

Perbandingan Kontrol Temperatur menggunakan *Relay* dan PID pada Oven Pengering berbasis *Load Cell* untuk Mengukur Kadar Air Buah

Ainun Nidhar*, Belyamin, Sonki Prasetya, Dianta Mustofa Kamal

Program Studi Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta

Jl. Prof G.A Siwabessy, Kampus UI, Depok 16425

*E-mail: ainunnidhar.tn23@stu.pnj.ac.id

Diajukan: 19-12-2024; Diterima: 28-04-2025; Diterbitkan: 30-04-2025

Abstrak

Pengeringan merupakan metode pengawetan yang digunakan untuk mengurangi kadar air pada makanan, memperpanjang masa simpan, dan menjaga kualitas produk. Penelitian ini membandingkan performa kontrol *relay* dan PID pada oven pengering berbasis *load cell* untuk mengukur kadar air buah secara otomatis sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI). Pendekatan ini bertujuan meningkatkan efisiensi waktu dan akurasi proses pengeringan tanpa perlu penimbangan sampel secara manual. Metode penelitian melibatkan penggunaan oven pengering dengan *load cell* untuk membaca perubahan massa buah selama pengeringan. Arduino sebagai pengendali utama, *thermocouple* untuk memantau temperatur, dan mosul HX711 melakukan proses data massa. Dua skema kontrol temperatur uji *relay* dan PID dengan mode PI, dengan temperatur ditetapkan 105°C. Hasil menunjukkan bahwa kontrol *relay* tidak mampu menjaga kestabilan temperatur akibat sifat *on/off*-nya yang tidak presisi. Sebaliknya, kontrol PID mode PI memberikan kestabilan temperatur dengan toleransi $\pm 1^\circ\text{C}$ dengan *rise time* 2,43 menit, *settling time* 29,025 menit. Sistem diuji menggunakan buah mangga hingga massa stabil dengan laju penguapan rata-rata 1g/menit dan kadar air akhir mencapai 80,95%. Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem alat ukur kadar air berbasis evaporasi yang terintegrasi dengan *load cell* dan kontrol suhu otomatis, memungkinkan pengukuran kadar air secara *real-time* dan non-destruktif. Sistem ini berpotensi diterapkan dalam laboratorium maupun sektor industri yang membutuhkan pengukuran kadar air bahan secara efisien, presisi, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Arduino; kadar air; kontrol temperatur; oven pengering; PID

Abstract

Drying is a preservation method used to reduce the moisture content of food, extend the shelf life, and maintain product quality. This study compares the performance of relay control and PID in load cell-based drying ovens to automatically measure fruit moisture content according to the Indonesian National Standard (SNI). This approach aims to improve the time efficiency and accuracy of the drying process without the need for manual sample weighing. The research method involves using a drying oven with load cells to read changes in fruit mass during drying. Arduino as the main controller, thermocouple to monitor temperature, and Mosul HX711 to process mass data. Two temperature control schemes are relay and PUD with PI mode, with the temperature set to 105°C. The results showed that the relay control was unable to maintain temperature stability due to its imprecise on/off properties. In contrast, the PID mode PI control provides temperature stability with a tolerance of $\pm 1^\circ\text{C}$ with a rise time of 2,43 minutes, a settling time of 29,025 minutes. The system was tested using mango sump until the mass was stable with an average evaporation rate of 1g/minute and a final moisture content of 80.95%. The contribution of this research lies in the development of an evaporation-based moisture measuring system integrated with load cells and automatic temperature control, enabling real-time and non-destructive measurement of moisture content. This system has the potential to be applied in laboratories and industrial sectors that require efficient, precise, and sustainable measurement of material moisture content.

Keywords: Arduino; water content; temperature control; oven dryer; PID

1. Pendahuluan

Pengeringan merupakan metode pengawetan yang digunakan untuk mengurangi laju pembusukan sehingga memperpanjang umur simpan makanan dengan mengurangi kadar air [1]. Indikator utama keberhasilan pengeringan ialah adanya penurunan kadar air pada produk akhir yang sesuai dengan standar yaitu 20% [2]. Untuk mengetahui kadar air dari suatu objek terdapat beberapa metode yaitu pengujian dengan bahan kimia, prosedur fisik, dan evaporasi (*thermogravimetric*) [3].

Penentuan kadar air makanan menggunakan kalsium karbida, asam sulfat memiliki kekurangan, yakni penggunaan bahan kimia yang bersifat korosif tidak baik untuk digunakan untuk penggunaan rutin [3]. Prosedur pengujian dengan metode fisik menggunakan *infra red*, *gas chromatographic*, *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR), dan *electrical methods* kekurangannya biaya alat uji yang mahal, kurang presisi untuk makanan dengan kadar air rendah, serta kompleksitas penggunaan alat [4]. Sementara metode evaporasi (*themogravimetric*) yaitu teknik mengukur kadar air dengan memanaskan sampel dengan temperatur yang terkendali menggunakan oven, perubahan massa sampel akibat proses penguapan sampel diukur, metode ini memiliki kelebihan berupa cara kerja peralatan yang lebih sederhana, relatif lebih cepat dan memungkinkan untuk analisis simultan dengan jumlah sampel yang banyak [3,5].

Di Indonesia terdapat standar yang mengatur tata cara pengujian kadar air menggunakan oven yang tercantum pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 01-2891-1992 yang prosedurnya sama dengan *National Forage Testing Association* (NFTA) 2.1.4, sampel dipanaskan dalam oven pada temperatur 105°C hingga tidak terjadi penurunan massa, namun metode ini memiliki kekurangan karena pada setiap interval waktu tertentu sampel harus dikeluarkan dari oven untuk ditimbang perubahan massanya sehingga menjadi kurang efisien dari segi waktu [6–8].

Alternatif dari kekurangan tersebut ialah dengan penambahan timbangan pada pemanasan menggunakan oven, sehingga sampel tidak perlu dikeluarkan berkala dari oven untuk ditimbang tetapi hanya perlu dipantau perubahan massanya melalui akuisisi data. Sebelumnya telah dilakukan penelitian terkait sistem oven dengan timbangan massa namun penelitian ini hanya dapat digunakan untuk mengukur berat makanan yang tidak memerlukan presisi yang tinggi [9]. Penelitian lain juga telah dilakukan menggunakan program Qbasic pada PC, namun untuk pengukuran massa menggunakan timbangan elektrik digital dan data yang ditransfer ke PC hanya data pembacaan temperatur, sehingga dibutuhkan pengendali untuk mengatur dan menjaga temperatur serta mengakuisisi data perubahan massa [10,11].

