

Optimasi Kendali Suhu pada Sistem Nirkabel Penetasan Telur Berbasis PI dan PI Anti Windup

Cecep Yusuf ¹, Dede Irawan Saputra ²

^{1,2}Universitas Jenderal Achmad Yani

Jl. Terusan Jenderal Sudirman, PO BOX 148 Kota Cimahi Indonesia
cecepyusuf97@gmail.com¹, dedeirawan.saputra@lecture.unjani.ac.id²

Abstract

The majority of commercially available chicken egg incubators use incandescent lamps as a heat source with temperature regulation using the on-off control and uncontrolled temperature fluctuations can occur. To overcome this, a control method based on Proportional Integral (PI), and anti-windup control was designed to produce optimal temperature control in the chicken egg incubator prototype and a transfer function model of the AC light dimmer module are used in the simulation for process analysis and comparison.

The designed control algorithm is then implemented in a simulator in the form of a chicken egg incubator prototype composed of 2 nodes connected wirelessly. The sensor nodes will process input data using the BME280 temperature sensor and the actuator nodes will process the data using the PI control algorithm, and PI - anti windup control in determining the Pulse Width Modulation (PWM) output used by the AC light dimmer module to regulate light intensity of an incandescent lamp. The transfer function modelling uses the System Identification Toolbox (SIT) and the simulation design uses the Simulink Matrix Laboratory (MATLAB) software.

Based on the results of the implementation and testing of the PI control and the PI - anti windup control, the system produces transient response characteristics that can determine a more optimal temperature control method. PI - anti windup control has transient response characteristics with a time constant value of 144,5 seconds, rise time of 226,5seconds, peak time of 322,5 seconds, settling time of 280 seconds, and delay time of 98 seconds, these results indicate that the PI - anti windup control algorithm is better than PI control.

Keywords: Temperature control optimization, PI - anti windup, transient response, transfer function.

Abstrak

Alat penetas telur ayam yang terdapat di pasaran secara komersil mayoritas menggunakan lampu pijar sebagai sumber panas dengan pengaturan suhu menggunakan kendali *on - off* dan dapat terjadi fluktuasi suhu yang tidak terkendali. Untuk mengatasi hal tersebut maka dirancang metode kendali *Proportional Integral* (PI) dan *anti windup* yang di implementasikan untuk menghasilkan kendali suhu yang optimal pada prototipe simulator penetas telur ayam serta dirancang model *transfer function* dari modul *AC light dimmer* yang digunakan dalam simulasi untuk proses analisis dan perbandingan.

Algoritma kendali yang dirancang kemudian diimplementasikan pada sebuah simulator berupa prototipe simulator penetas telur ayam tersusun dari 2 buah *node* yang terhubung secara nirkabel. *Node* sensor akan mengolah data input menggunakan sensor suhu BME280 dan *node* aktuator akan mengolah data menggunakan algoritma kendali PI dan Kendali PI - *anti windup* dalam menentukan output *Pulse Width Modulation* (PWM) yang digunakan oleh modul *AC light dimmer* untuk mengatur intensitas cahaya pada lampu pijar. Perancangan pemodelan *transfer function* menggunakan *System Identification Toolbox* (SIT) dan perancangan simulasi menggunakan *software Simulink Matrix Laboratory* (MATLAB).

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian respon kendali PI dan kendali PI - *anti windup*, sistem yang dibangun menghasilkan karakteristik respon *transient* yang dapat menentukan metode kendali suhu yang lebih optimal. Kendali PI - *anti windup* memiliki respon *transient* yang cepat dengan nilai *time constant* sebesar 144,5 detik, *rise time* sebesar 226,5 detik, *peak time* sebesar 322,5 detik, *settling time* sebesar 280 detik dan *delay time* sebesar 98 detik, hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma kendali PI - *anti windup* lebih baik dari kendali PI.

Kata kunci: Optimasi kendali suhu, PI - *anti windup*, respon *transient*, *transfer function*.

1. Pendahuluan

Dalam bidang peternakan khususnya pada peternakan ayam, masalah yang dihadapi oleh para peternak adalah proses penetasan telur ayam dalam jumlah banyak dan dalam waktu yang bersamaan. Kemampuan induk ayam dalam mengerami telurnya sangat terbatas, yaitu maksimal 10 butir telur setiap induk ayam [1]. Hal tersebut menjadi perhatian yang serius karena permintaan daging ayam di pasar sangat tinggi. Untuk menggantikan tugas induk ayam dalam menetas telur maka dibuat alat penetas telur ayam. Alat

penetas telur ayam dilengkapi dengan peralatan pendukung untuk mengatur kondisi lingkungan yang sesuai agar embrio dalam telur berkembang dengan optimal, sehingga telur dapat menetas [2].

Pada prinsipnya pada alat penetas telur ayam yang ada saat ini mayoritas perusahaan penyedia alat penetas telur menggunakan lampu pijar untuk menghasilkan suhu panas yang dimanfaatkan untuk proses penetasan telur [3]. Pengaturan suhunya hanya menggunakan kendali *on-off* pada lampu pijar dan tidak menutup kemungkinan terjadi fluktuasi suhu yang tidak terkendali pada alat penetas telur ayam [4]. Maka dibutuhkan alternatif lain dalam mengendalikan suhu yang sesuai dan lebih optimal yaitu mampu menjaga kestabilan suhu sesuai dengan nilai *setpoint*.

Untuk mengatasi hal tersebut, kendali suhu pada alat penetas telur ayam dapat dibuat beberapa metode kendali suhu otomatis. Dapat pula digunakan sensor pendeteksi suhu untuk mendapatkan nilai suhu aktual pada ruang tetas yang akan diproses menggunakan beberapa algoritma pengendali [5]. Algoritma pengendali tersebut diantaranya pengendali PI dan pengendali PI - *anti windup* yang diimplementasikan pada mikrokontroler dalam menetapkan nilai output suhu yang dapat menyesuaikan dengan nilai *setpoint* suhu yang ditentukan [6][7]. Dengan penggunaan pengendali *Proportional* (P) dan *Integral* (I) yang bertujuan untuk meningkatkan respon *transient* pada sistem kendali, serta metode anti-windup mampu mengatasi akumulasi kendali Integral dalam algoritma kendali PI [8][9][10].

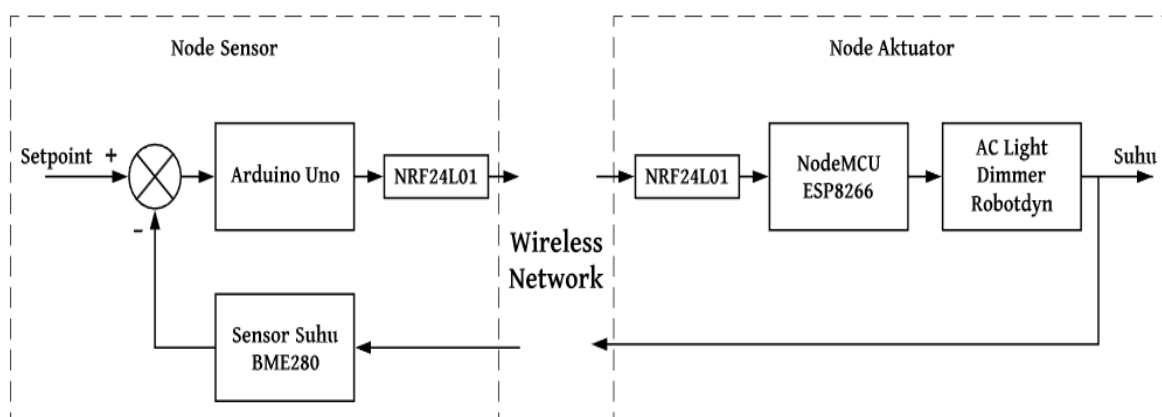
Pada penelitian dirancang algoritma kendali suhu otomatis berbasis kendali PI dan kendali PI *Anti Windup* yang diimplementasikan pada sebuah prototipe simulator penetas telur ayam sederhana. Serta dilakukan simulasi dari ketiga algoritma kendali tersebut kemudian proses analisis dan perbandingan respon kendali suhu hasil implementasi dan simulasi dalam menentukan algoritma kendali yang lebih optimal dan cocok digunakan pada prototipe simulator penetas telur ayam. Prototipe simulator penetas telur ayam dirancang menggunakan 2 buah node. *Node* sensor akan mendeteksi suhu secara kontinyu dan mengirim data tersebut melalui gelombang radio [11]. Kemudian *node* aktuator akan menerima data dan memprosesnya untuk menghasilkan output berupa nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) yang berubah-ubah dan dimanfaatkan untuk mengatur intensitas cahaya pada lampu pijar sehingga suhu pada alat penetas telur akan terjaga kestabilannya dan sesuai dengan suhu yang ditentukan.

2. Metode

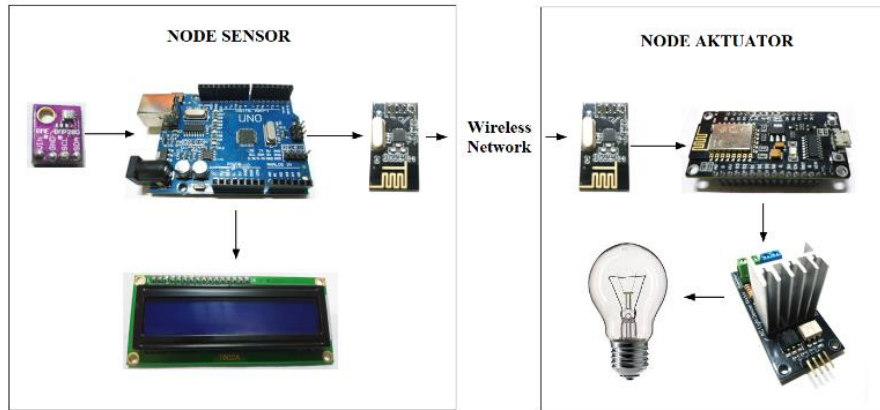
Perancangan kendali suhu pada prototipe simulator penetas telur ayam terbagi menjadi 3 yaitu perancangan prototipe simulator penetas telur ayam, perancangan algoritma kendali PI dan kendali PI - *anti windup* dan perancangan simulasi menggunakan simulink MATLAB.

2.1. Prototipe simulator penetas telur ayam

Dirancang menggunakan 2 buah *node* yang terhubung melalui jaringan nirkabel dapat dilihat pada Gambar 1, yaitu *node* sensor dan *node* aktuator yang diprogram dengan fungsi berbeda. *Node* sensor digunakan untuk mendeteksi nilai suhu sebagai data input sedangkan *node* aktuator digunakan untuk menghasilkan output berdasarkan data yang dikirim dari *node* sensor.

