

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN SUHU PADA INKUBATOR BAYI BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROLLER

Satriyo Prasajo

S 1 Teknik Elektro , Fakultas Teknik , Universitas Negeri Surabaya
email : satriyoprasajo@mhs.unesa.ac.id

Bambang Suprianto

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
email: bambangsuprianto@unesa.ac.id

Abstrak

Bayi prematur adalah bayi yang lahir kurang dari waktu yang seharusnya, yaitu 9,25 bulan atau 37 minggu. Dunia luar yang memiliki suhu dan lingkungan yang jauh berbeda dari saat di dalam rahim ibu menyebabkan bayi yang lahir prematur tidak dapat bertahan hidup karena tubuhnya yang tidak dapat beradaptasi. Oleh sebab itu dibutuhkan sebuah alat yang dapat membantu bayi agar tetap merasakan kondisi lingkungan seperti saat di dalam rahim, yaitu inkubator. Namun inkubator yang dapat mengendalikan suhu secara otomatis memiliki harga yang cukup mahal, sementara inkubator yang berharga murah hanya dapat dioperasikan secara manual. Dalam penelitian ini dibuat sebuah inkubator bayi dengan biaya relatif murah yang dapat beroperasi secara otomatis menggunakan pengendali bermetode logika *Fuzzy*. Pengendali ini dapat memberikan suhu inkubator yang sesuai dengan berat badan bayi. Alat ini memberikan nilai *error* antara suhu saat ini dengan suhu yang diinginkan sebesar 1,36% dengan batas toleransi suhu sebesar $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Kata Kunci : Arduino, Bayi Prematur, *Fuzzy*, Inkubator

Abstract

Premature baby is baby that born less than the time they should be, which is 9,25 months or 37 weeks. The outside world which has an environment and temperature that's very different from the time they are in mother's womb, it causes premature babies cannot survive because their bodies can't adapt. Therefore we need a device that can help the baby to feel the same environmental condition as they're in womb, incubator. However, incubator which can automatically control the temperature have quite expensive price. On the other side, low-cost incubator can only be operated manually. In this study was created a baby incubator with relatively cheap cost with automatic system using *Fuzzy Logic* control. This controller can provide a temperature that equal to the baby's weight. This device have an *error* rate between the current temperature and the desired one of 1,36% with temperature tolerance limit of $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Keywords : Arduino, Premature Baby, *Fuzzy*, Incubator

PENDAHULUAN

Bayi prematur adalah bayi yang lahir pada usia kehamilan kurang atau sama dengan 37 minggu, tanpa memperhatikan berat badan lahir. Inkubator bayi pada umumnya dibuat untuk menjadi tempat sementara bagi bayi prematur. Biasanya, bayi yang masih dalam kandungan memiliki suhu tubuh yang sama dengan suhu tubuh ibunya. Suhu normal pada bayi berkisar dari 36°C - 37°C . Bayi yang lahir secara prematur memiliki suhu tubuh yang tidak stabil. Oleh karena itu, inkubator bayi dibutuhkan untuk menjaga kestabilan suhu dan kelembapan pada bayi.

Inkubator saat ini masih bersifat manual dimana suhu dan kelembapannya masih diatur secara manual. Monitoring pada inkubator juga masih standar sehingga diperlukan pengawasan yang lebih dari perawat.

Sedangkan biaya perawatan bayi pada inkubator juga terbilang relatif mahal (Nababan, 2017).

Ada 3 tiga kategori prematur, yaitu *extremely preterm* (lahir kurang dari 28 minggu), *very preterm* (lahir pada 28 sampai kurang dari 32 minggu), dan *moderate to late preterm* (lahir pada 32 sampai kurang dari 37 minggu). Menurut dr. Agung Zentyo Wibowo, Bmedsc, semakin awal bayi lahir, kondisi atau risiko yang didapat dari prematuritas memang akan semakin meningkat. Karena itulah, bayi prematur harus ditangani dengan baik agar kualitas hidupnya bisa lebih optimal (Hani, 2017).

Seiring perkembangan teknologi, inkubator bayi kini memiliki beragam fitur yang sangat membantu untuk memudahkan perawatan si bayi. Tentu saja kecanggihan inkubator dan harga jualnya selalu berbanding lurus. Hal ini menjadi masalah bagi masyarakat menengah ke bawah,

mengingat bayi tidak hanya dilahirkan oleh masyarakat tingkat atas. Seharusnya, dengan semakin berkembangnya teknologi dibidang informasi maupun didalam bidang kesehatan, memudahkan masyarakat untuk mendapatkan apa yang ingin didapatkannya dalam usaha peningkatan derajat kesehatan hidupnya (Afriezal, 2014).