Sementara penelitian terkait alat pengukur kadar air menggunakan pengendali mikrokontroler telah dilakukan pada sampel gabah dengan sensor kadar air resistif dan *biplate*, buah kakao kering dengan sensor *soil moisture*, tepung tapioka dengan sensor kapasitif, akan tetapi metode ini tidak dapat digunakan pada pengujian kadar air makanan yang sesuai dengan SNI [12–15].

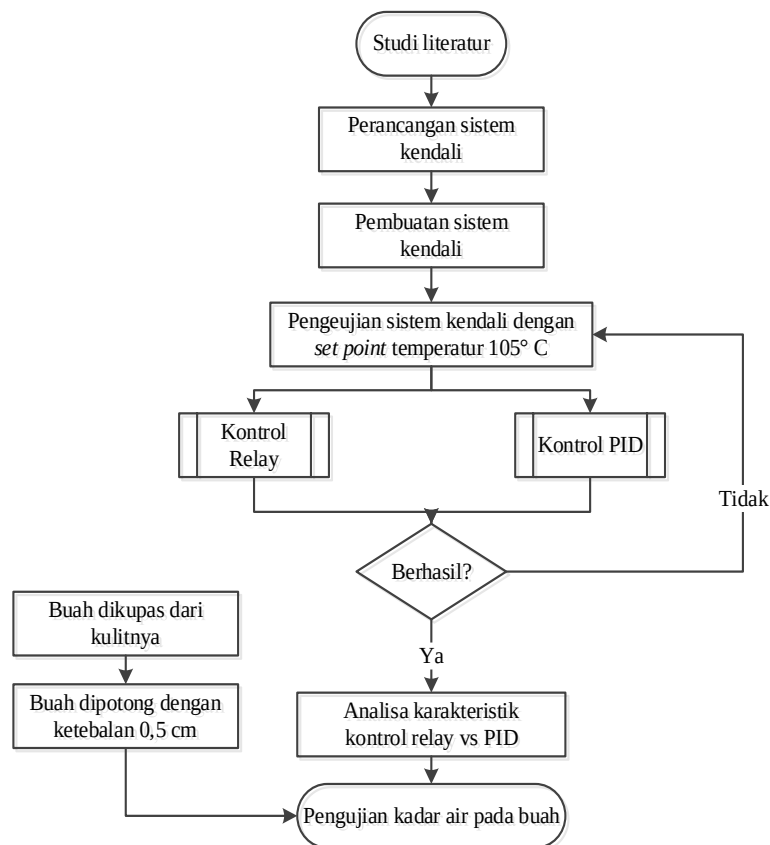
Dari hasil kajian pada penelitian terdahulu, maka diperlukan alat pengukur kadar air metode pemanasan oven sesuai dengan SNI 01-2891-1992, dengan mengoptimalkan proses pengujian dengan mengurangi waktu pengujian dan melalui pengendalian temperatur sekaligus dapat menimbang perubahan *massa* pada sampel, yang datanya langsung terakuisisi pada PC menggunakan mikrokontroler agar sampel tidak perlu dikeluarkan dari oven untuk ditimbang dalam interval waktu tertentu. Hal penting yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini ialah pemanasan yang dapat mencapai temperatur setel (*setpoint*) 105°C dan mempertahankannya, karena temperatur yang terlalu tinggi selama pengujian dapat menyebabkan permukaan produk terbakar, sementara temperatur yang terlalu rendah membuat air pada bagian dalam produk menjadi sulit untuk menguap [16].

2. Material dan Metodologi

Langkah-langkah penelitian secara sistematis ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian ini dilakukan dengan terlebih dahulu mempelajari bagaimana sistem pengukuran kadar air menggunakan oven, termasuk identifikasi perangkat yang dibutuhkan dan menentukan metode kontrol temperatur yang efektif. Tahap awal dimulai dengan studi literatur terkait prinsip kerja oven pengering, sensor *load cell*, kontrol temperatur serta implementasi mikrokontroler Arduino. Berdasarkan hasil studi dilakukan perancangan sistem kendali temperatur dan pemilihan metode kontrol menggunakan *relay* dan *Proportional-Integral-Derivative* (PID) sebagai pembanding.

Setelah perancangan selesai, sistem kendali temperatur dikembangkan dan diuji dengan temperatur setel (*setpoint*) 105 °C. Uji kontrol dilakukan bertahap dari *tuning* parameter mode kontrol *Proportional* (P), *Proportional-Integral* (PI) dan PID untuk mengevaluasi stabilitas temperatur yang dicapai, lonjakan (*overshoot*), waktu naik (*rise time*), waktu stabil (*settling time*), dan *error steady-state*. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan jenis kontrol yang optimal digunakan untuk proses pengeringan. Jika kontrol temperatur tidak mampu menjaga kestabilan sesuai titik setel (*setpoint*), dilakuka penyesuaian ulang parameter.

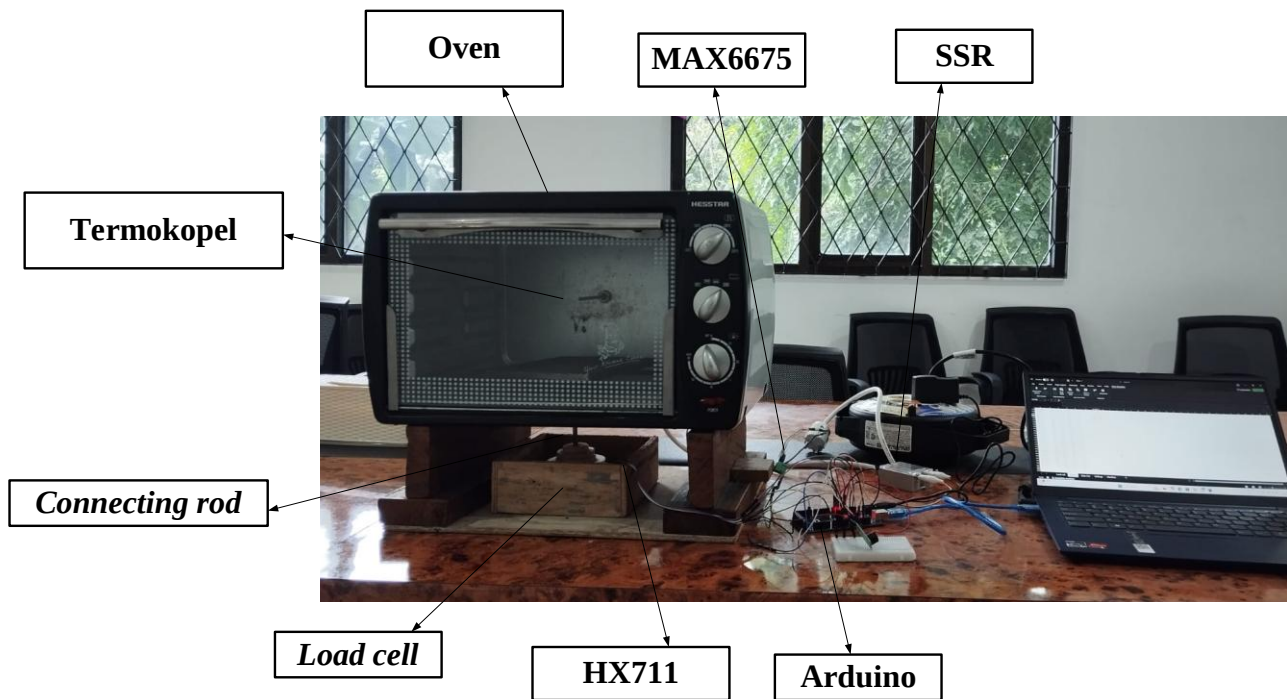
Saat sistem kontrol menunjukkan performa yang stabil, maka dilakukan uji perbandingan perfoma antara kontrol *relay* dan PID. Analisis dilakukan terhadap kemampuan masing-masing metode dalam menjaga kestabilan temperatur dan dampaknya pada proses pengeringan. Sampel pengeringan dimasukkan ke dalam oven pengering yang telah dilengkapi *load cell* untuk mencatat perubahan massa secara *real-time* selama proses pengeringan berlangsung. Data massa digunakan untuk menentukan kadar air secara otomatis tanpa perlu mengeluarkan sampel dari oven. Pengujian berlangsung hingga tidak terjadi perubahan massa.