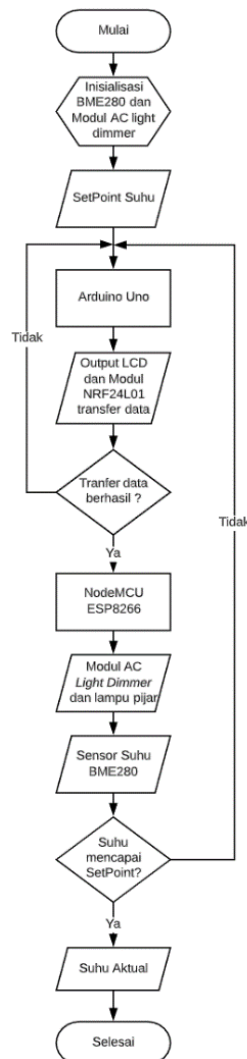


Gambar 1. Diagram blok prototipe simulator penetas telur ayam



Gambar 2. Diagram skematik prototipe simulator penetas telur ayam

Pada Gambar 2, *node* sensor ditugaskan khusus untuk mengolah data input oleh Arduino Uno dengan mendeteksi suhu aktual pada prototipe simulator penetas telur ayam menggunakan sensor BME280, menampilkan informasi pada LCD dan mengirimkan data input berupa suhu aktual dan suhu *setpoint* menuju *node* aktuator menggunakan NRF24L01 melalui gelombang radio. *Node* aktuator akan menerima dan mengolah data input dari *node* sensor menggunakan algoritma kendali yang diprogram pada NodeMCU ESP8266 untuk mendapatkan output berupa nilai PWM yang akan digunakan dalam mengatur intensitas cahaya lampu pijar oleh modul AC *light dimmer*.



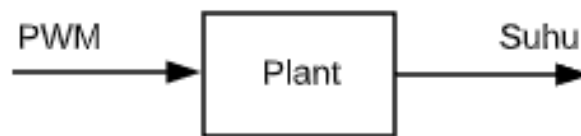
Gambar 3 Flowchart prototipe simulator penetas telur ayam

Berdasarkan Gambar 3, Pada NodeMCU ESP8266 akan dibuat 2 algoritma kendali yang berbeda yaitu kendali PI dan kendali PI - *anti windup* untuk dibandingkan kebutuhan kendali yang lebih cocok dan lebih optimal digunakan pada prototipe simulator penetas telur ayam diantara ketiga algoritma kendali tersebut.

2.2. Perancangan algoritma kendali suhu pada prototipe simulator penetas telur ayam

2.2.1. Kendali *Open loop*

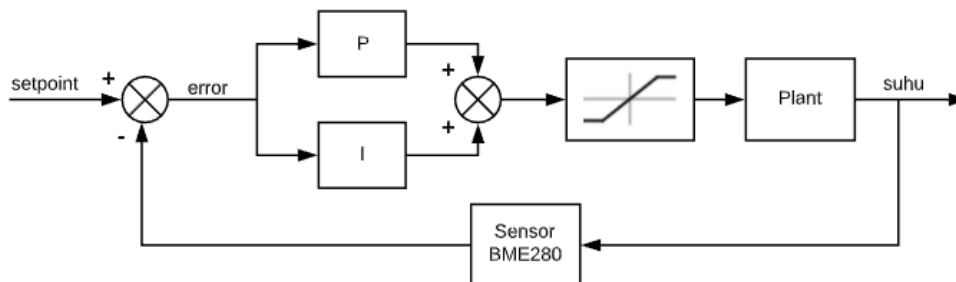
Sistem kendali *open loop* dirancang untuk mengetahui respon dari kemampuan aktuator yaitu modul AC *light dimmer* dalam meningkatkan suhu pada *plant*. Data output kendali *open loop* akan melalui proses *sampling*, data yang di-*sampling* berupa suhu dan PWM dengan *time sampling* sebesar 0.5 detik. Data hasil *sampling* kendali *open loop* akan diolah untuk pemodelan aktuator yang akan digunakan dalam proses simulasi kendali FLC - PI, kendali PI dan kendali PI - *anti windup*.



Gambar 4. Diagram blok kendali *open loop*

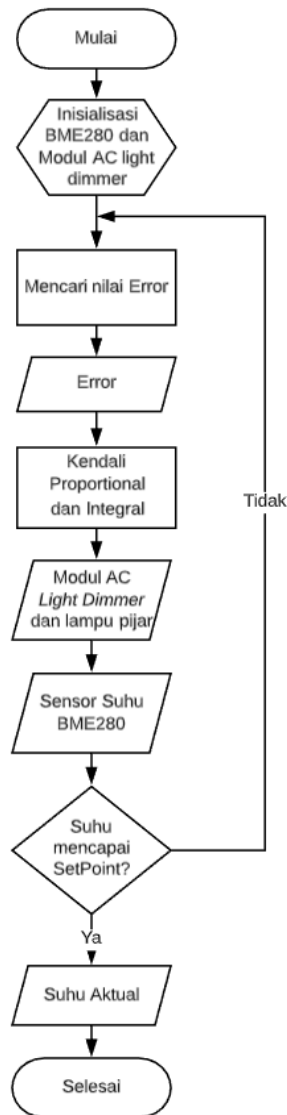
2.2.2. Kendali PI

Sistem kendali suhu yang digunakan pada prototipe simulator penetas telur menggunakan kendali *proportional* dan *integral*. Input berupa error akan dikalkulasikan dengan nilai penguatan masing-masing kendali dan output dari kedua kendali P dan I akan dikonversi menjadi sinyal PWM yang akan digunakan oleh *plant*.



Gambar 5. Diagram blok kendali PI

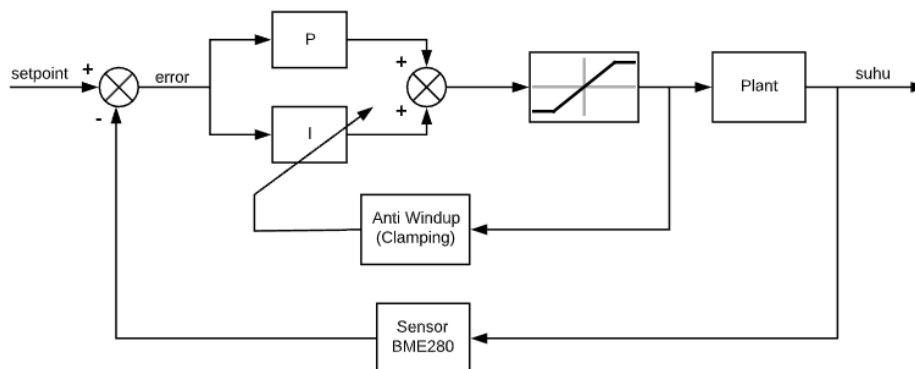
Dapat dilihat pada Gambar 6, inialisasi setpoint dilakukan untuk mencari nilai error hasil selisih antara suhu setpoint dikurangi suhu hasil deteksi. Input error akan diolah menggunakan algoritma kendali PI dalam menghasilkan output berupa nilai PWM yang akan digunakan oleh modul AC *light dimmer* untuk mengatur intensitas cahaya lampu pijar. Cahaya yang dihasilkan lampu pijar akan meningkatkan suhu udara hingga mencapai suhu setpoint.



Gambar 6. Flowchart kendali PI

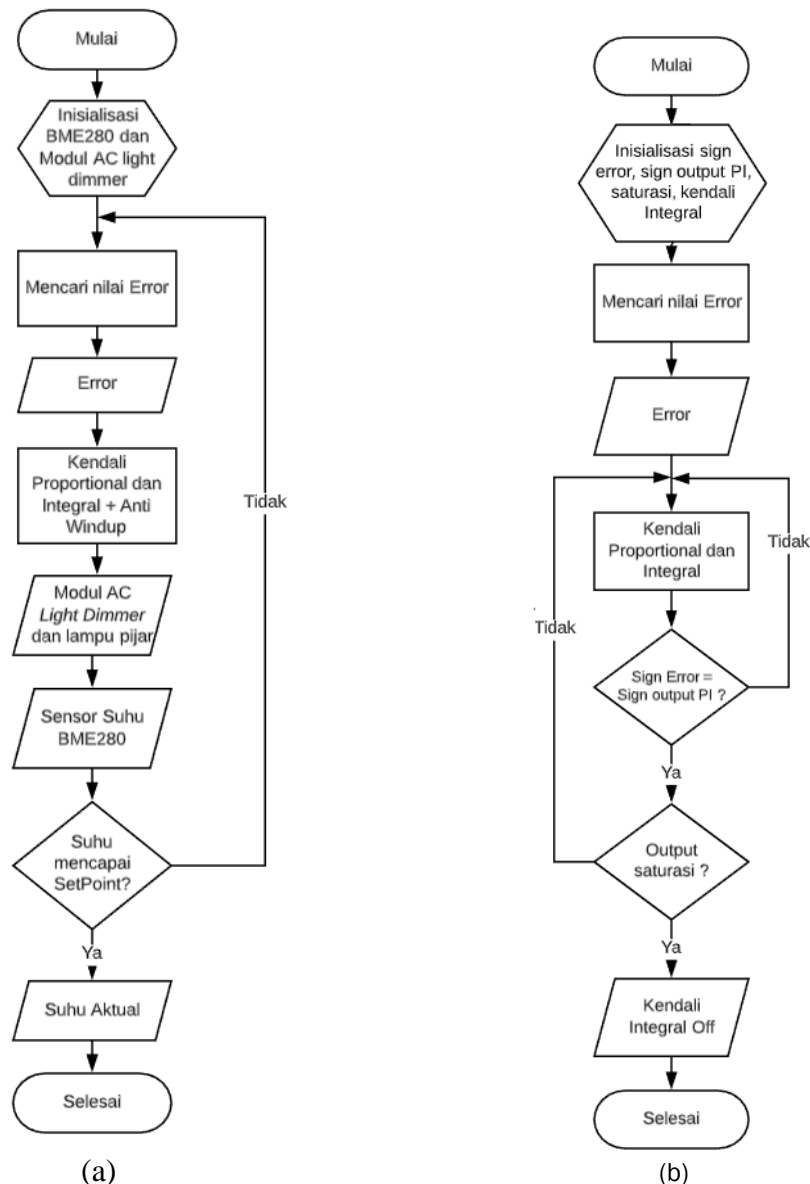
2.2.3. Kendali PI – Anti Windup.