Berdasarkan latar belakang di atas, diperlukan penelitian untuk menghasilkan suatu inkubator bayi yang dapat mengatur suhunya sendiri secara otomatis dengan biaya yang tidak setinggi inkubator canggih. Saya membuat penelitian dengan judul “Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Pengendalian Suhu Pada Inkubator Bayi Berbasis *Fuzzy Logic Controller*”. Dengan metode kontrol *Fuzzy* maka untuk menentukan masing-masing parameter dilakukan proses identifikasi *plant* untuk mendapatkan *rule evaluation* yang digunakan sebagai pedoman dalam pengaturan suhu. Sistem kontrol *Fuzzy* yang diaplikasikan sebagai modul kontrol suhu di dalam sistem yang menggunakan LabVIEW dan Arduino sebagai piranti data akuisisi untuk membaca sensor suhu dan mengendalikan lampu pemanas. Data *sample* pengontrolan suhu dapat diambil dari tampilan langsung ke komputer/LCD dengan *software* LabVIEW yang dapat menerima dan menampilkan data suhu berupa grafik/angka.

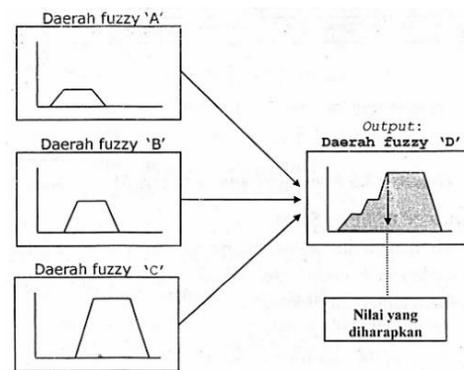
KAJIAN PUSTAKA

Fuzzy Logic Controller Metode Mamdani

Metode Mamdani sering dikenal sebagai metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk mendapatkan *output*, diperlukan 4 tahapan (Kusumadewi, 2010) :

1. Pembentukan Himpunan *Fuzzy*
Variable *input* maupun variable *output* dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *fuzzy*.
2. Aplikasi Fungsi Implikasi
Pada metode Mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah Min.
3. Komposisi Aturan
Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar-aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem *Fuzzy*, yaitu: *max*, *additive*, dan *probabilistic OR* (probor).
4. Penegasan (*defuzzy*)
Input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan *Fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *Fuzzy*, sedangkan *output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *Fuzzy* tersebut. Sehingga jika diberikan suatu himpunan *Fuzzy* dalam *range* tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai

crisp tertentu sebagai *output* seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Defuzzifikasi
(Sumber : Kusumadewi, 2010)

Sensor SHT11

Modul SHT11 adalah modul sensor suhu dan kelembapan. Modul ini dapat digunakan sebagai alat pengindera suhu dan kelembapan. Spesifikasi dari SHT11 ini adalah sebagai berikut (Aldrin, 2011) :

1. Berbasis sensor suhu dan kelembapan relatif Sensirion SHT11.
2. Mengukur suhu dari -40°C hingga $+123,8^{\circ}\text{C}$, atau dari -40°F hingga $+254,9^{\circ}\text{F}$ dan kelembapan relatif dari 0%RH hingga 1%RH.
3. Memiliki ketetapan (akurasi) pengukuran suhu hingga $0,5^{\circ}\text{C}$ pada suhu 25°C dan ketepatan (akurasi) pengukuran kelembapan relatif hingga 3,5%RH.
4. Memiliki antarmuka *serial synchronous 2-wire*, bukan I2C.
5. Jalur antarmuka telah dilengkapi dengan rangkaian pencegah kondisi sensor *lock-up*.
6. Membutuhkan catu daya +5V DC dengan konsumsi daya rendah 30 μW .
7. Modul ini memiliki faktor bentuk 8 pin DIP 0,6 sehingga memudahkan pemasangannya.

LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) pada dasarnya sama seperti bahasa pemrograman lainnya, seperti bahasa C, FORTRAN, BASIC, dan lain-lain. Namun LabVIEW berbeda dari Bahasa pemrograman lainnya yang menggunakan *text based programming*, LabVIEW menggunakan *Graphic based programming* yang biasa disebut sebagai bahasa G sehingga dapat dengan mudah digambarkan logika pemrogramannya.