Gambar 1. Diagram alir pengujian oven berbasis *load cell* untuk mengukur kadar air pada buah

2.1. Peralatan

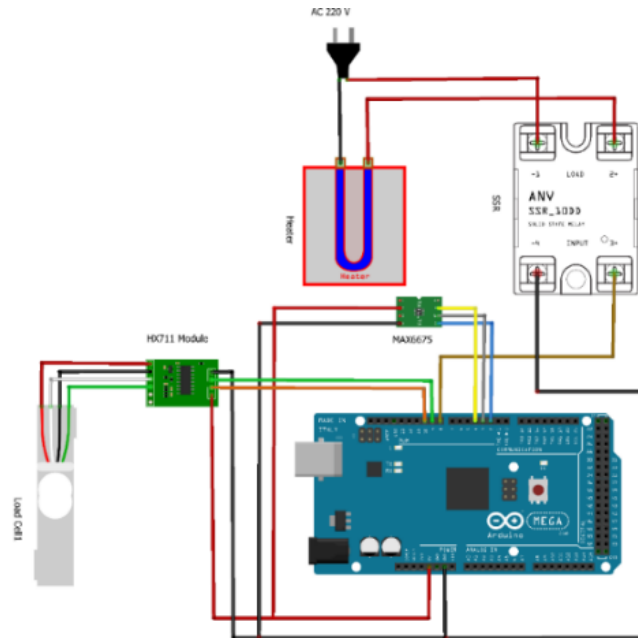
Oven pengering berbasis *load cell* terdiri dari oven Hesstar tipe HEO-188 berdaya 1.380 W dengan temperatur operasinya 100°C sampai dengan 250°C, batang ekstensi yang diujungnya merupakan wadah untuk menempatkan objek pengeringan dan diteruskan pada *load cell* sebagai sensor *massa* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Oven berbasis *load cell* sebagai alat ukur kadar air

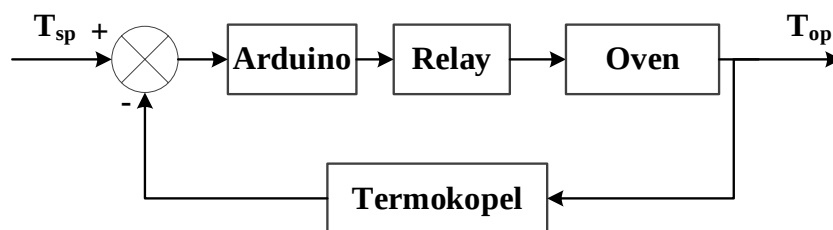
Mikrokontroler Arduino Atmega2560 dipilih sebagai pusat kendali untuk mengatur dan menjaga temperatur oven, serta membaca perubahan massa pada sampel selama proses penguapan melalui *load cell*. Arduino adalah peralatan elektronik *open source* atau papan sirkuit, di mana desain skematik dan PCB bersifat *open source* sehingga kita dapat menggunakannya atau melakukan modifikasi, dan berfungsi sebagai komponen kontrol utama untuk memberikan perintah ke perangkat keras lain [17]. Jika dibandingkan dengan mikrokontroler lain seperti Raspberry Pi dan ESP 32, Arduino memiliki keunggulan sederhana, hemat biaya, lebih cocok untuk prototipe skala kecil, konsumsi daya rendah meskipun memorinya lebih kecil, tetapi Arduino cukup untuk kebutuhan penelitian ini karena program yang digunakan tidak terlalu kompleks dan lebih tahan terhadap kegagalan daya [18–20].

Kontrol temperatur oven dengan PID menggunakan sensor termokopel tipe-K untuk membaca perubahan temperatur, dengan keunggulannya adalah biaya lebih rendah, lebih kokoh, dan kisaran temperatur yang lebih luas antara 0°C hingga 1.100°C [21]. Dalam penggunaannya, sensor termokopel membutuhkan *amplifier* berfungsi sebagai *Analog to Digital Converter* (ADC), yaitu MAX6675, yang memiliki 5 pin yang akan terhubung ke mikrokontroler [26]. *Load cell* adalah sensor yang mendeteksi tekanan atau massa suatu benda, dalam hal ini sebagai perubahan resistansi, kemudian keluaran diubah oleh modul HX711 menjadi tegangan [22–24]. Sel beban dikalibrasi terlebih dahulu dengan mengatur faktor pengali bacaan massa. Gambar 3 merupakan rangkaian dari kontrol temperatur untuk metode *relay* maupun PID.



