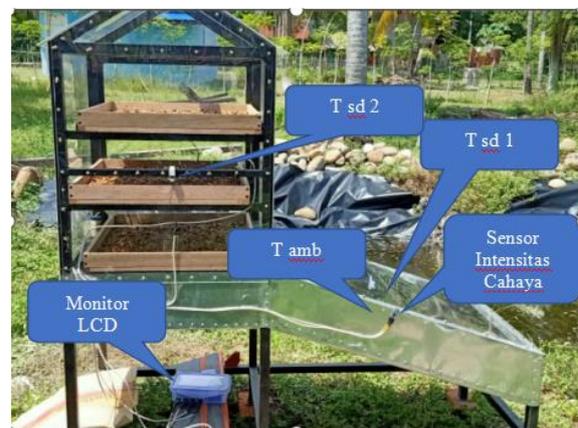


Gambar 3. Konsep solar dryer berbasis teknologi IoT.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Desain Solar Dryer

Instrumen pengering biji kopi yang dihasilkan pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian utama di antaranya adalah ruang pengering biji kopi dan sistem monitor pengeringan. Pada bagian ruang pengering dinding terbuat dari bahan *arcrylic* transparan dengan ketebalan 5 mm, pada bagian ruang pengering terdapat tiga tingkat rak pengering terbuat dari jaring kasa aluminium dengan bingkai kayu kaso yang digunakan untuk menjemur biji kopi yang akan dikeringkan. Setiap rak pengering berkapasitas 3 kg biji kopi basah sehingga total kapasitas pengering 9 kg biji kopi basah. Kapasitas prototipe pengering ini adalah kapasitas skala penelitian Seng yang digunakan sebagai penyerap panas yang berasal dari sinar matahari berukuran 540 x 850 mm disesuaikan dengan kapasitas pengering (Gambar 4).



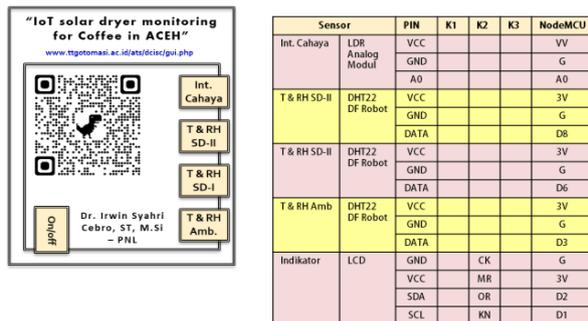
Gambar 4. Prototipe pengering dengan microcontroller

3.2. Microcontroller

Salah satu bagian utama dari alat pengering ini adalah dengan menerapkan sistem monitoring berbasis IoT. Sistem ini secara umum berfungsi untuk melakukan pemantauan kinerja dari alat pengering secara remote. Sebanyak 3 buah sensor suhu dan kelembapan dengan tipe DF Robot DHT-22 dipasang pada posisi *solar collector*, ruang pengering dan lingkungan dari alat pengering. Sebuah sensor intensitas cahaya dengan tipe LDR-LR10 dipasang

untuk mengukur intensitas matahari selama pengeringan berlangsung.

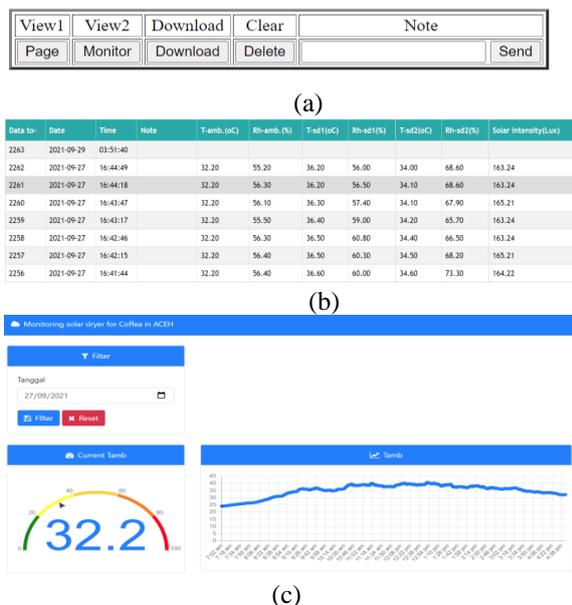
Keempat sensor tersebut dikendalikan oleh sebuah mikrokontroler berbasis ESP8266 dengan tipe Nodemcu V.10 dari sebuah panel box. Sebuah layar LCD dengan karakter 20x4 digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran pada panel box tersebut. Skematik dari sistem didalam panel box tersebut disajikan pada Gambar 5. Sumber daya listrik yang digunakan dalam sistem ini secara keseluruhan adalah menggunakan arus tipe DC dengan tenggangan maksimum 5 V.