Sistem kendali suhu yang digunakan pada prototipe simulator penetas telur menggunakan kendali *proportional* dan *integral* untuk menghasilkan output berupa nilai PWM. Hasil output pada sistem kendali PI berupa nilai PWM terbatas pada nilai 0 – 255 dan dapat terjadi saturasi, dengan tambahan *anti windup* sistem kendali PI dapat mengatasi kondisi saturasi nilai PWM pada modul AC *light dimmer*. Metode yang digunakan pada kendali PI – *anti windup* menggunakan metode *clamping* yaitu dengan kontrol *on/off* pada kendali *integral* dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram blok kendali PI – anti windup

Proses kendali suhu menggunakan sistem kendali PI – anti windup dapat dijelaskan berdasarkan Gambar 8 (a), input error akan diproses menggunakan kendali PI – anti windup untuk menghasilkan output berupa nilai PWM. Sinyal PWM akan dimanfaatkan untuk mengatur intensitas cahaya pada lampu pijar oleh modul AC *light dimmer*, kemudian cahaya lampu pijar akan meningkatkan suhu udara pada prototipe simulator penetas telur hingga mencapai *setpoint*. Berdasarkan Gambar 8 (b), kendali *integral* akan dikontrol *on / off* tergantung status *clamp* atau tidak *clamp* pada kendali *anti windup*. Proses *clamping* ditentukan berdasarkan 2 kondisi yaitu output saturasi dan *sign error* sama dengan *sign output kendali PI*.



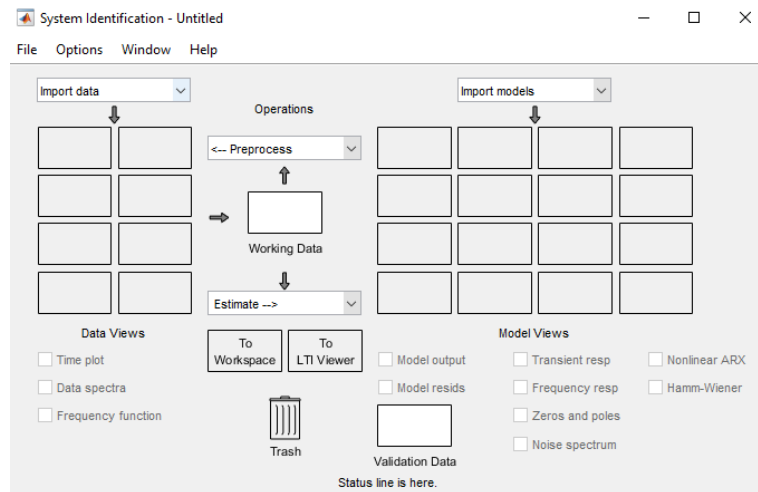
Gambar 8. Flowchart (a) kendali PI – anti windup dan (b) anti – windup metode clamping

2.3. Perancangan Software

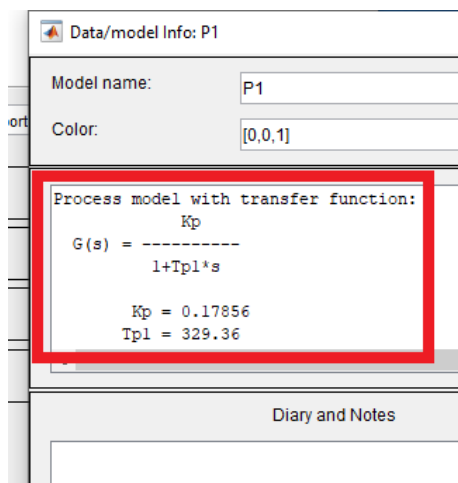
Perancangan software dilakukan menggunakan *system identification toolbox* (SIT) yang digunakan untuk membuat model matematis berupa *transfer function* dari prototipe simulator penetas telur yang dirancang dan *simulink* digunakan untuk simulasi sistem kendali dengan algoritma FLC – PI dan PI – anti windup.

2.3.1. System Identification Toolbox (SIT)

SIT digunakan untuk menentukan model matematis berupa *transfer function* dari aktuator modul AC *light dimmer* yang terdapat pada prototipe simulator penetas telur ayam. Persamaan *transfer function* akan digunakan untuk simulasi sistem kendali suhu dengan algoritma kendali FLC – PI, kendali PI dan kendali PI – anti windup pada *simulink*.



Gambar 9. Tampilan awal system identification toolbox

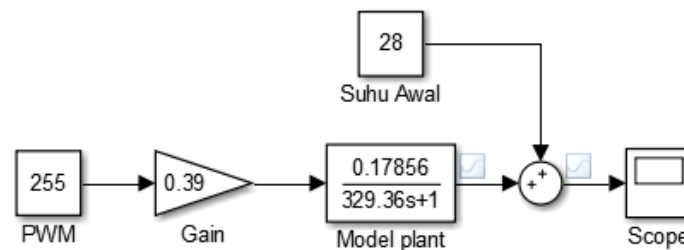


Gambar 10. Parameter transfer function hasil pemodelan

2.3.2. Simulink

Simulasi pada software simulink MATLAB dilakukan untuk menghasilkan data yang akan digunakan sebagai pembandingan dengan implementasi prototipe simulator penetas telur ayam yang dirancang.

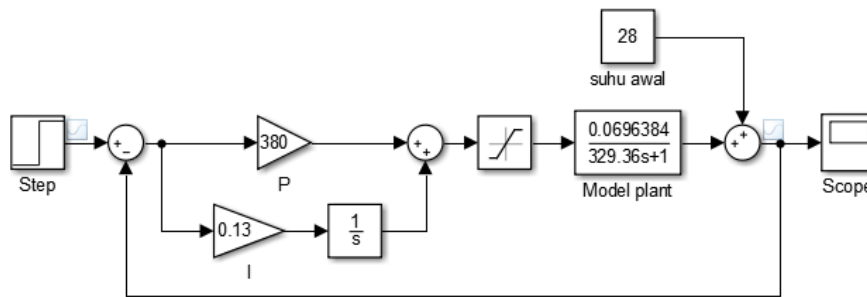
- a. Simulasi Kendali *Open Loop* Prototipe simulator Penetas Telur Ayam, simulasi kendali *open loop* dilakukan untuk memvalidasi kesesuaian respon sistem dari persamaan *transfer function* hasil pemodelan dengan aktuator modul AC *light dimmer* sebenarnya.



Gambar 11. Simulasi kendali open loop

Pada Gambar 11, input pada simulasi kendali *open loop* berupa yaitu berupa sinyal PWM, persamaan *transfer function* ditambahkan blok *gain* sebesar 0.39 untuk proses validasi kesesuaian hasil simulasi dengan implementasi dan nilai *constant* sebagai suhu awal sebesar 28°C untuk mendapatkan batasan suhu yang sesuai dengan implementasi prototipe simulator penetas telur ayam.

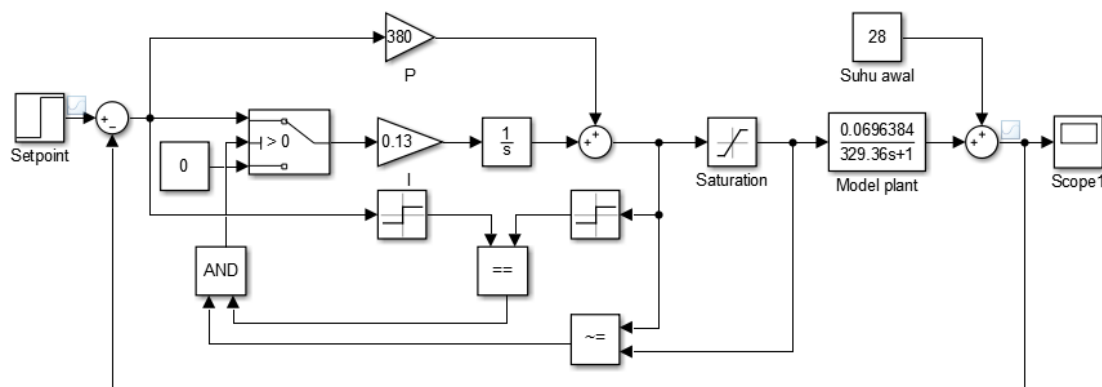
- b. Simulasi Kendali PI, simulasi kendali PI dirancang untuk mengetahui respon sistem hasil dari output kendali PI biasa tanpa menambahkan *anti windup*.



Gambar 12. Simulasi kendali PI

Berdasarkan Gambar 12, *step input* berfungsi sebagai suhu *setpoint*, *sum* pertama digunakan untuk menentukan nilai *error* hasil selisih dari suhu *setpoint* dengan suhu awal yang dihasilkan dari blok *constant*, nilai *error* akan diproses dengan kendali PI dengan penguatan *proportional* sebesar 380 dan penguatan *integral* sebesar 0.13. Output kendali P dan I akan dijumlahkan dan dikonversi menjadi sinyal PWM dengan range 0 - 255 lalu diteruskan menuju blok *transfer function* dan menghasilkan output kendali suhu.

- c. Simulasi Kendali PI – *Anti Windup*, simulasi kendali PI – *anti windup* dirancang mampu mengatasi kondisi saturasi pada aktuator. Menggunakan model *transfer function* yang sama dengan algoritma kendali suhu yang lain namun komponen pendukung pada algoritma kendali suhu PI – *anti windup* lebih banyak karena akan digunakan untuk membuat *anti windup* pada kendali PI.



Gambar 13. Simulasi kendali PI – *anti windup*

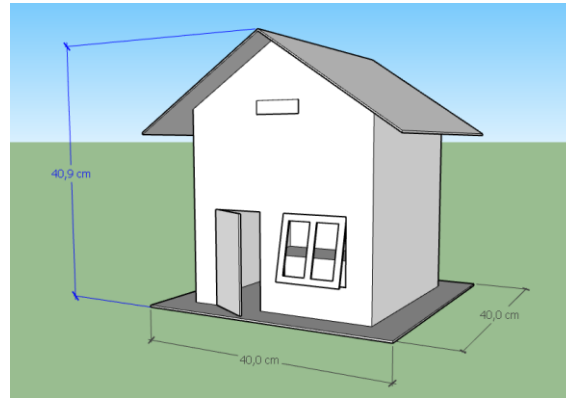
Berdasarkan Gambar 13, *step input* berfungsi sebagai suhu *setpoint*, *sum* pertama digunakan untuk menentukan nilai *error* hasil selisih dari suhu *setpoint* dengan suhu awal yang dihasilkan dari blok *constant*, nilai *error* akan diproses dengan kendali PI dengan penguatan *proportional* sebesar 380 dan penguatan *integral* sebesar 0.13. Blok switch digunakan untuk proses *clamping* pada kendali PI – *anti windup*. Proses *clamping* ditentukan berdasarkan 2 kondisi yaitu output saturasi dan *sign error* sama dengan *sign* output kendali PI.