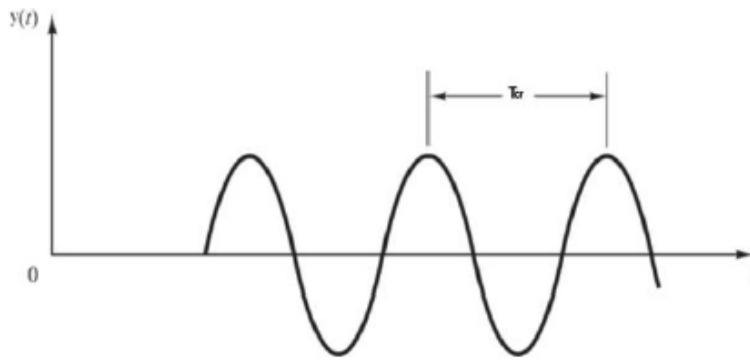
Gambar 3. Diagram rangkaian pengujian oven berbasis *load cell* untuk mengukur kadar air buah

Relay umumnya digunakan sebagai pengaman peralatan listrik, namun juga bisa berfungsi sebagai pengendali perangkat listrik. *Relay* bekerja dengan mengaktifkan medan magnet saat diberi arus, dan dapat mengubah posisi saklar, sehingga *relay* bekerja secara *on/off* [25,26]. Dari Gambar 4 *thermocouple* sebagai sensor temperatur membaca panas (T_{op}) yang terima untuk dikirimkan ke mikrokontroler Arduino untuk memerintahkan *relay* membuka atau memutus arus pada oven, sesuai dengan temperatur setel (T_{sp}) 105°C. Arus dan tegangan listrik pada *relay* dapat diatur, sehingga membuat *relay* banyak diaplikasikan pada mesin-mesin yang bekerja secara berurutan seperti pada mesin *injection molding*, *blow molding* dan pada *belt conveyor* [27].



Gambar 4. Diagram blok kontrol temperatur menggunakan *relay*

Kontrol PID digunakan pada 90% proses industri karena kesederhanaan programnya, efektivitas kontrolnya, dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, dan dapat dilakukan penyetelan konstanta secara otomatis [28,29]. Kontrol PID telah diujikan pada berbagai pengujian sistem seperti pengaturan temperatur Metode penyetelan (*tunning*) PID yang digunakan ialah Ziegler–Nichols (ZN) pada *loop* tertutup yang sudah digunakan lebih dari lima puluh tahun sebagai aturan terbaik dalam menentukan PID [30]. Konstanta proporsional awalnya dinaikkan dari nol hingga mencapai puncaknya (K_u) hingga *loop* berisilasi dengan amplitudo yang konstan, periode osilasi konstan tersebut sebut P_u seperti pada Gambar 5, yang digunakan untuk menghitung konstanta proporsional (K_p), konstanta integral (K_i) dan konstanta derivatif (K_d) mengikuti formula pada Tabel 1 [31].

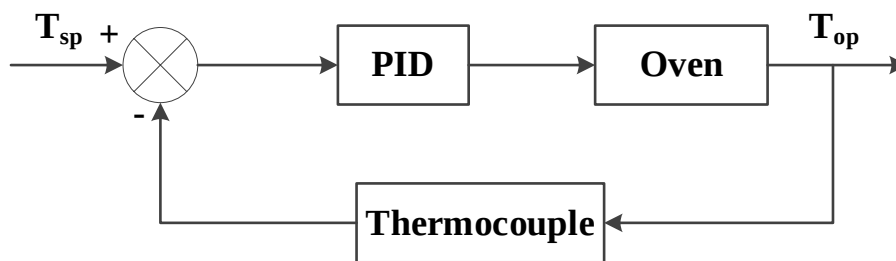


Gambar 5. Respons osilasi konstan pada periode T_{cr} [32]

Tabel 1. Aturan Formula Ziegler – Nichols pada *Loop* Tertutup [31]

<i>Controller Type</i>	K_p	K_i	K_d
P	0,5 K_u	∞	0
PI	0,45 K_u	1,2(K_p/P_u)	0
PID	0,6 K_u	2(K_p/P_u)	0,125/(K_p/P_u)

Kontrol temperatur menggunakan PID ini menggunakan Arduino sebagai pusat kendali, dengan *thermocouple* sebagai sensor mendeteksi perubahan temperatur seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram blok sistem kontrol PID

2.2. Mekanisme Pengujian Kadar Air

Mangga Harumanis menjadi objek pengujian karena menjadi komoditi ekspor terbesar kedua berpotensi untuk dikembangkan sebagai produk buah kering [33]. Mangga dikupas lalu dipisahkan dari bijinya dan diiris dengan ketebalan 5 mm dengan massa sebelum dikeringkan 200 g. Prosedur pengujian dilakukan sesuai dengan SNI 01-2891-1992. Temperatur dan kelembaban ruangan tidak dikontrol. Kadar air pada buah ditentukan dengan membandingkan massa air yang menguap (w) terhadap massa buah sebelum dikeringkan (w_1), sesuai dengan persamaan 1 [6].

$$Kadar\ air\ (\%) = \frac{w\ (g)}{w_1\ (g)} \quad (1)$$

2.3. Metode Analisis Data

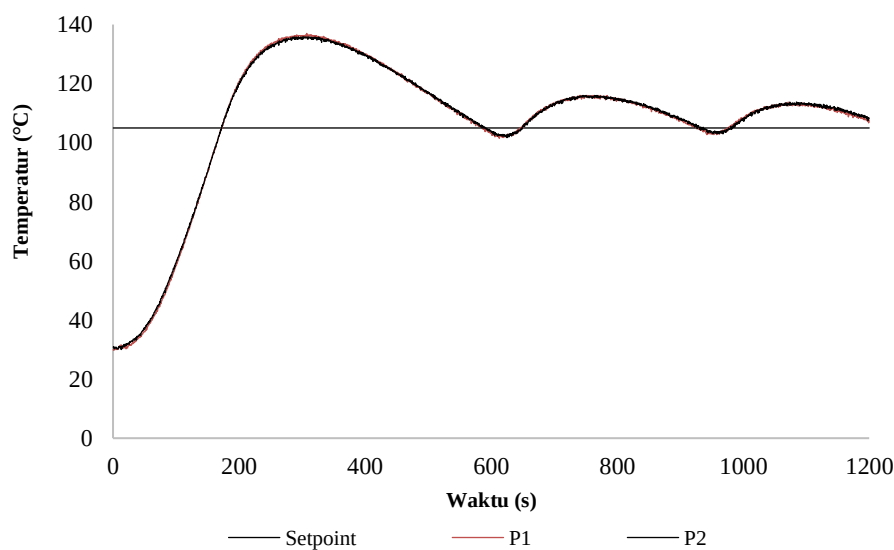
Data hasil kontrol temperatur menggunakan *relay* dan PID dari Arduino diakuisisi langsung secara *real-time* melalui *data steamer* pada Microsoft Excel yang dihubungkan melalui kabel USB, kemudian data diolah untuk dibandingkan nilai

waktu naik (*rise time*), waktu stabil (*settling time*), lonjakan (*overshoot*), nilai kesalahan (*error*), grafik respons kestabilan sistemnya. Metode yang memiliki respons paling stabil di pilih untuk dilanjutkan pada pengujian kadar air, analisis data perubahan massa juga dilakukan menggunakan Microsoft Excel.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Kestabilan Respon Metode Relay dan PID