Program LabVIEW menggunakan file berformat *Virtual Instruments* (.vi) karena tampilan dan cara pengoperasian yang mirip dengan instrumentasi yang

banyak digunakan di laboratorium, seperti osiloskop, knob, tombol, dan lain sebagainya (Simanjuntak, 2012).

Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah papan *microcontroller* berbasis *chip* ATmega2560. Arduino Mega memiliki semua yang dibutuhkan untuk mendukung *microcontroller*. Spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1. Spesifikasi Arduino Mega 2560
(Sumber : Arduino, 2018)

Chip mikrokontroller	ATmega2560
Tegangan operasi	5V
Tegangan input (yang direkomendasikan, via jack DC)	7V - 12V
Tegangan input (limit, via jack DC)	6V - 20V
Digital I/O pin	54 buah, 6 diantaranya menyediakan PWM output
Analog Input pin	16 buah
Arus DC per pin I/O	20 mA
Arus DC pin 3.3V	50 mA
Memori Flash	256 KB, 8 KB telah digunakan untuk bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock speed	16 Mhz
Dimensi	101.5 mm x 53.4 mm
Berat	37 g

Lampu Pijar

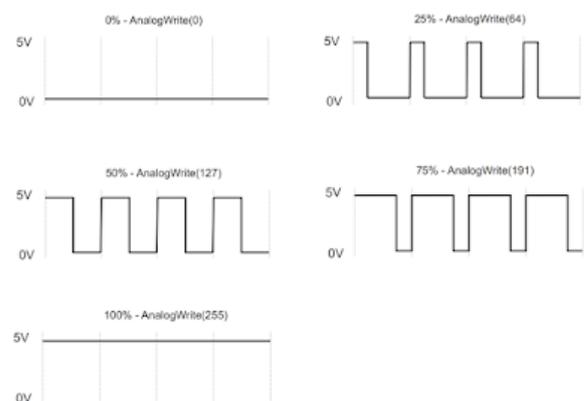
Lampu pijar adalah sumber cahaya buatan yang dihasilkan melalui penyaluran arus listrik melalui filamen yang kemudian memanaskan dan menghasilkan cahaya. Kaca yang menyelubungi filamen panas tersebut menghalangi udara untuk berhubungan langsung sehingga filamen tidak akan langsung rusak akibat teroksidasi. Lampu pijar dipasarkan dalam banyak varian bentuk dan dapat bekerja pada tegangan mulai dari 1,25V hingga 300V. Lampu pijar memerlukan sumber listrik yang lebih besar dari sumber cahaya buatan lainnya seperti lampu pendar dan dioda

cahaya, karena itu di beberapa negara membatasi peredaran lampu pijar. Lampu ini mempunyai keunggulan antara lain (Riza, 2012) :

1. Mempunyai nilai "color rendering index" 100% yang cahayanya tidak mengubah warna asli objek.
2. Mempunyai bentuk fisik lampu yang sederhana, macam-macam bentuknya yang menarik, praktis pemasangannya.
3. Harganya relatif lebih murah dan mudah didapat di toko.
4. Instalasi murah, tidak perlu perlengkapan tambahan.
5. Lampu dapat langsung menyala.
6. Terang-redupnya dapat diatur dengan *dimmer*.
7. Cahayanya dapat difokuskan.

PWM

PWM adalah singkatan dari *Pulse Width Modulation*. Pada *board* arduino Uno, pin yang bisa dimanfaatkan untuk PWM adalah pin yang diberi tanda tilde (~), yaitu pin 3, 5, 6, 9, 10, dan pin 11. Pin-pin tersebut merupakan pin yang bisa difungsikan untuk *input* analog atau *output* analog. Oleh sebab itu, jika akan menggunakan PWM pada pin ini, bisa dilakukan dengan perintah *analogWrite()*.



Gambar 2. Siklus Sinyal PWM Pada Arduino
(Sumber : Santoso, 2015)

PWM pada arduino bekerja pada frekuensi 500Hz, artinya 500 siklus/ketukan dalam satu detik. Untuk setiap siklus, kita bisa memberi nilai dari 0 hingga 255. Ketika kita memberikan angka 0, berarti pada pin tersebut tidak akan pernah bernilai 5 volt (pin selalu bernilai 0 volt). Sedangkan jika kita memberikan nilai 255, maka sepanjang siklus akan bernilai 5 volt (tidak pernah 0 volt). Jika kita memberikan nilai 127 (kita anggap setengah dari 0 hingga 255, atau 50% dari 255), maka setengah siklus akan bernilai 5 volt, dan setengah siklus lagi akan bernilai 0 volt. Sedangkan jika jika memberikan 25% dari 255 ($1/4 * 255$ atau 64), maka $1/4$ siklus akan bernilai 5 volt, dan $3/4$

sisanya akan bernilai 0 volt, dan ini akan terjadi 500 kali dalam 1 detik (Santoso, 2015).