2.4. Perancangan *Hardware*

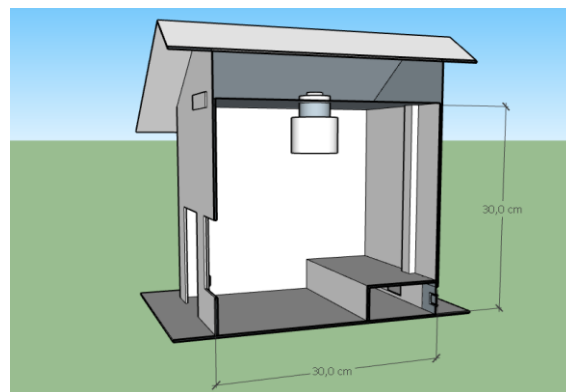
Perancangan *hardware* terdiri dari perancangan sebuah *plant* berupa prototipe simulator penetas telur ayam, rangkaian pengendali yang terdiri dari *node* sensor dan *node* aktuator dan mendesain *layout* PCB untuk *shield* Arduino Uno dan NodeMCU ESP8266 yang berguna untuk mengurangi penggunaan kabel *jumper* yang banyak.

2.4.1. Desain Prototipe simulator Penetas Telur Ayam

Untuk membuat sebuah prototipe simulator penetas telur ayam, digunakan material *impraboard* berbahan dasar plastik yang dibuat pola seperti Gambar 14 berdimensi 40 cm x 40 cm x 40,9 cm dengan ruangan tertutup seperti Gambar 15, berukuran 30 cm x 30 cm x 30 cm.

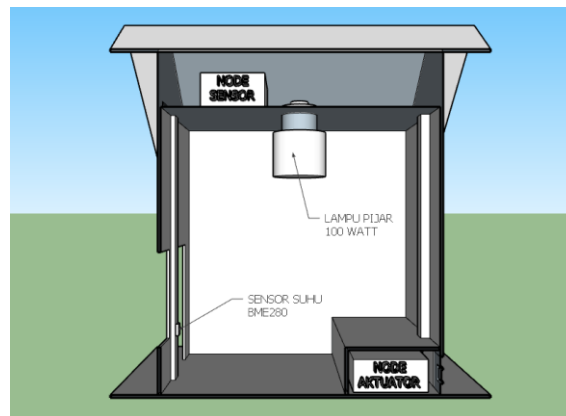


Gambar 14. Desain prototipe simulator penetasan telur ayam



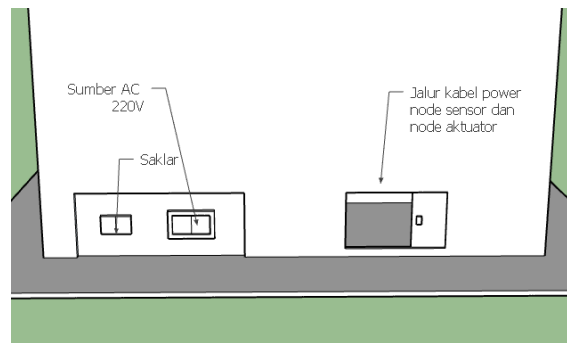
Gambar 15. Desain ruangan tertutup

Skema penempatan rangkaian pengendali dapat dilihat pada Gambar 16, *node* sensor ditempatkan di atas ruang tertutup dengan penempatan sensor BME280 berjarak 5 cm dari dasar prototipe simulator penetas telur ayam sedangkan *node* aktuator ditempatkan dibagian bawah.



Gambar 16. Penempatan komponen pada *plant*

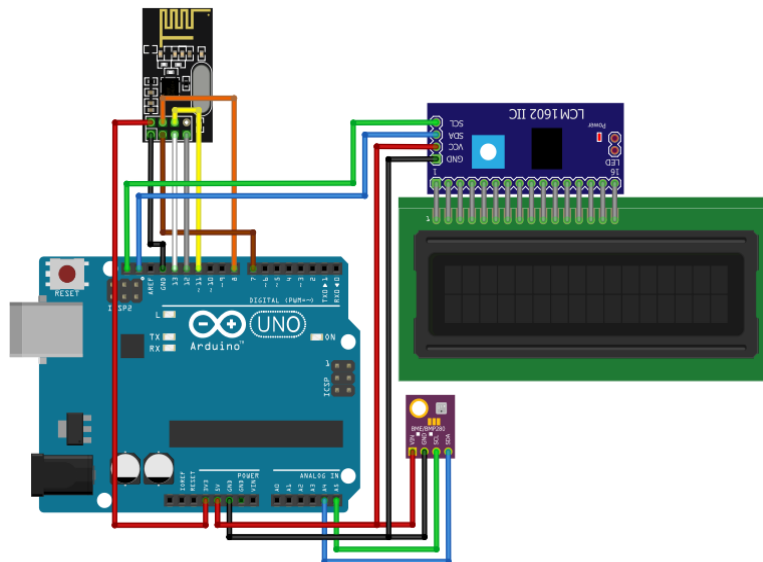
Pada prototipe simulator penetas telur ayam dibuat ruang kecil berukuran 30cm x 10 cm x 5 cm yang dapat terlihat di pojok kanan bawah pada Gambar 16, selain untuk penempatan *node* aktuator, digunakan juga sebagai jalur *power supply* yang terdiri dari sumber AC 220V yang digunakan modul AC *light dimmer* untuk lampu pijar dan jalur *power* untuk rangkaian kedua *node* dan desain bagian belakang prototipe simulator penetas telur ayam dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Jalur power supply prototipe simulator penetas telur ayam

2.4.2. Diagram Wiring Node Sensor

Rangkaian *node* sensor tersusun dari Arduino Uno, sensor BME280, modul NRF24L01 dan LCD seperti Gambar 18. Sensor BME280 dan LCD dirangkai pada Arduino dengan susunan pin pada Tabel 1 dan Tabel 3. Kedua komponen ini sama-sama menggunakan input tegangan 5VDC dan juga menggunakan komunikasi I2C. Modul NRF24L01 membutuhkan tegangan input 3.3VDC untuk dapat beroperasi dan konfigurasi pin yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2. Rangkaian *node* sensor dibuat layout PCB yang digunakan untuk *shield* Arduino Uno seperti pada Gambar 19.



Gambar 18. Wiring diagram node sensor

Tabel 1. Konfigurasi pin Arduino Uno dengan BME280

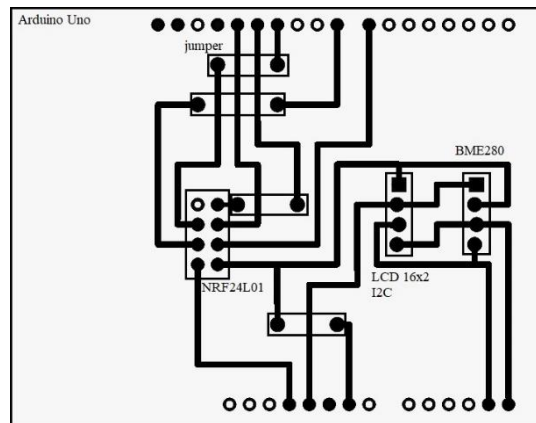
Arduino Uno	BME280
VCC 5V	VCC
GND	GND
A4	SDA
A5	SCL

Tabel 2. Konfigurasi pin Arduino Uno dengan NRF24L01

Arduino Uno	NRF24L01
VCC 3.3V	VCC
GND	GND
7	CE
8	CSN
11	MOSI
12	MISO
13	SCK

Tabel 3. Konfigurasi pin Arduino Uno dengan LCD I2C

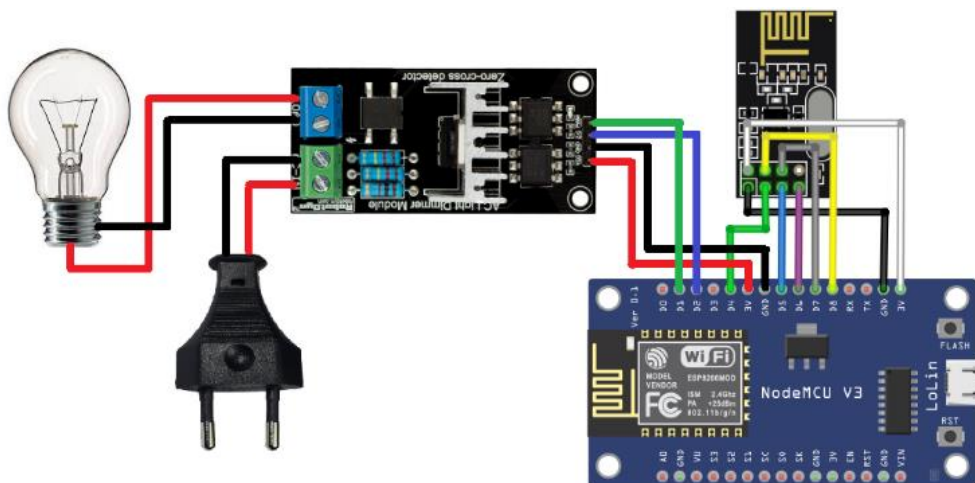
Arduino Uno	LCD I2C
VCC 5V	VCC
GND	GND
SDA	SDA
SCL	SCL



Gambar 19. Layout PCB node sensor shield Arduino Uno

2.4.3. Diagram Wiring Node Aktuator

Rangkaian *node* aktuator terdapat NodeMCU ESP8266, modul NRF24L01, modul AC *light dimmer* dan rangkaian lampu pijar AC. Modul NRF24L01 dan modul AC *light dimmer* dirangkai pada NodeMCU ESP8266 dengan konfigurasi pin pada Tabel 4. dan Tabel 5. Pada modul AC *light dimmer* terdapat 2 terminal keluaran yaitu AC input dan *load* yang dirangkai seperti pada Gambar 20. Rangkaian *node* aktuator dibuat layout PCB yang digunakan untuk *shield* NodeMCU ESP8266 seperti pada Gambar 21.