Pengujian kontrol temperatur oven dilakukan pada ruangan dengan temperatur 27 °C. Pada pengujian metode *relay* yang dilakukan sebanyak dua kali, terlihat bahwa *relay* tidak dapat mencapai kestabilan temperatur sesuai dengan titik setel (*setpoint*) yang diinginkan. Hal ini terjadi karena *relay* hanya dapat dikontrol secara digital dalam hal ini hanya bisa bernilai 0 (off) atau 1 (on) seperti pada Gambar 7, sehingga *relay* memberikan daya penuh ke oven saat diaktifkan dan menyebabkan osilasi berulang dengan lonjakan (*overshoot*) yang tinggi, lal ini sejalan dengan pengendalian temperatur pada ruang bakar dan oven menggunakan *Solid State Relay* (SSR) [34,35].

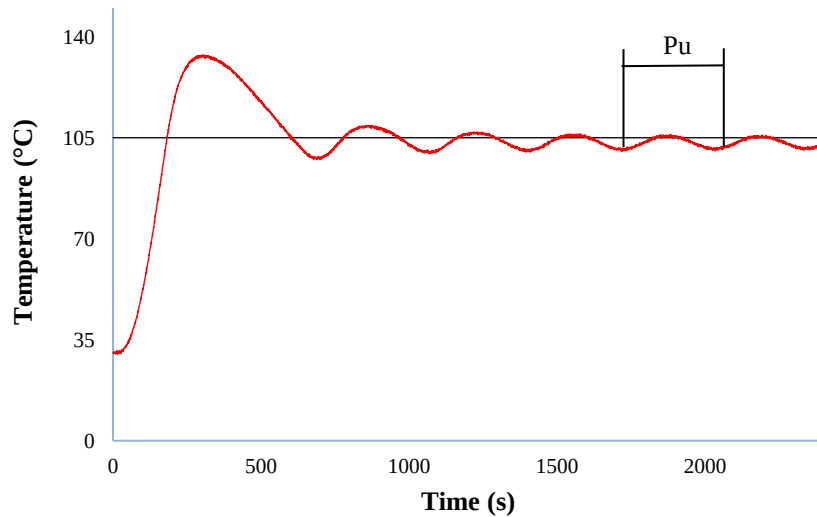


Gambar 7. Diagram kestabilan respon kontrol temperatur pada kontrol *relay*

Sedangkan pada metode PID, dilakukan uji coba terdahulu dengan memasukkan $K_c = 18$ pada program, dan didapatkan periode osilasi konstan (P_u) pada 308,5 detik seperti pada Gambar 8. Sehingga dengan menggunakan rumus pada Tabel 1, didapatkan masing-masing konstanta P, PI, dan PID seperti pada Tabel 2 dengan pengujian yang dilakukan masing-masing sebanyak tiga kali.

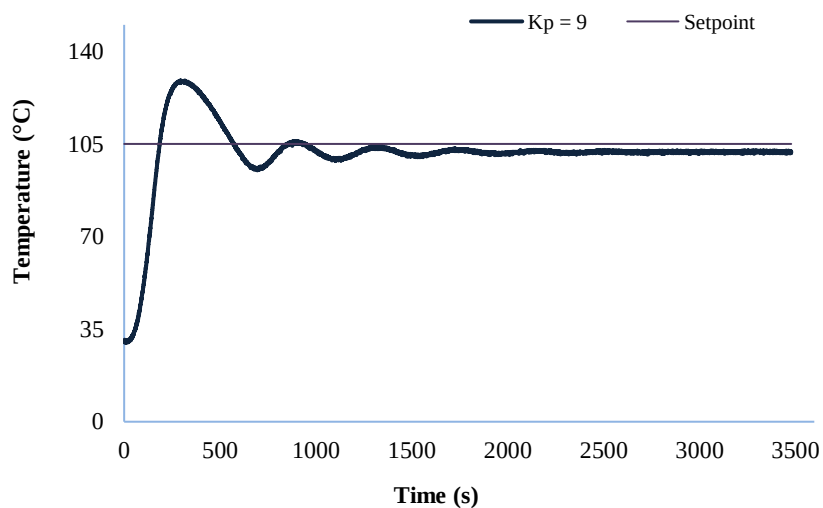
Tabel 2. Nilai PID *Tunning* Menggunakan Metode Ziegler –Nichols pada *Loop* Tertutup [36–38]

Controller Type	K_p	K_i	K_d
P	9	0	0
PI	8,1	0,032	0
PID	10,8	0,07	3,571



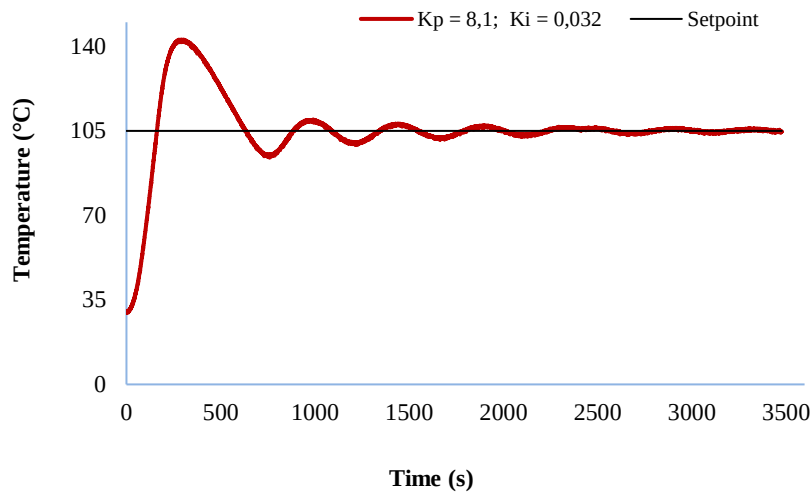
Gambar 8. Diagram kestabilan respon pada Kc 18

Gambar 9 menunjukkan respons sistem mode P dengan $K_p = 9$ memberikan stabilitas yang lebih tinggi, tetapi masih memiliki perbedaan temperatur $\pm 5^\circ\text{C}$ dari temperatur setel (*setpoint*), ini bisa jadi disebabkan oleh fakta bahwa kontrol P tidak dapat sepenuhnya menghilangkan kesalahan, meskipun osilasi dapat diredam. Kontrol P bekerja berdasarkan nilai kesalahan saat ini atau perbedaan antara temperatur setel dan temperatur aktual. Ini menunjukkan seberapa banyak kontrol merespons kesalahan, jika nilai kesalahannya kecil maka tindakan kontrol juga akan kecil. Kontrol P memberikan keuntungan untuk mempercepat respons terhadap perubahan temperatur dan dapat menyesuaikan luaran jika terjadi gangguan [39].