AC Light Dimmer Module

AC Light Dimmer module adalah *dimmer* buatan RobotDyn yang dapat dikendalikan oleh *microcontroller* seperti Arduino, Raspberry Pi dan sebagainya. Fitur pin *zero crossing detector* pada modul ini membuat *microcontroller* dapat mengetahui saat yang tepat untuk mengirim sinyal PWM. Spesifikasi modul ini dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini :

Tabel 2. Spesifikasi AC Light Dimmer Module
(Sumber : Marie, 2017)

Produsen	RobotDyn
Tipe TRIAC	Tri-Ad BTA16
Arus AC Maksimal	Kontinyu max 2A, max 5A
Tegangan AC	110V / 220V
Frekuensi AC	50/60Hz
<i>Zero-Cross detection (with zero/cross output via pin Z/C)</i>	
<i>PWM controllable via pin PWM to give PSM output result.</i>	
Pin Input	TTL level 3,3V to 5V
Dimensi Modul	63mm x 30mm x 30mm

Sensor Loadcell + IC HX711

Prinsip kerja *loadcell* dihitung dari perubahan resistansi yang terjadi akibat timbulnya sebuah regangan pada foil metal *strain gauge*. Perubahan resistansi diakibatkan adanya pemberian beban pada sisi yang elastis, sehingga mengalami perubahan tekanan. Hasil perubahan tekanan tersebut akan dikonversi menjadi tegangan oleh komponen pendukung yang ada.

HX711 adalah modul timbangan yang berfungsi menguatkan tegangan yang terukur pada sensor *loadcell* dan mengonversinya ke dalam besaran listrik. HX711 presisi 24-bit *analog-to-digital converter* (ADC) yang didesain untuk sensor timbangan digital (*weight scales*) dan *industrial control* aplikasi yang terkoneksi dengan sensor jembatan (*bridge sensor*). Modul melakukan komunikasi dengan *computer/microcontroller* melalui TTL (Khakim dkk, 2015).

Keadaan Bayi

Setelah bayi lahir, ia akan berada di tempat yang suhunya lebih rendah dari dalam kandungan dan dalam keadaan basah. Apabila bayi dibiarkan berada dalam suhu kamar 25°C, bayi akan kehilangan panas melalui radiasi, konveksi, dan evaporasi. Keadaan ini akan menyebabkan penurunan suhu tubuh bayi tersebut. Apabila keadaan ini

tidak ditangani secara baik maka akan terjadi perubahan-perubahan pada bayi tersebut terutama bayi dengan berat bayi lahir rendah. Normalnya suhu bayi harus berada antara 36-37,5°C.

Bayi memiliki kesanggupan pembentukan panas dan mempertahankan suhu tubuh dengan sangat terbatas terutama pada bayi prematur. Kondisi ini dapat dihindari dengan segera mengeringkan bayi. Selanjutnya suhu bayi dapat dipertahankan dalam *neutral thermal zone* yang adalah cara paling efektif untuk menekan mortalitas bayi prematur.

Suhu *rectal* bayi dapat diperhatikan pada suhu 37°C dengan mengubah suhu di sekitarnya dengan cara memberi pakaian lebih tebal, memberi *heater* dan bila fasilitas memungkinkan adalah penggunaan inkubator. Pengaturan suhu inkubator terlihat pada Tabel 3 :

Tabel 3. Pengaturan Suhu Inkubator
(Sumber : Surasmi dkk, 2013)

Berat Badan (kg)	Temperatur (°C)
1	35
2	34
3	33

Inkubator Bayi

Inkubator bayi merupakan alat yang berfungsi mencegah hipotermia atau kondisi di mana tubuh kesulitan dalam mengatur tekanan suhu dingin pada bayi yang baru lahir terutama bayi yang memiliki berat badan lahir rendah (BBLR) atau prematur dengan cara menghangatkan suhu ruangan agar dapat mempertahankan suhu badan bayi normal. Terdapat beberapa syarat agar alat tersebut dapat dikatakan sebuah inkubator bayi, di antaranya (Surasmi dkk, 2013) :

1. Menjaga suhu ruangan inkubator bayi tetap stabil. Sebagai contoh menjaga suhu ruangan berkisar antara 35°C hingga 37°C.
2. Mengisolasi ruangan inkubator bayi, menjaga bayi dari lingkungan luar karena daya tubuh bayi masih terbilang rentan dan menjaga dari terjangkitnya infeksi.