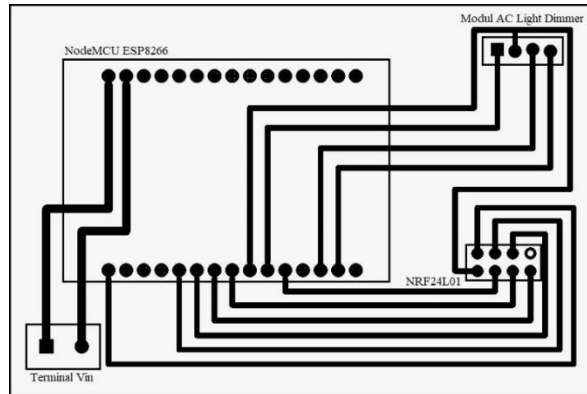
Gambar 20. Wiring diagram node aktuator

Tabel 4. Konfigurasi pin NodeMCU ESP8266 dengan NRF24L01

NodeMCU ESP8266	NRF24L01
VCC 3.3V	VCC
GND	GND
D4	CE
D5	SCK
D6	MISO
D7	MOSI
D8	CSN

Tabel 5. Konfigurasi pin NodeMCU ESP8266 dengan modul AC light dimmer

NodeMCU ESP8266	Modul AC light dimmer
VCC 3.3V	VCC
GND	GND
D1	PWM
D2	ZC



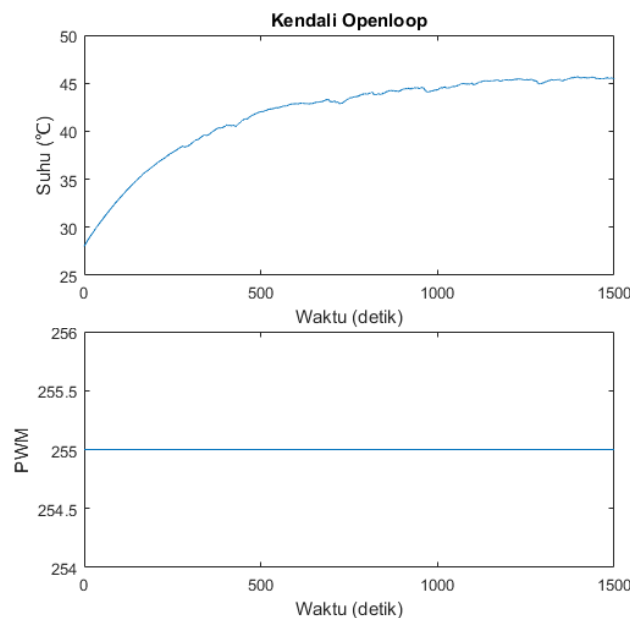
Gambar 21. Layout PCB node aktuator shield NodeMCU ESP8266

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

3.1.1. Pengujian Respon Kendali *Open Loop* Prototipe Simulator Penetas Telur Ayam

Pengujian respon kendali *open loop* pada prototipe simulator penetas telur ayam dilakukan untuk mengetahui respon peningkatan suhu yang dihasilkan oleh lampu pijar dari modul AC light dimmer saat diberi input berupa sinyal PWM.

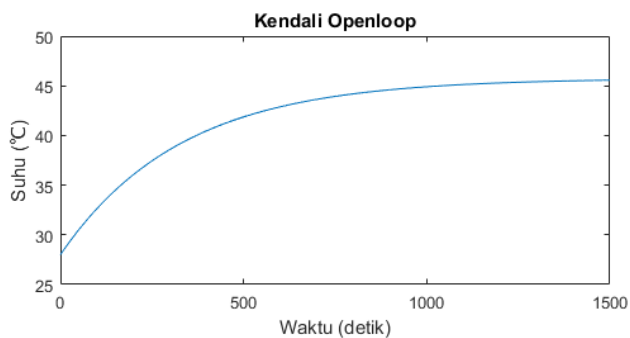


Gambar 22. Grafik respon suhu dan PWM implementasi kendali *open loop*

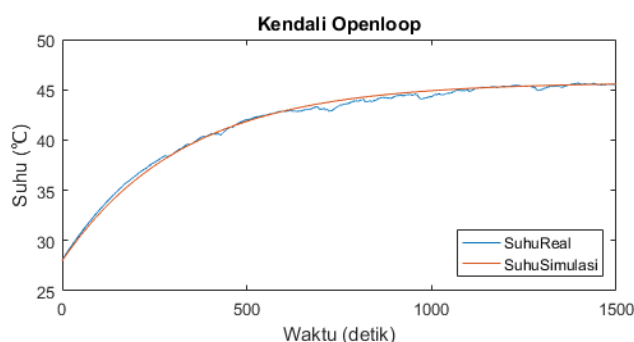
Data hasil *sampling* pengujian respon kendali *open loop* pada prototipe simulator penetas telur ayam yang terdapat pada Gambar 22, diproses menggunakan *system identification toolbox* (SIT) dan menghasilkan model matematis dengan persamaan *transfer function* sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{0.17856}{1 + 329.36s} \quad (1)$$

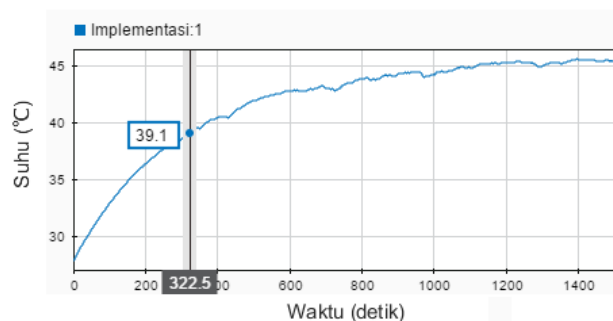
Setelah mendapatkan persamaan *transfer function* dari proses pemodelan dilakukan simulasi kendali *open loop* pada *simulink* MATLAB. Hasil simulasi kendali *open loop* dapat dilihat pada Gambar 23 dan jika dibandingkan respon kendali hasil simulasi dengan impementasi akan terlihat grafik seperti pada Gambar 24.



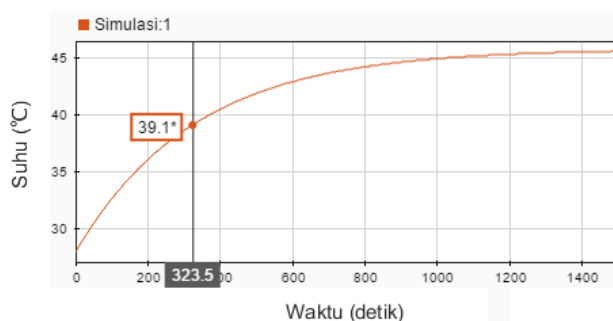
Gambar 23. Grafik respon suhu simulasi kendali *open loop*



Gambar 24. Grafik respon suhu implementasi dan simulasi kendali *open loop*



Gambar 25. *Time constant* implementasi kendali *open loop*



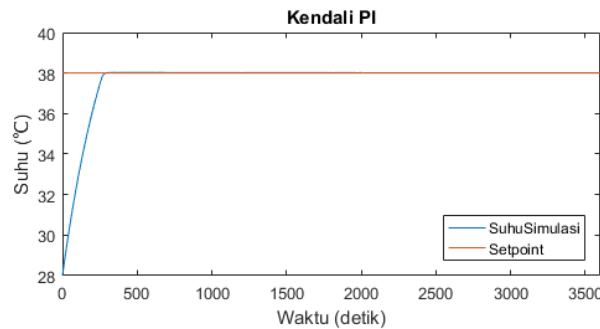
Gambar 26. *Time constant* simulasi kendali *open loop*

Berdasarkan Gambar 22 dan Gambar 23, hasil pengujian diperoleh bahwa respon kendali *open loop* prototipe simulator penetas telur ayam dapat mencapai suhu 45,6 °C baik pada implementasi atau simulasi ketika diberi input sinyal PWM sebesar 255. Pada Gambar 25 dan Gambar 26 terlihat *time constant* sebesar 322,5 detik pada implementasi dan 323,5 detik pada simulasi. Untuk nilai *time constant* dapat diperoleh dari waktu respon saat output yang dihasilkan mencapai 63,2% dari nilai maksimum dengan nilai 39,12 °C.

Time constant yang dihasilkan tidak memiliki perbedaan secara signifikan begitu juga dengan grafik yang dapat dilihat pada Gambar 24, output suhu pada kendali *open loop* baik implementasi atau simulasi terlihat bentuk respon yang tidak jauh berbeda. Dengan hasil tersebut, maka dapat dikatakan *model plant* yang digunakan dianggap dapat menjadi representasi dari modul AC *light dimmer* sebenarnya.

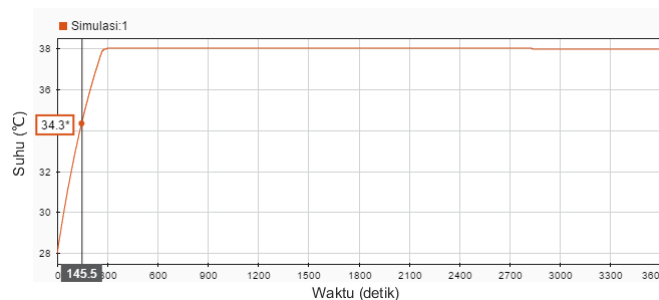
3.1.2. Pengujian Respon Kendali PI

Pada pengujian respon kendali PI dilakukan dengan membandingkan data hasil pengujian simulasi dengan data hasil pengujian implementasi. Pengujian simulasi respon kendali PI dan menghasilkan respon sistem seperti pada Gambar 27 berikut.

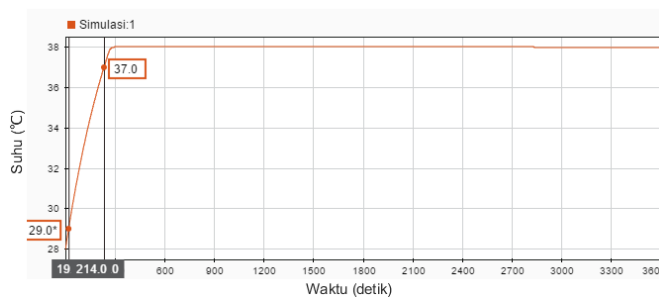


Gambar 27. Grafik respon suhu simulasi kendali PI

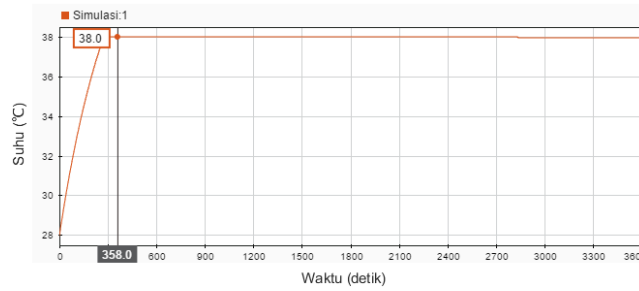
Respon *transient* simulasi kendali kendali PI yang terdapat pada Gambar 27, merupakan tipe *over damped response* dengan output suhu mencapai 38,02°C terdapat *overshoot* sebesar 0,2% dan karakteristik respon *transient* yang dapat diukur berdasarkan grafik output suhu antara lain; *time constant*, *rise time*, *peak time*, *settling time* dan *delay time*.