Gambar 5. Skematik di dalam panel box

Seluruh data hasil pemantauan parameter kinerja alat pengering selain dapat dilihat pada layar LCD di panel box, juga dapat dipantau melalui perangkat elektronik lainnya yang terhubung dengan jaringan internet. Hal ini karena sistem monitoring ini telah dilengkapi dengan sistem pengiriman data ke *self-cloud data server* melalui jaringan internet dengan bantuan WIFI.

~ GUI IoT solar dryer for Coffea in ACEH ~



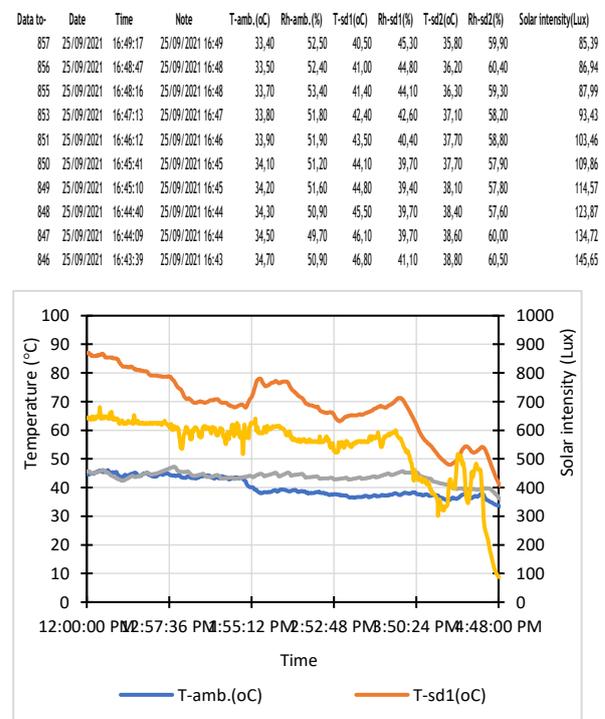
Gambar 6. Sistem monitoring berbasis web

(a) halaman depan/GUI (b) halaman pantau dalam bentuk data angka/numerik (c) halaman pantau dalam bentuk grafik.

Data yang terkirim akan tersimpan dan dapat diakses melalui link <http://tgotomasi.id/ats/dcisc/gui.php> (Gambar 6a). Pada halaman depan dari web pemantauan tersebut tersedia fitur pemantau secara data angka (Gambar 6b) atau secara data grafik (Gambar 6c). Selain itu, fitur untuk mendownload data hasil pemantauan dan menghapus data hasil pemantauan juga telah disiapkan.

3.3. Pengujian Kinerja

Pada pengujian kinerja rancangan alat pengering dengan monitor berbasis IoT beberapa data yang dapat dibaca yaitu; suhu dan kelembaban pada lingkungan, suhu dan kelembaban pada kolektor, suhu dan kelembaban di ruang pengering dan intensitas cahaya di lingkungan. Data akan terekam dengan frekuensi setiap 10 detik. Pengambilan data akan terpantau secara *realtime* dan dilakukan selama 2 hari. Tampilan gambar data dan grafik pengambilan data pada hari ke-1 ditunjukkan pada Gambar 7

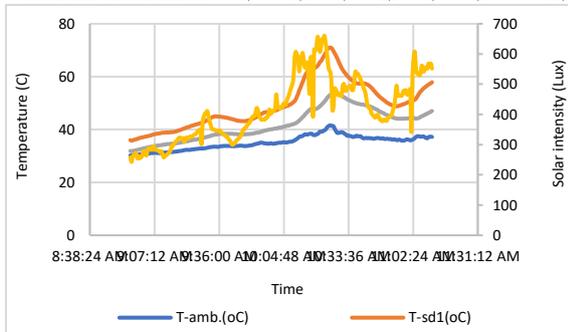


Gambar 7. Tampilan gambar (LCD) data dan grafik pengambilan data pada hari ke 1

Pada data dan grafik ditunjukkan perbandingan temperatur pada tiga titik pengukuran dan intensitas cahaya, dimana T- lingkungan mendekati T pada kolektor sementara T ruang pengering cenderung lebih tinggi dari T-Lingkungan dan T ruang pengering.

Tampilan gambar data dan grafik pengambilan di hari ke-2 dapat dilihat pada Gambar 8 berikut;