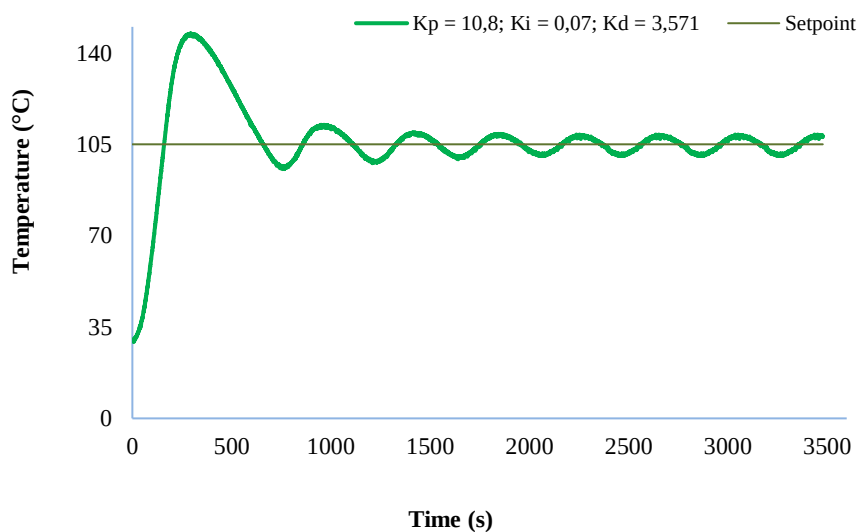
Gambar 9. Uji kestabilan temperatur pada mode P dengan Kc = 18

Dari Gambar 10, ditunjukkan bahwa kontrol PI dapat mengontrol temperatur lebih baik daripada mode P saja dengan selisih $\pm 1^\circ\text{C}$ dari temperatur setel, namun masih ada osilasi. Kontrol PI dimaksudkan untuk mengurangi kesalahan tetap saat menggunakan kontrol P saja, dengan K_i berfungsi untuk mengakumulasi nilai kesalahan dari waktu ke waktu untuk memastikan bahwa kesalahan dalam keadaan stabil adalah nol [39,40].



Gambar 10. Uji kestabilan temperatur pada mode PI dengan $K_c = 18$

Gambar 11 menunjukkan hasil kontrol temperatur dengan mode PID menggunakan $K_p = 10,8$, $K_i = 0,07$ dan $K_d = 3,571$. Namun hasilnya justru kurang stabil dibanding mode PI. Osilasi tetap terjadi dalam selisih ± 3 °C dari temperatur setel meskipun secara teori kontrol D seharusnya mengurangi osilasi. Hal ini mungkin disebabkan termokopel yang rentan terhadap gangguan kebisingan karena tegangannya sangat kecil, menyebabkan penundaan atau penundaan pembacaan temperatur yang membuat kontrol D bereaksi berlebihan. Akibatnya kontrol D dapat memengaruhi kontrol P dan I, yang dapat membuat kesalahan terlihat berfluktuasi dan pembacaan akumulasi kesalahan salah. Hal ini bertentangan dengan beberapa referensi yang menunjukkan bahwa mode PID memiliki kestabilan sistem yang lebih baik dalam kontrol temperatur [40–44].



Gambar 11. Uji kestabilan temperatur pada mode PID dengan $K_c = 18$

Berdasarkan Tabel 3, mode P memiliki waktu naik (rise time) tercepat karena memberikan respons korektif yang besar terhadap kesalahan (error). Mode PI memberikan waktu stabil (settling time) lebih cepat dibanding PID karena nilai K_i

yang lebih kecil, sehingga lebih cepat mencapai kestabilan tanpa osilasi berlebih. Sementara itu mode PID menghasilkan lonjakan (*overshoot*) tertinggi akibat nilai K_p yang terlalu besar dan K_d yang kurang efektif dalam meredam perubahan kesalahan (*error*). Pada penelitian pengeringan ikan dan biji-bijian, kontrol temperatur menggunakan *fuzzy logic* dan kombinasi dengan *crisp* menunjukkan kinerja yang baik dan tidak menghasilkan lonjakan (*overshoot*) [45,46]. Sehingga *fuzzy logic* dimungkinkan untuk diterapkan pada oven pengering berbasis *load cell* sebagai metode pengukur kadar air.

Tabel 3. Perbandingan Performa Kontrol *Relay*, P, PI dan PID

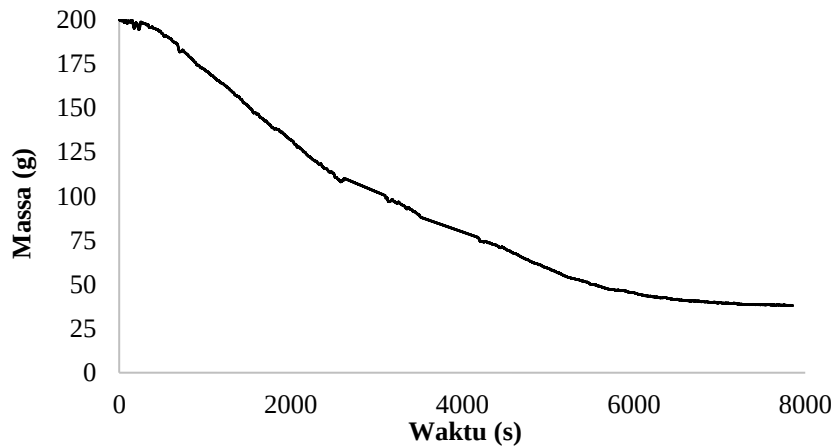
Kontroler	Kriteria			
	<i>Rise time (min)</i>	<i>Settling time (min)</i>	<i>Peak time (min)</i>	<i>Maxiumum Overshoot (%)</i>
<i>Relay</i>	2,6	-	5,125	130
P	2,8	29,925	4,917	123
PI	2,43	29.025	4,592	136
PID	2,41	28.675	4,875	140