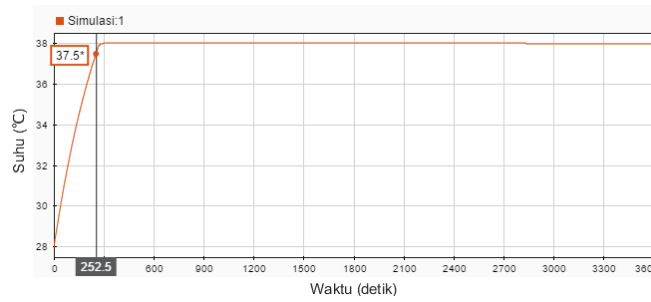
Gambar 28. Time constant (Ct) simulasi kendali PI



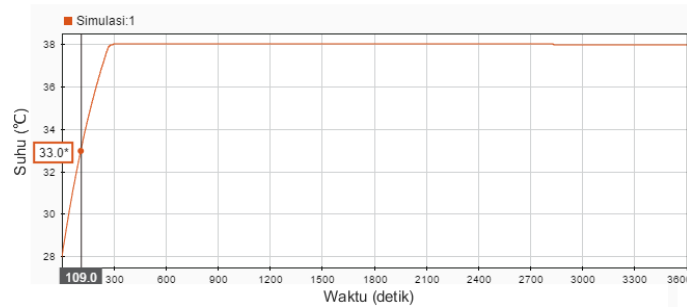
Gambar 29. Rise time simulasi kendali PI



Gambar 30. *Peak time* simulasi kendali PI



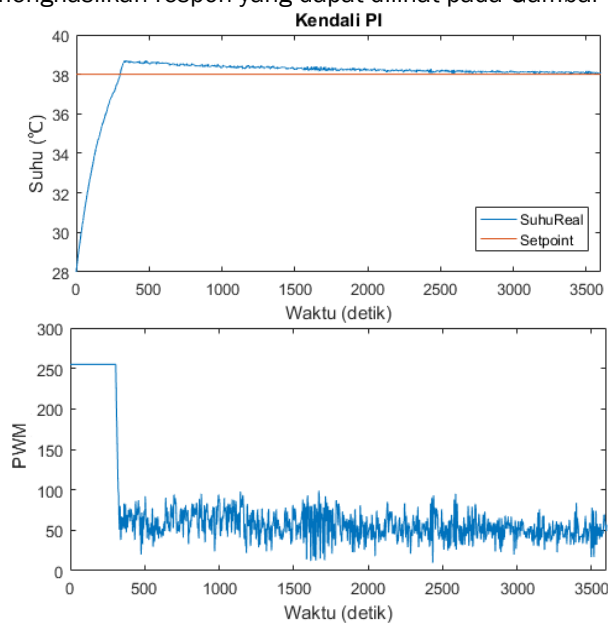
Gambar 31. *Settling time* simulasi kendali PI



Gambar 32. *Delay time* simulasi kendali PI

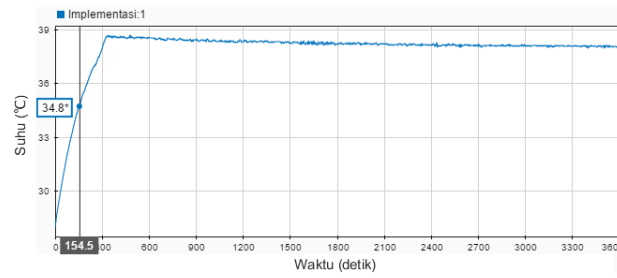
Berdasarkan Gambar 28 sampai dengan Gambar 32 karakteristik respon *transient* pada simulasi kendali PI memiliki nilai *time constant* sebesar 145,5 detik, *rise time* (10% - 90%) sebesar 214 detik, *peak time* sebesar 358 detik, *settling time* (5%) sebesar 252,5 detik dan *delay time* sebesar 109 detik.

Kemudian dilakukan pengujian respon kendali PI pada implementasi prototipe simulator penetas telur ayam menghasilkan respon yang dapat dilihat pada Gambar 33 berikut.

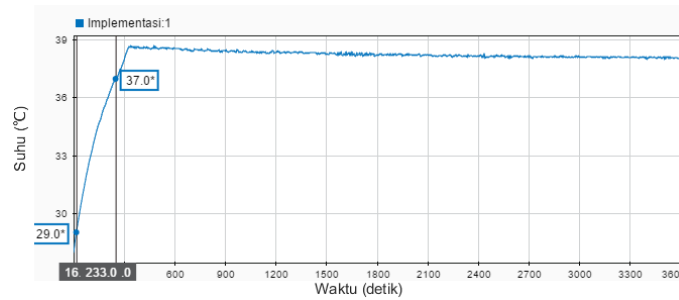


Gambar 33. Grafik respon suhu dan PWM implemetasi kendali PI

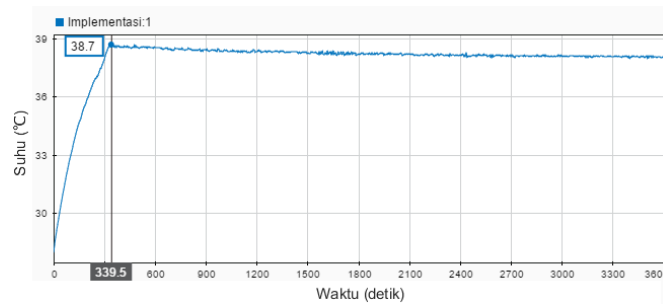
Dilihat dari bentuk respon *transient* pada Gambar 33, output suhu pada implementasi kendali PI merupakan tipe *over damped response* karena output suhu melewati *setpoint* yang ditentukan yaitu mencapai maksimal 38,71 °C sehingga terjadi *overshoot* sebesar 7,1% dengan karakteristik respon *transient* sebagai berikut.



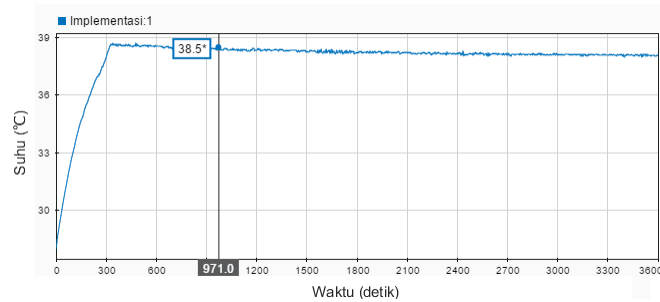
Gambar 34. *Time constant* implementasi kendali PI



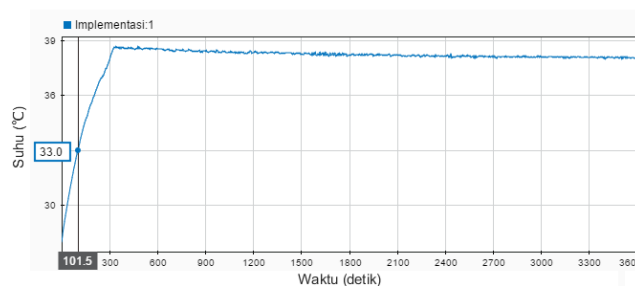
Gambar 35. *Rise time* implementasi kendali PI



Gambar 36. *Peak time* implementasi kendali PI

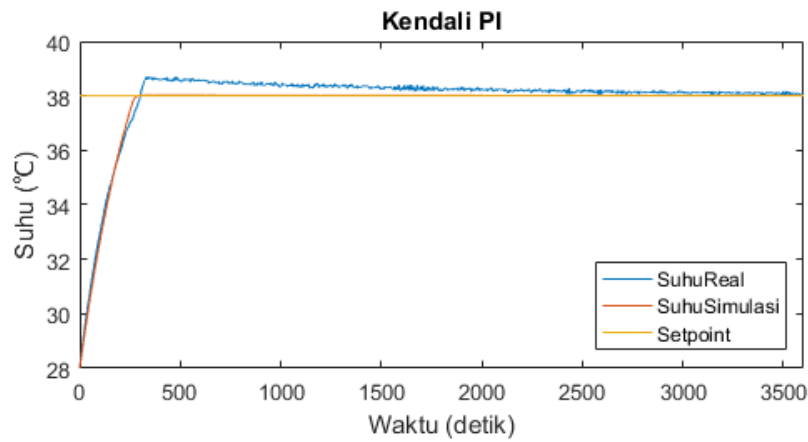


Gambar 37. *Settling time* implementasi kendali PI



Gambar 38. *Delay time* implementasi kendali PI

Berdasarkan Gambar 34 sampai dengan Gambar 38 karakteristik respon *transient* pada implementasi kendali PI memiliki nilai *time constant* sebesar 154,5 detik, *rise time* (10% - 90%) sebesar 233 detik, *peak time* sebesar 339,5 detik, *settling time* (5%) sebesar 971 detik dan *delay time* sebesar 101,5 detik. Dan jika dibandingkan respon kendali pada simulasi dengan implementasi kendali PI akan terlihat seperti pada Gambar 39 berikut.



Gambar 39. Grafik respon suhu simulasi dan implementasi kendali PI

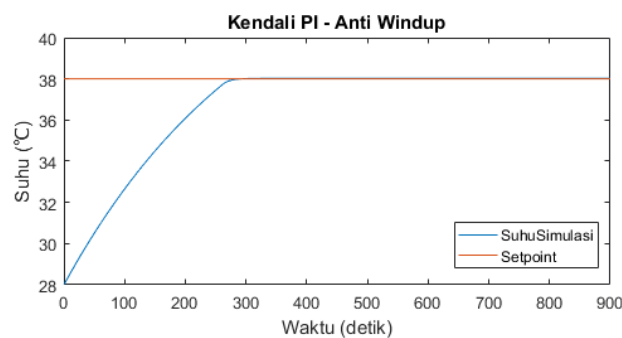
Hasil perbandingan karakteristik respon *transient* pada kendali PI simulasi dan implementasi dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Karakteristik respon *transient* kendali PI

	<i>Time constant</i>	<i>Rise time</i>	<i>Peak time</i>	<i>Settling time</i>	<i>Delay time</i>
Simulasi	145,5 detik	214 detik	358 detik	252,5 detik	109 detik
Implementasi	154,5 detik	233 detik	339,5 detik	971 detik	101,5 detik

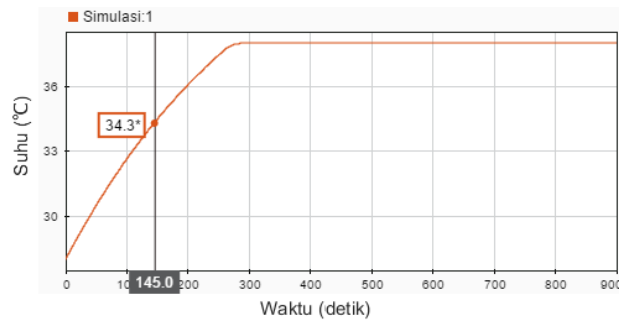
3.1.3. Pengujian Respon Kendali PI – *Anti Windup*

Pada pengujian respon kendali PI – *anti windup* dilakukan dengan membandingkan data hasil pengujian implementasi dengan data hasil pengujian simulasi. Pengujian simulasi respon kendali PI – *anti windup* dan menghasilkan respon sistem seperti pada Gambar 40 berikut.