Data to	Date	Time	Note	T-amb.(oC)	Rh-amb.(%)	T-sd1(oC)	Rh-sd1(%)	T-sd2(oC)	Rh-sd2(%)	Solar intensity(Lux)
1124	26/09/2021	11:10:49	26/09/2021 11:10	37,2	45	57,9	27,2	47	42,3	551,82
1123	26/09/2021	11:10:18	26/09/2021 11:10	37,3	44,7	57,5	27,4	46,8	42,5	568,62
1122	26/09/2021	11:09:48	26/09/2021 11:09	37,3	45,6	57,3	27,6	46,5	42,8	558,48
1121	26/09/2021	11:09:17	26/09/2021 11:09	37,1	46	57	27,7	46,3	43,1	568,62
1120	26/09/2021	11:08:46	26/09/2021 11:08	36,7	46,2	56,7	27,9	46,1	43,3	551,82
1119	26/09/2021	11:08:16	26/09/2021 11:08	36,8	45,6	56,4	28,1	45,8	43,3	555,14
1118	26/09/2021	11:07:45	26/09/2021 11:07	37	44,7	56	28,2	45,7	43,7	555,14
1117	26/09/2021	11:07:15	26/09/2021 11:07	37,3	44,7	55,7	28,5	45,4	43,9	541,97
1116	26/09/2021	11:06:44	26/09/2021 11:06	37,4	45,9	55,3	28,7	45,2	44,3	548,52
1115	26/09/2021	11:06:14	26/09/2021 11:06	37,3	45,7	54,8	28,9	45	44,4	561,84
1114	26/09/2021	11:05:43	26/09/2021 11:05	37,3	45,3	54,4	29,2	44,8	44,6	535,51



Gambar 8. Tampilan gambar (LCD) data dan grafik pengambilan data pada hari ke 2

Pada Gambar 8 ditunjukkan contoh tampilan gambar data dan grafik temperatur pada tiap titik pengukuran yaitu T Lingkungan, T Kolektor dan T Ruang pengering serta intensitas cahaya. Terlihat perbedaan data pengukuran pada hari ke-1 dengan temperatur untuk ketiga titik mempunyai range yang hampir sama. Sementara itu, terlihat perubahan intensitas cahaya yang signifikan mulai dari awal pengukuran hingga selesai.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa model pengering biji kopi dengan sistem monitoring berbasis mikrokontroler dan IoT telah dapat dirancang bangun dan diimplementasikan dengan baik. Monitoring *solar dryer* dapat dilakukan secara *realtime* dengan tidak ada batasan jarak. Rancangan alat masih dalam skala laboratorium dan siap untuk dikembangkan dengan menambah kapasitas dari pengering

Referensi

[1] Reza Anjasmara Prasetya, Mochamad Arif Irfa'i, Agung Samudra, "Rancang Bangun alat Pengering biji Kopi Menggunakan Pemanas Kompor Gas LPG dengan Model Roll," *Jurnal Reaktom* Volume 5 Nomor 01 Tahun 2020, 14-21.

[2] Sam Budi, Verdy A Koehuan, Nurhayati, "Studi Eksperimental Rumah Pengering Kopi Menggunakan Plastik Ultra Violet (Uv Solar Dryer) Dengan Mekanisme Konveksi Alamiah," *Lontar Jurnal Teknik Mesin UNDANA (LJTMU)*, Vol 7 No 02, 2020.

[3] Yefri Chan, Didik sugianto, Aep Saepul Uyun, "Analisis Pengering Kopi Menggunakan Open Pengering Hybrid (Solar Thermal dan Biomassa) di Desa Gunung Kidul," *Jurnal*

Kajian Teknik Mesin Vol 5 No 1 (Feb 2020) 4 - 8.

[4] Irwansyah, Leopold Oscar Nelwan, Dyah Wulandari, Desain dan Uji Kinerja Alat Pengering Hybrid dengan Efek Cerobong Tipe Tumpukan untuk Pengeringan Biji Kopi Arabika, *JTEP Jurnal Keteknikan Pertanian*, Vol 7. No. 3, p 163 -170, 2019.

[5] Elieser Tarigan, Pengering Tenaga Surya dengan Sistem Bekap Tenaga Biomassa untuk Pengeringan Hasil Pertanian, *TEKNOTAN*, Vol. 14, No. 1, Agustus 2020.

[6] N. Hussain, "Structural health monitoring and its role in affordability," in 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2015.

[7] A. F. Dias Júnior, C. R. Andrade, M. Milan, J. O. Brito, A. M. d. Andrade, and N. D. d. Souza, "Quality function deployment (QFD) reveals appropriate quality of charcoal used in barbecues," *Scientia Agricola*, vol. 77, no. 6, 2020.

[8] M. Ozalp, D. Kucukbas, E. Ilbahar, and S. Cebi, "Integration of Quality Function Deployment with IVIF-AHP and Kano Model for Customer Oriented Product Design," in *Customer Oriented Product Design*: Springer, 2020, pp. 93-106.

[9] G. F. Barbosa and J. d. Carvalho, "Guideline tool based on design for manufacturing and assembly (DFMA) methodology for application on design and manufacturing of aircrafts," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 36, no. 3, pp. 605-614, 2014.

[10] V. Todić, D. Lukić, M. Milošević, G. Jovičić, and J. Vukman, "Manufacturability of product design regarding suitability for manufacturing and assembly (DfMA)," *Journal of production engineering*, vol. 16, no. 1, 2012.