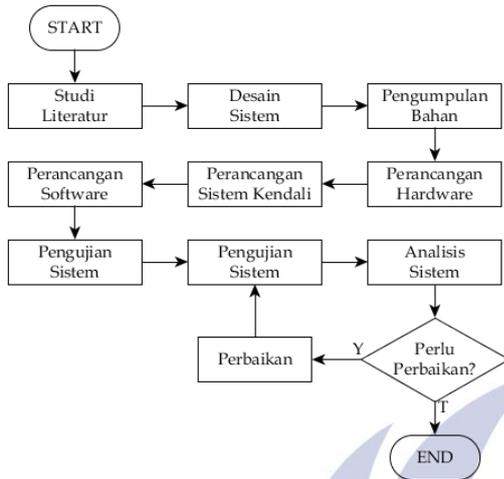
METODE PENELITIAN

Instrumen Pengumpulan Data

Instrumen digunakan sebagai alat bantu untuk mempermudah pengumpulan dan pengolahan data penelitian. Pada penelitian ini digunakan perangkat komputer/laptop, *software* Arduino IDE, dan LabVIEW untuk memonitor hasil pengujian.

Prosedur Penelitian

Flowchart penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini :



Gambar 3. Flowchart Penelitian (Sumber : Data Primer, 2017)

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pencarian dan pembelajaran referensi dan literatur yang dibutuhkan dalam penelitian. Referensi didapat melalui buku, jurnal, dan website. Hasil dari tahap ini adalah BAB II di dalam buku ini.

2. Desain Sistem

Pada tahap ini dibuat desain bagaimana sistem akan beroperasi, mulai dari desain inkubator hingga desain software.

3. Pengumpulan Bahan

Semua kebutuhan yang didapat pada tahap “Studi Literatur” dikumpulkan di tahap ini. Pembelian komponen dan peralatan yang dibutuhkan dilakukan setelah sistem selesai didesain.

4. Perancangan Hardware

Tahap perancangan hardware dibagi menjadi 2 sub-tahap, yaitu perancangan inkubator dan perancangan komponen. Gambar 4 berikut menampilkan desain inkubator dan skema komponen yang digunakan :



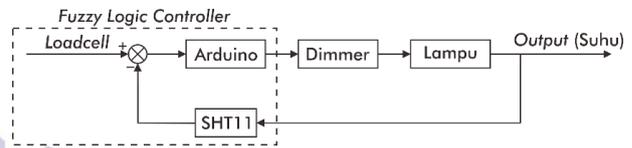
Gambar 4. Desain Inkubator bayi (Sumber : Data Primer, 2017)

Perancangan Sistem Kendali

Controller Fuzzy dirancang menggunakan metode yang diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani. Diagram blok sistem dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6 di bawah ini :

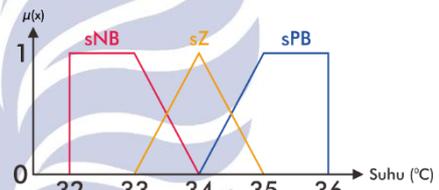


Gambar 5. Diagram Blok Sistem Open Loop (Sumber : Data Primer, 2018)

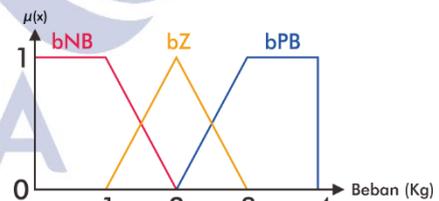


Gambar 6. Diagram Blok Sistem Close Loop (Sumber : Data Primer, 2018)

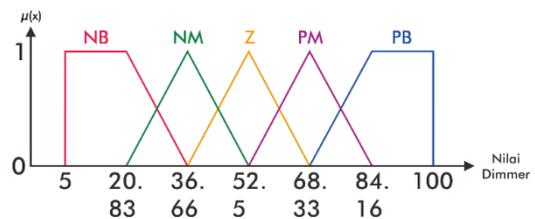
Himpunan Fuzzy beban dan suhu masing-masing dibuat sebanyak 3 membership function, sedangkan himpunan Fuzzy dimmer dibuat sebanyak 5 membership function. Gambar 7, 8, dan 9 berikut menunjukkan pembagian membership function untuk setiap himpunan :



Gambar 7. Himpunan Fuzzy Suhu (Sumber : Data Primer, 2018)



Gambar 8. Himpunan Fuzzy Beban (Sumber : Data Primer, 2018)