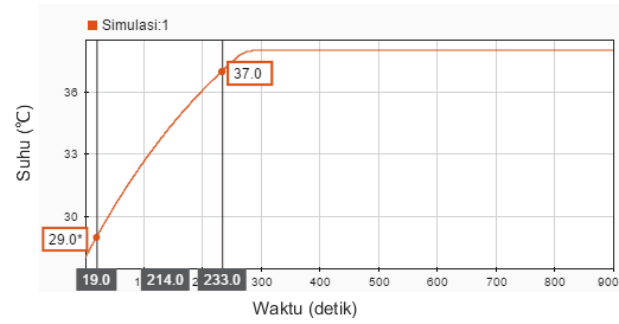


Gambar 40. Grafik respon suhu simulasi kendali PI – *anti windup*

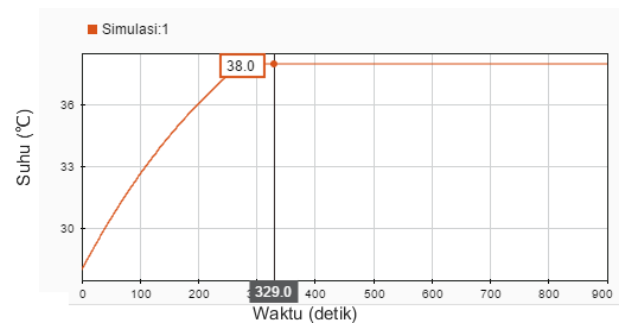
Respon *transient* simulasi kendali kendali PI – *anti windup* yang terdapat pada Gambar 40, merupakan tipe *over damped response* dengan output suhu mencapai 38,02 °C terdapat *overshoot* sebesar 0,2% dan karakteristik respon *transient* yang dapat diukur berdasarkan grafik output suhu antara lain; *time constant*, *rise time*, *peak time*, *settling time* dan *delay time*.



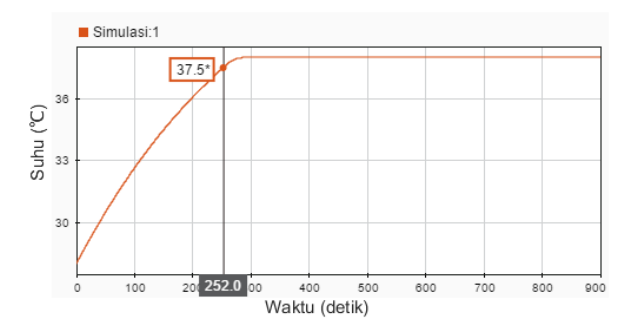
Gambar 41. Time constant simulasi kendali PI – anti windup



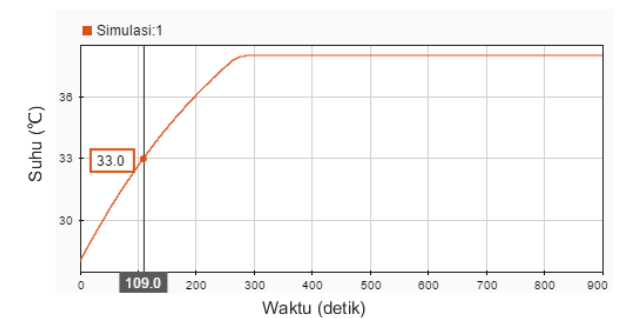
Gambar 42. Rise time simulasi kendali PI – anti windup



Gambar 43. Peak time simulasi kendali PI – anti windup



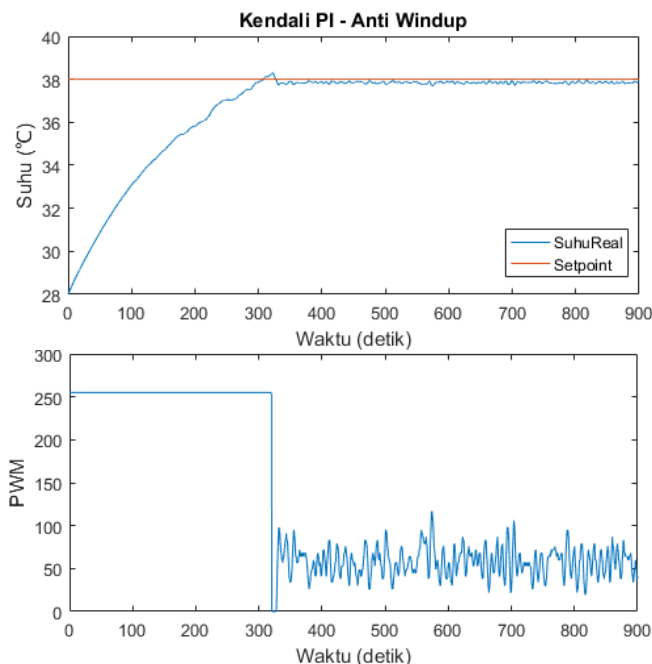
Gambar 44. Settling time simulasi kendali PI – anti windup



Gambar 45. Delay time simulasi kendali PI – anti windup

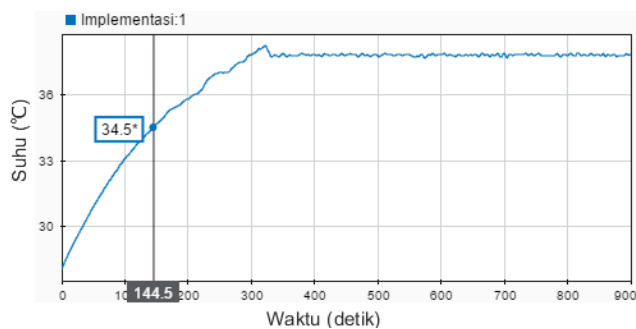
Berdasarkan Gambar 41 sampai dengan Gambar 45 karakteristik respon *transient* pada simulasi kendali PI – *anti windup* memiliki nilai *time constant* sebesar 145 detik, *rise time* (10% - 90%) sebesar 214 detik, *peak time* sebesar 329 detik, *settling time* (5%) sebesar 252 detik dan *delay time* sebesar 109 detik.

Kemudian dilakukan Pengujian respon kendali PI – *anti windup* pada implementasi prototipe simulator penetas telur ayam menghasilkan respon yang dapat dilihat pada Gambar 46 berikut.

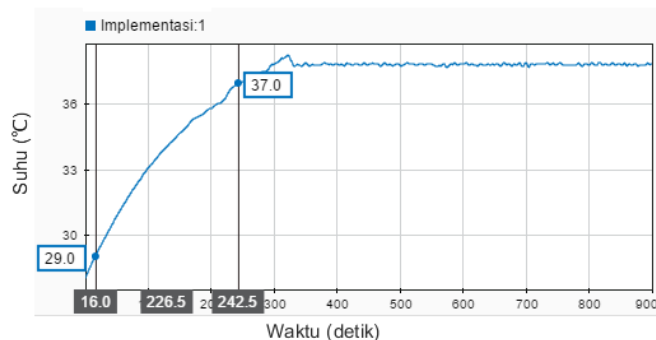


Gambar 46. Grafik respon suhu dan PWM implementasi kendali PI – *anti windup*

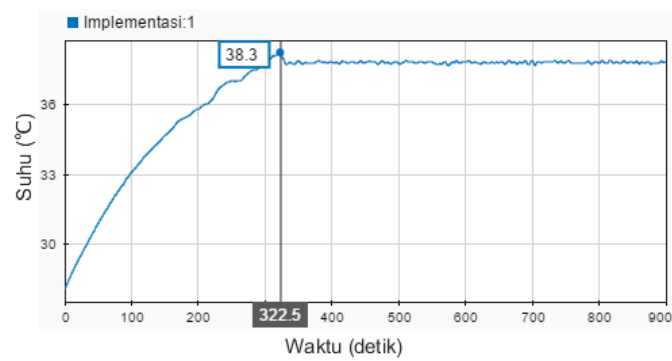
Dilihat dari bentuk respon *transient* pada Gambar 46, output suhu pada implementasi kendali PI – *anti windup* merupakan tipe *over damped response* karena output suhu melewati *setpoint* yang ditentukan yaitu mencapai suhu 38,3°C sehingga terjadi *overshoot* sebesar 3% dengan karakteristik respon *transient* sebagai berikut.



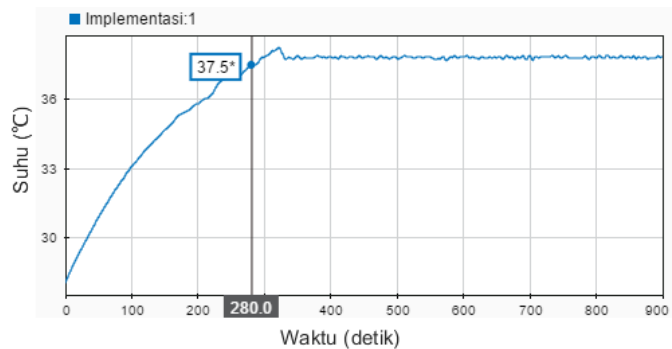
Gambar 47. *Time constant* implementasi kendali PI – *anti windup*



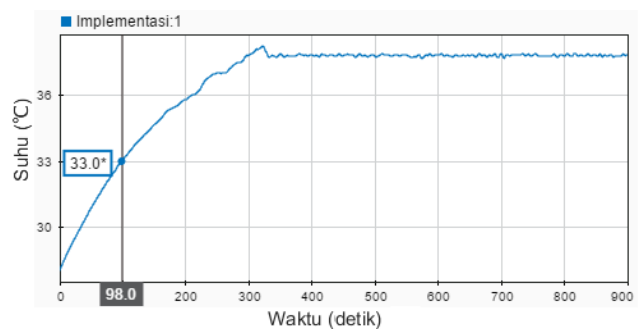
Gambar 48. *Rise time* implementasi kendali PI – *anti windup*



Gambar 49. Peak time implementasi kendali PI – anti windup

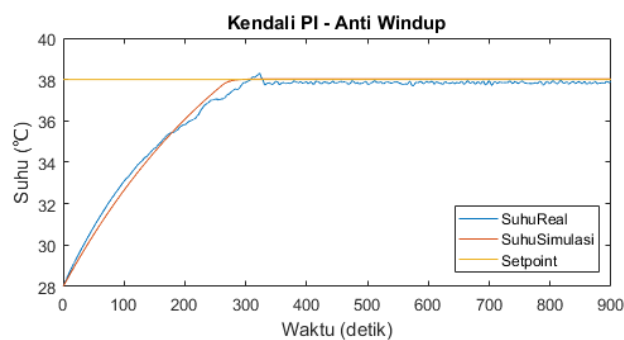


Gambar 50. Settling time implementasi kendali PI – anti windup



Gambar 51. Delay time implementasi kendali PI – anti windup

Berdasarkan Gambar 47 sampai dengan Gambar 51 karakteristik respon *transient* pada implementasi kendali PI – *anti windup* memiliki nilai *time constant* sebesar 144,5 detik, *rise time* (10% - 90%) sebesar 226,5 detik, *peak time* sebesar 322,5 detik, *settling time* (5%) sebesar 280 detik dan *delay time* sebesar 98 detik. Dan jika dibandingkan respon kendali pada simulasi dengan implementasi kendali PI – *anti windup* akan terlihat seperti pada Gambar 52.