3.2. Pengujian Kadar Air

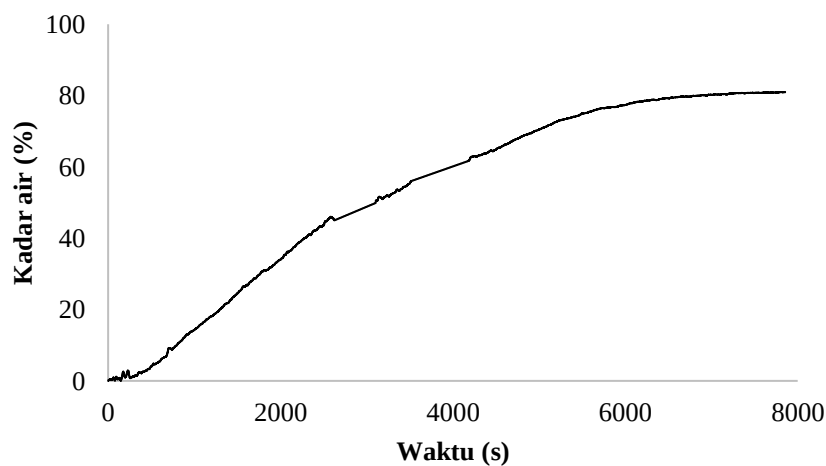
Dari analisis kontrol di atas, oven berbasis sel beban untuk mengukur kadar air menggunakan mode PI sebagai pengatur temperatur. Sampel mangga dimasukkan setelah temperatur uji stabil, kemudian sampel dipanaskan hingga tidak terjadi penurunan massa dengan hasil sebelum dan sesudah pengujian ditunjukkan pada Gambar 12. Penurunan massa adalah air yang menguap dari pori-pori mangga, dengan rata-rata laju penguapan 1 g/menit selama 2 jam 54 menit ditunjukkan pada Gambar 13, kemudian penurunan massa mulai melambat selama 16 menit hingga tidak terjadi penurunan massa. Dengan menggunakan perhitungan dalam Persamaan (1) dengan massa air yang diuap sebesar 161,9 g dan massa awal sebelum pengeringan 200 g, diperoleh kadar air buah mangga pada uji coba ini sebesar 80,95% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 12. Kondisi mangga sebelum dan sesudah pengujian kadar air



Gambar 13. Penurunan massa buah mangga selama pengujian kadar air menggunakan oven berbasis *load cell*



Gambar 14. Kadar air buah mangga berdasarkan waktu pemanasan menggunakan oven berbasis *load cell*

4. Kesimpulan

Metode *relay* tidak dapat digunakan karena sangat tidak stabil dalam mempertahankan temperatur, disebabkan *relay* memberikan daya penuh pada oven saat diaktifkan, sehingga tidak cocok untuk mempertahankan temperatur dengan akurasi tinggi. Sebaliknya, metode PID menunjukkan bahwa mode PI lebih stabil dengan toleransi temperatur $\pm 1^{\circ}\text{C}$ untuk mengendalikan suhu oven berbasis *load cell* dalam proses pengukuran kadar air berbasis evaporasi, dibandingkan mode P maupun PD, meskipun masih ditemukan lonjakan (*overshoot*). Penambahan logika *fuzzy* diusulkan untuk mengurangi lonjakan (*overshoot*) serta meredam osilasi pada sistem kontrol temperatur, sehingga performa sistem semakin optimal.

Dengan penggunaan mode PI, proses pengukuran kadar air dapat dilakukan secara real-time tanpa perlu membuka oven dan tanpa menimbang ulang secara manual, sehingga menghemat waktu dan meningkatkan efisiensi pengukuran. Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan sistem alat ukur kadar air berbasis evaporasi yang terintegrasi dengan sistem kendali otomatis, dan berpotensi diterapkan dalam pengukuran kadar air bahan secara presisi di laboratorium maupun di lingkungan industri.

Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu pengujian hanya dilakukan pada objek berupa buah mangga, dan belum dilakukan validasi terhadap hasil pengukuran menggunakan metode standar seperti metode gravimetri

SNI. Ke depan, perlu dilakukan validasi lebih lanjut serta pengujian terhadap berbagai jenis material dengan karakteristik kadar air yang berbeda, untuk memastikan keakuratan dan generalisasi sistem ini pada berbagai kondisi pengujian.

Daftar Pustaka

- [1] Zotarelli, M.F., Durigon, A., da Silva, V.M., Hubinger, M.D., Laurindo, J.B. Rehydration of mango powders produced by cast-tape drying, freeze drying, and spray drying. *Drying Technology*. 2022;40:175–187.
- [2] Badan Standarisasi Nasional. SNI 3710:2018. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional; 2018.
- [3] Vera Zambrano, M., Dutta, B., Mercer, D.G., MacLean, H.L., Touchie, M.F. Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: a review. *Trends Food Sci Technol*. 2019;88:484–496.
- [4] Pomeranz, Y., Meloan, C.E. *Food Analysis*. Third Edit. Boston, MA: Springer US; 1995.
- [5] Makawy, M.M., El-sayd, N.I. Comparison of methods for determination of moisture in food. *Res J Agric Biol Sci*. 2010;6:906–911.
- [6] Badan Standarisasi Nasional. *Cara Uji Makanan dan Minuman*. Badan Standarisasi Nasional; 1992.
- [7] Hande AR, Swami SB, Thakor NJ. Effect of drying methods and packaging materials on quality parameters of stored kokum rind. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014;7:114–126.
- [8] Arezou, R., Maria, P., Mehrdad, R. Assessment of soil moisture content measurement methods: conventional laboratory oven versus halogen moisture analyzer. *Journal of Soil and Water Science*. 2020;4:151–160.
- [9] Yamatokoriyama NI. *Microwave Oven with Food Weight Measurement*, 1988.
- [10] Rossouw, D.J. Point temperature measurements. *Application of thermo-fluidic measurement techniques: an introduction*, Oxford: Elsevier Inc.; 2016, p. 169–190.
- [11] Ökmen, Z., Bayindirli, A. Modification of a household microwave oven for continuous temperature and weight measurements during drying of foods. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2000;35:225–231.
- [12] Budiawan, R.A., Wendanto, W. Alat pengering dan pengukur kadar air pada gabah berbasis mikrokontroler. *Informatika*. 2015;2:54–62.
- [13] Zainudin, A., Santoso, T., Wijayanti, A., Pratiarso, A., Sudarsono, A., Mahmudah, H., et al. Pemanfaatan alat monitoring kadar air pada gabah untuk meningkatkan kualitas panen. *DIKEMAS (Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat)*. 2020;4:49–56.
- [14] Valentin, R.D., Diwangkara, B., Jupriyadi, J., Riskiono, S.D., Gusbriana, E. Alat uji kadar air pada buah kakao kering berbasis mikrokontroler arduino. *Jurnal Teknik Dan Sistem Komputer*. 2020;1:28–33.
- [15] Hidayatullah, S.A., Suciati. S.W., Pauzi, G.A., Surtono, A. Design of measurement of water content with capacity method to determine old categories to save tapioca flour. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*. 2022;3:44–49.
- [16] López, L.C., Hincapié-Llanos, G.A. Comparison of mango (*mangifera indica*) dehydration technologies: a systematic review. *AgriEngineering*. 2024;6:2694–2717.
- [17] Ardianto, A.D.H. *Arduino Belajar Cepat dan Pemograman*. Bandung: Informatika Bandung; 2016.
- [18] Serîţan, G.C., Enache, B.A., Vîlcu, I., Grigorescu, S.D., Mladenov, V. Comparison study of top development boards in the context of IoT. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques Serie Electrotechnique et Energetique*. 2022;67:483–486.