Gambar 9. Himpunan Fuzzy Dimmer (Sumber : Data Primer, 2018)

Aplikasi peraturan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4 di bawah ini :

Tabel 4. Pengaturan *Output Fuzzy*
(Sumber : Data Primer, 2018)

Suhu Beban	sNB	sZ	sPB
bNB	NB	NM	Z
bZ	NM	Z	PM
bPB	Z	PM	PB

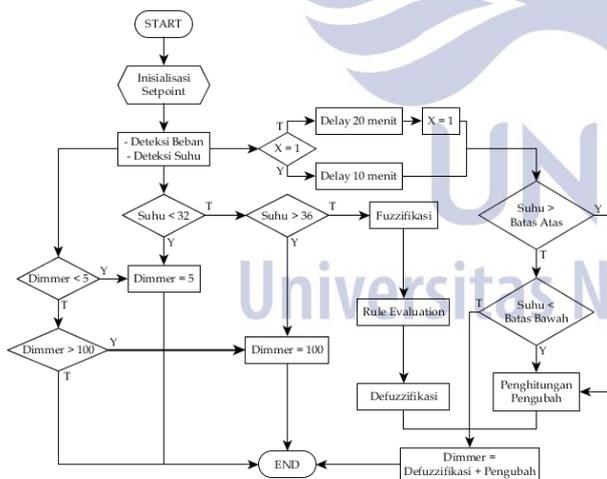
Keterangan :

- NB : Terang NM : Sedikit Terang
- PB : Redup PM : Sedikit Redup
- Z : Normal

Perancangan Software

Pertama adalah menginisialisasikan *setpoint Fuzzy*. Kemudian berat dari bayi dideteksi menggunakan sensor *LoadCell* dan suhu inkubator dideteksi menggunakan sensor *SHT11*. Kemudian dilakukan 3 bagian proses. Bagian pertama adalah pengecekan *dimmer* yang bertujuan menjaga *dimmer* agar tetap berada dalam *range* yang ditentukan. Bagian kedua adalah pengecekan suhu yang bertujuan memberi *range* di mana proses *Fuzzy* akan berlaku. Bagian ketiga adalah proses angka tambahan sebagai pembantu *output Fuzzy* agar suhu inkubator dapat mencapai *setpoint* dalam segala kondisi lingkungan.

Flowchart dari program yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 10 berikut ini :



Gambar 10. *Flowchart* Program
(Sumber : Data Primer, 2017)

Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dalam 3 tahap. Tahap pertama adalah membuat pemodelan *plant* menggunakan uji *open loop*. Tahap kedua adalah pengaplikasian *Fuzzy* pada *plant* menggunakan 2 pengujian, yaitu menggunakan

Fuzzy controller dan tanpa *controller*. Tahap ketiga adalah analisis respon sistem dari masing-masing pengujian *plant*.

Analisis dan Perbaikan Sistem

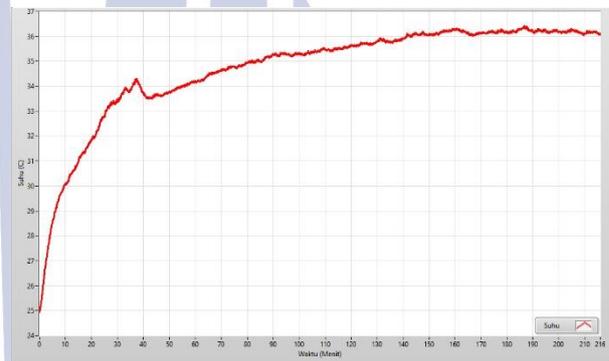
Pada tahap ini, sistem dianalisis untuk mengetahui apakah sistem sudah bekerja dengan baik. Analisis terhadap suhu dari berat yang diberikan dilakukan dengan melihat grafik perubahan suhu terhadap berat.

Tahap terakhir adalah melakukan perbaikan terhadap bagian dari sistem yang tidak bekerja secara optimal. Perbaikan meliputi error pada *software*, kesalahan konfigurasi *Fuzzy*, hingga adanya kerusakan pada bagian *hardware*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Sistem

Respon sistem dibuat dengan pengujian *open loop* yang dapat dilihat pada Gambar 11 berikut:



Gambar 11. Grafik Respon *Open Loop*
Sumber : (Data Primer, 2018)

Berdasarkan grafik respon, dengan menggunakan pendekatan orde satu, maka didapatkan parameter $c(T)$ (suhu saat sistem mencapai 63,2%) dan T (waktu saat suhu berada di titik $c(T)$) sebagai berikut :