Gambar 52. Grafik respon suhu simulasi dan implementasi kendali PI – anti windup

Hasil perbandingan karakteristik respon *transient* pada kendali PI – *anti windup* simulasi dan implementasi dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Karakteristik respon transient kendali PI – anti windup

	<i>Time constant</i>	<i>Rise time</i>	<i>Peak time</i>	<i>Settling time</i>	<i>Delay time</i>
Simulasi	145 detik	214 detik	329 detik	252 detik	109 detik
Implementasi	144,5 detik	226,5 detik	322,5 detik	280 detik	98 detik

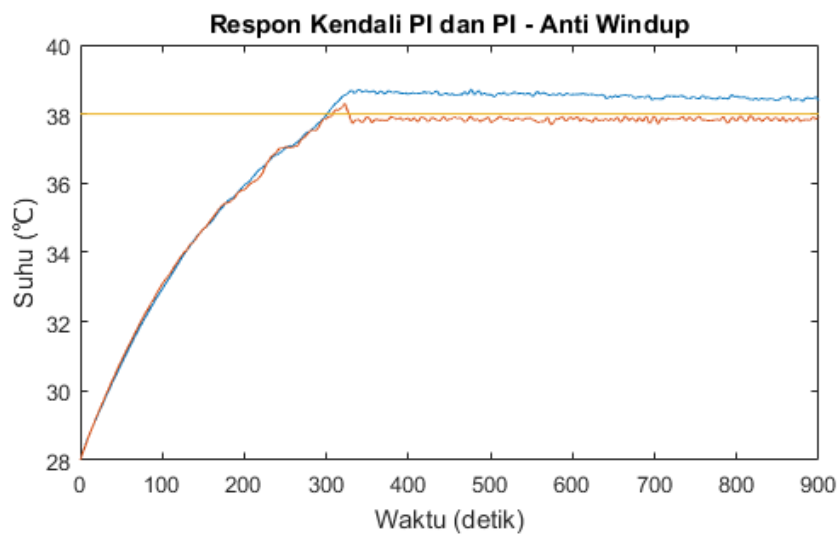
3.2. Pembahasan

Dalam menentukan algoritma kendali suhu yang paling optimal diantara kendali PI dan kendali PI – *anti windup* yang sudah dilakukan pengujian dapat dilihat dari karakteristik respon *transient* dari kedua algoritma kendali suhu tersebut.



Gambar 53. Kendali suhu pada prototipe simulator penetas telur ayam menggunakan lampu pijar

Untuk prototipe simulator penetas telur ayam yang terdapat pada Gambar 53, parameter respon kendali suhu yang dibutuhkan yaitu memiliki respon cepat, stabil pada suhu *setpoint* dan tidak terdapat lonjakan suhu yang besar. Maka dari itu, dilakukan perbandingan respon kendali suhu dari ketiga algoritma tersebut yang dapat dilihat pada Gambar 54.



Gambar 54. Perbandingan respon kendali suhu pada implementasi

Gambar 54 menampilkan grafik perbedaan kendali suhu dari algoritma kendali PI dan kendali PI – *anti windup*. Dilihat dari bentuk grafik kedua algoritma kendali PI dan kendali PI – *anti windup* merupakan tipe *over damped response* karena terdapat *overshoot* pada output suhu. Kendali PI menghasilkan respon yang kurang baik karena output suhu terdapat *overshoot* yang terbilang jauh dari *setpoint* akibat dari akumulasi kendali *integral* yang terus beroperasi dan kendali PI – *anti windup* terlihat cukup baik dengan adanya penambahan *anti windup* yang sangat memberi pengaruh besar pada output suhu sehingga *overshoot* sedikit lebih kecil dari kendali PI. Berdasarkan parameter yang dibutuhkan prototipe simulator penetas telur ayam, algoritma kendali PI – *anti windup* lebih cocok digunakan dari pada kedua algoritma kendali PI. Selain itu perbandingan karakteristik respon *transient* dari ketiga algoritma kendali tersebut dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Perbandingan respon *transient* kendali suhu pada implementasi

	<i>Time constant</i>	<i>Rise time</i>	<i>Peak time</i>	<i>Settling time</i>	<i>Delay time</i>
PI	154,5 detik	233 detik	339,5 detik	971 detik	101,5 detik
PI - AW	144,5 detik	226,5 detik	322,5 detik	280 detik	98 detik

Berdasarkan Tabel 8, algoritma kendali PI - *anti windup* memiliki karakteristik respon *transient* yang lebih cepat dari algoritma kendali PI, salah satunya nilai *settling time* yaitu waktu yang menyatakan respon telah masuk sebesar 5% dari respon *steady state*. Kendali FLC – PI terhitung lebih cepat 691 detik dari kendali PI dapat dikatakan kendali PI - *anti windup* lebih cocok dengan kebutuhan algoritma kendali pada prototipe simulator penetas telur ayam dalam optimasi kendali suhu.

4. Kesimpulan

1. Perancangan model *transfer function* berhasil dibuat dan mampu merepresentasikan modul AC *light dimmer* yang sebenarnya dan perancangan prototipe simulator penetas telur ayam berhasil dirancang menggunakan *node* sensor dan *node* aktuator sebagai rangkaian pengendali, kedua *node* berhasil terhubung secara nirkabel dan dapat mengirim serta menerima data dengan baik.
2. Kendali *Fuzzy Logic Controller* (FLC) – PI, kendali *Proportional Integral* (PI) dan kendali PI – *anti windup* berhasil dibuat dan di implementasikan pada hasil rancangan prototipe simulator penetas telur ayam.
3. Hasil analisis perbandingan dari ketiga algoritma kendali FLC – PI, kendali PI dan kendali PI – *anti windup* menunjukkan bahwa algoritma kendali FLC – PI lebih baik dari kendali PI ataupun kendali PI – *anti windup* dan cocok digunakan pada prototipe simulator penetas telur ayam karena mampu mengendalikan suhu secara optimal.
4. Kendali FLC – PI memiliki respon *transient* yang cepat dengan nilai *time constant* sebesar 133,5 detik, *rise time* sebesar 234 detik, *settling time* sebesar 264 detik dan *delay time* sebesar 95,5 detik.

5. Nomenklatur

P	= <i>Proportional</i>
I	= <i>Integral</i>
PI	= <i>Proportional Integral</i>
PWM	= <i>Pulse Width Modulation</i>
PCB	= <i>Printed Circuit Board</i>
LCD	= <i>Liquid Crystal Display</i>
MATLAB	= <i>Matrix Laboratory</i>
SIT	= <i>System Identification Toolbox</i>
PRBS	= <i>Pseudo Random Binary Sequences</i>
IoT	= <i>Internet of Things</i>

6. Referensi

- [1] S. Syafik, K. Joni, and A. F. Ibadillah, "Rancang Bangun Alat Penetas Telur Ayam Otomatis Dengan Metode Pid (Proportional Integral Derivative) Berbasis Energy Hybrid," *J. Tek. Elektro dan Komput. TRIAC*, vol. 4, no. 2, 2017, doi: 10.21107/triac.v4i2.3264.
- [2] A. Rahayuningtyas, M. Furqon, and T. Santoso, "Rancang Bangun Alat Penetas Telur Deerhana Menggunakan Sensor Suhu dan Penggerak Otomatis," *Pros. Semin. Nas. Penelit. dan PKM Sains, Teknol. dan Kesehat.*, vol. 4, no. 1, pp. 245–252, 2014, [Online]. Available: http://proceeding.unisba.ac.id/index.php/sains_teknologi/article/view/595.
- [3] R. Ahaya and S. Akuba, "Rancang bangun alat penetas telur," *J. Teknol. Pertan. Gorontalo*, vol. 3,

- no. 1, 2018.
- [4] R. Hidayat and P. W. Rusimanto, "Sistem Pengendalian Temperatur Pada Inkubator Penetas Telur Otomatis Berbasis Fuzzy Logic Control," *J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 1, p. 9, 2019.
- [5] M. S. Hadi, S. Ubaidillah, R. A. P. Sari, and D. P. Fatmala, "Sistem kendali otomatis mesin penetas telur menggunakan kontroler PID," *Tekno*, vol. 27, no. 2, p. 116, 2019, doi: 10.17977/um034v27i2p116-124.
- [6] G. Yanto, "Logika Fuzzy Untuk Kendali Suhu Ruang Pada Air Conditioner (Ac) Di Ruang Dosen Fuzzy Logic Control of Air-Conditioning System in Lecturer Room of Stmik Indonesia Padang," *J. Ilmu Fis. dan Teknol.*, vol. 1 No.2, no. 2580-989X, pp. 23-32, 2017.
- [7] D. Dhanny Jufri, Darwison, Budi Rahmadya, "Implementasi Mesin Penetas Telur Ayam Otomatis Menggunakan Metoda Fuzzy Logic Control," *Semin. Nas. Sains dan Teknol.*, no. November, pp. 1-6, 2015.
- [8] T. D. Madyanto, I. Santoso, and I. Setiawan, "Pengontrolan Suhu Menggunakan Metode FUZZY-PID pada Model Sistem Hipertermia," *Pengontrolan Suhu Menggunakan Metod. FUZZY-PID pada Model Sist. Hipertermia*, vol. 12, no. 1, pp. 21-26, 2010, doi: 10.12777/transmisi.12.1.21-26.
- [9] A. Rafi and A. Tahtawi, "Perancangan Pengendali Proportional-Integral Anti-Windup (Pi-Aw) pada Simulator Mobil Listrik untuk Kendali Kecepatan dan Torsi," *Electrans*, vol. 14, no. 1, pp. 1-7, 2016.
- [10] R. F. Iskandar, R. Putra, and A. Suhendi, "Analisis Pengaruh Kontrol PI Dengan Integral Anti-Windup Sebagai Upaya Reduksi Lonjakan Respon pada Sistem Ruang Termal," *Komputika J. Sist. Komput.*, vol. 8, no. 1, pp. 53-58, 2019, doi: 10.34010/komputika.v8i1.1679.
- [11] F. S. Fahmi and D. I. Saputra, "Pengontrolan Buka-an Valve Pada Sistem Vessel Separator Dengan Metode Logika Fuzzy Berbasis Node Nirkabel Valve Opening Control in Vessel Separator System Using Fuzzy Logic Method With A Wireless Node-Based," *Sent. 2019 Semin. Nas. Tek. Elektro 2019*, no. November 2019, pp. 135-149, 2019.