- [19] Mahdi, S.M., Al-Obaidi, M.A.M., Mahdi, R.H. Comparative study of arduino types and raspberry pi with programming languages. *Journal La Multiapp*. 2023;3:250–255.
- [20] Goyal, Y. Comparative study of microcontroller: arduino uno, raspberry PI 4, ESP 32. *Int J Res Appl Sci Eng Technol*. 2024;12:588–592.
- [21] Type K Thermocouple Data Sheet n.d. https://api.ferguson.com/dar-step-service/Query?ASSET_ID=5044326&USE_TYPE=SPECIFICATION&PRODUCT_ID=531968 (accessed December 4, 2024).
- [22] Andini, M., Ulfah, M. Rancang bangun alat penghitung dan pemilah ikan berdasarkan berat menggunakan sensor ultrasonik dan load cell berbasis arduino uno. *Spektral*. 2022;3:93–96.
- [23] Unang Achlison, Bambang Suhartono. Analisis hasil ukur sensor load cell untuk penimbang berat beras, paket dan buah berbasis arduino. *E-Bisnis : Jurnal Ilmiah Ekonomi Dan Bisnis*. 2020;13:96–101.
- [24] Sani, R.A., Maha, A.I. Konstruksi timbangan digital menggunakan load cell berbasis arduino uno dengan tampilan lcd (Liquid crystal display). *EINSTEIN E-JOURNAL*. 2018;5.
- [25] Yunus Tjandi. Prototype alat kendali listrik berbasis relay arduino. *Information Technology Education Journal*. 2022;1:37–41.
- [26] Delviandri, R., Irawan, D. Development of light on / off controller simple using ldr sensor-based relay and arduino uno of physics learning electromagnetic material. *Journal of Science : Learning Process and Instructional Research (JoSLEPI)*. 2023;1:1–7.
- [27] Tjandi, Y., Kasim, S. Electric control equipment based on arduino relay. *J Phys Conf Ser*. 2019;1244:012028.
- [28] Soon, C.C., Ghazali, R., Jaafar, H.I., Hussien, S.Y.S. PID controller tuning optimization using gradient descent technique for an electro-hydraulic servo system. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. 2015;77:33–9.
- [29] Dehghani, A., Khodadadi, H. Self-tuning PID controller design using fuzzy logic for a single-link flexible joint robot manipulator. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. 2016;78:115–20.
- [30] Grimholt, C., Skogestad, S. Optimal PI and PID control of first-order plus delay processes and evaluation of the original and improved SIMC rules. *J Process Control*. 2018;70:36–46.
- [31] Ellis, G. Four types of controllers. *Control System Design Guide*, Elsevier; 2012, p. 97–119.
- [32] Efheij, H., Albagul, A. Comparison of PID and artificial neural network controller in on line of real time industrial temperature process control system. 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA, IEEE; 2021, p. 110–5.
- [33] Kiloes, A.M., Joyce, D., Abdul Aziz, A. Exploring the challenges and opportunities of mango export from indonesia: insights from stakeholder interviews. *The Qualitative Report*. 2024;29:811–30.
- [34] Evalina, N., Pasaribu, F.I., H, A.A., Sary, A. Penggunaan arduino uno untuk mengatur temperatur pada oven. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*. 2022;4:122–8.
- [35] Dewi, S.W., Pauzi, G.A., Junaidi, J., Suciya, S.W. Furnace control system using the TCN4S temperature controller. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*. 2022;3.
- [36] Apriaskar, E., Fahmizal, F., Salim, N.A., Prastiyanto, D. Performance evaluation of balancing bicopter using P, PI, and PID controller. *Jurnal Teknik Elektro*. 2019;11:44–9.
- [37] Lasri, R., Rojas, I., Pomares, H., Valenzuela, O. A new adaptive and self organizing fuzzy policy to enhance the real time control performance. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2014;7:582.

- [38] Ray, S.K., Paul, D. Performance comparison of electronic printwheel system by PI and PID controller using genetic algorithms. *International Journal of Computer Science & Emerging Technologies*. 2010;1:2044–6004.
- [39] Palaniyappan, T.K., Yadav, V., Ruchira, Tayal, V.K., Choudekar, P. PID control design for a temperature control system. 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), IEEE; 2018, p. 632–7.
- [40] Akbar, A.H., Ma'arif, A., Rekik, C., Abougarair, A.J., Mekonnen, A.M. Implementing PID control on arduino uno for air temperature optimization. *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*. 2024;6:1–13.
- [41] Pradana, M.R., Aristoni, D., Triyanto, R.H., Yuliatin, U., Budi, S.H. Cascade flow rate-temperature control system design based on PID controller using direct synthesis tuning method. *Jurnal Polimesin*. 2024;22:654.
- [42] Borase, R.P., Maghade, D.K., Sondkar, S.Y., Pawar, S.N. A review of PID control, tuning methods and applications. *Int J Dyn Control*. 2021;9:818–27.
- [43] Mahmood, Q.A., Nawaf, A.T., Esmael, M.N., Abdulateef, L.T., Dahham, O.S. PID temperature control of demineralized water tank. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018;454:012031.
- [44] Melinda, Melinda, Ari Rahmat Putra Ibina, R.K., Alfatirta Mufti, Rizal Syahyadi, I.H. Implementation of PID controller on Hohenheim tunnel dryer using Ziegler-Nichols approach method. *Polimesin*. 2023;20:121–7.
- [45] Muradi, R., Kartika, K. Fish dryer with temperature control using the fuzzy logic method. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*. 2023;3:1–8.
- [46] Santoso, D., Waris, A. Uji kinerja sistem kontrol untuk pengendalian suhu pada alat pengering biji-bijian berbasis fuzzy logic. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian Dan Biosistem*. 2020;8:33–9.