1. $c(T) = \left(\frac{\text{Suhu Tertinggi} - \text{Suhu Terendah}}{2} \times \frac{63,2}{100} \right) + \text{Suhu terendah}$ (1)
 $= \left(\frac{36,42 - 24,93}{2} \times 63,2\% \right) + 24,93 = 32,19^{\circ}C$
2. $T = 1931$ detik

Menggunakan nilai T , maka didapatkan fungsi alih C_s/R_s (hubungan antara *input-output*) sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} = \frac{1}{1931s+1} \tag{2}$$

Perancangan Controller Fuzzy

1. Fuzzifikasi

Logika Fuzzy yang dibuat memiliki 2 *input*, yaitu suhu dan berat yang masing-masing didapatkan

dari sensor SHT11 dan *Loadcell*. Digunakan representasi kurva linear naik, linear turun, segitiga, dan trapesium untuk memperoleh derajat keanggotaan kedua *input*. Proses fuzzifikasi mengubah nilai input asli menjadi derajat keanggotaan bernilai 0 – 1.

2. Komposisi Aturan

Dalam proses komposisi aturan, digunakan metode *max(maximum)*, yaitu mengambil nilai tertinggi dari seluruh aturan.

3. Defuzzifikasi

Metode yang digunakan pada proses defuzzifikasi adalah *centroid (centroid moment)*, yaitu mengambil titik pusat dari daerah *Fuzzy*.

$$E_{ss} = \frac{c(ss \max) - c(ss)}{c(ss)} = \frac{33,06 - 32,98}{32,98} = 0,0024 = 0,24\% \quad (3)$$

Dengan menggunakan metode pada persamaan 2, maka didapatkan fungsi alih sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{374s + 1}$$

b. *Setpoint* Berubah

Respon pengujian dengan *setpoint* berubah dapat dilihat pada Gambar 13 berikut ini :

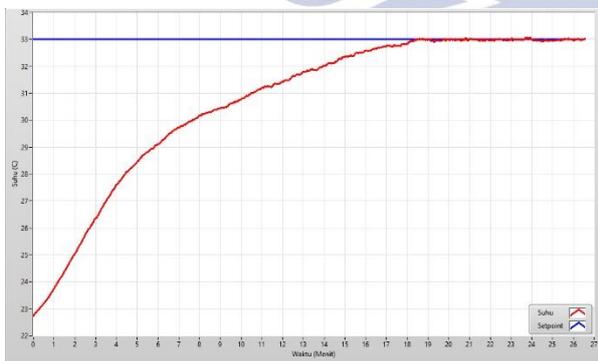
Pengujian Sistem Inkubator

Pengujian sistem dilakukan dengan toleransi kestabilan suhu sebesar $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ dan dilakukan dalam 2 tahap uji, yaitu uji tanpa *controller* dan uji menggunakan *controller Fuzzy*. Pengujian dilakukan dengan suhu lingkungan di luar inkubator antara $25^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C}$, dapat dilihat pada suhu awal di setiap uji *setpoint*. Karena pada titik tersebut suhu di luar inkubator sama dengan suhu di dalam inkubator.

1. *Mode* Tanpa *Controller*

a. *Setpoint* 33°C

Respon pengujian dengan *setpoint* 33°C dapat dilihat pada Gambar 12 berikut (*c(ss max)* adalah suhu saat titik *steady-state* tertinggi dan *c(ss)* adalah suhu saat titik tengah *steady-state*) :



Gambar 12. Grafik Respon *Setpoint* 33°C Tanpa *Controller* (Sumber : Data Primer, 2018)

Berdasarkan grafik respon, dengan menggunakan cara yang sama seperti uji *open loop*, didapatkan parameter *c(T)*, *T*, dan *E_{ss}* (*Error Steady-State*) sebagai berikut :

$$c(T) = 29,26^{\circ}\text{C}$$

$$T = 374 \text{ detik}$$



Gambar 13 Grafik Respon *Setpoint* Berubah Tanpa *Controller* (Sumber : Data Primer, 2018)

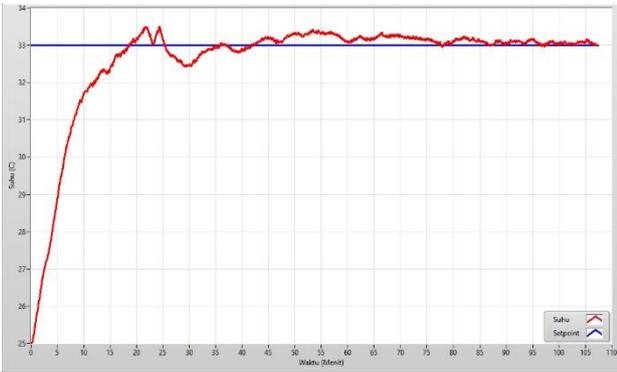
Pengujian *setpoint* berubah dilakukan dengan mengubah beban yang dimulai dari beban 3Kg (*setpoint* 33°C), kemudian diubah menjadi 1Kg (*setpoint* 35°C), kemudian diubah menjadi 2Kg (*setpoint* 34°C), dan kemudian dikembalikan ke beban 3Kg (*setpoint* 33°C).

Saat *setpoint* diubah dari 33°C ke 35°C , tidak terlihat adanya *overshoot* pada perubahan suhu. Kemudian saat *setpoint* diubah dari 35°C ke 34°C , juga tidak terlihat adanya *undershoot* dalam perubahan suhu. Namun saat *setpoint* dikembalikan dari 34°C ke 33°C , terlihat suhu mengalami kesulitan dalam menyesuaikan kondisi. Hal ini dapat disebabkan karena terjadinya perubahan lingkungan di luar inkubator.

2. *Mode* Menggunakan *Controller Fuzzy*

a. *Setpoint* 33°C

Respon pengujian dengan *setpoint* 33°C dapat dilihat pada Gambar 14 berikut :



Gambar 14. Grafik Respon *Setpoint* 33°C Menggunakan *Controller Fuzzy* (Sumber : Data Primer, 2018)

Berdasarkan grafik respon, terlihat nilai *peak time* (t_p) adalah 1459 detik. Kemudian dengan menggunakan pendekatan orde dua dan mengasumsikan suhu awal adalah nol, dapat diketahui parameter ω_d (frekuensi natural teredam), M_p (persentase *overshoot* tertinggi), ζ (rasio redaman), ω_n (frekuensi natural tak teredam), σ (pelemahan), t_r (waktu naik), $c(t_d)$ (suhu saat aktu tunda), t_d (waktu tunda), $t_s(2\%)$ (waktu penyelesaian 2%), $t_s(5\%)$ (waktu penyelesaian 5%), dan E_{ss} sebagai berikut ($c(t_p)$ adalah suhu pada titik t_p):

$$\omega_d = \frac{\pi}{t_p} = \frac{3,14}{1459} = 0,0021 \quad (4)$$

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(ss)}{c(ss)} = \frac{8,51 - 8,07}{8,07} = 0,054 = 5,4\% \quad (5)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln M_p^2}{\ln M_p^2 + \pi^2}} = \sqrt{\frac{8,519}{8,519 + 9,869}} = 0,68 \quad (6)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{0,0021}{\sqrt{1 - 0,4624}} = 0,0028 \quad (7)$$

$$\sigma = \zeta \times \omega_n = 0,68 \times 0,0021 = 0,0014 \quad (8)$$

$$t_r = \frac{\pi - \tan^{-1}(\omega_d/\sigma)}{\omega_d} = \frac{33,14 - \tan^{-1} 1,5}{0,0021} = 1098 \text{ detik} \quad (9)$$

$$c(t_d) = \frac{c(t_r)}{2} = \frac{7,95}{2} = 3,97 \rightarrow t_d = 305 \text{ detik} \quad (10)$$

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{0,0014} = 2105,26 \quad (11)$$

$$t_s(5\%) = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{0,0014} = 1578,94 \quad (12)$$

$$E_{ss} = 0,0136 = 1,36\%$$

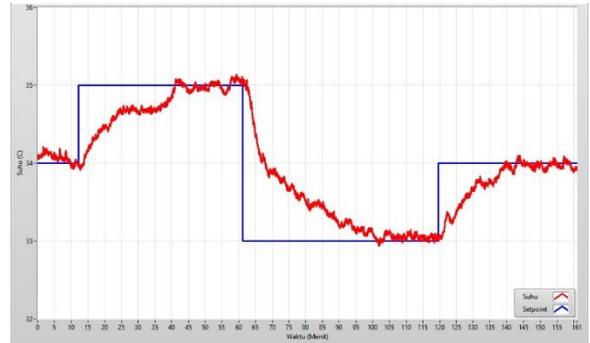
Menggunakan nilai ζ dan ω_n , maka didapatkan fungsi alih sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{7,84 \times 10^{-6}}{s^2 + (3,8 \times 10^{-3})s + (7,84 \times 10^{-6})}$$

b. *Setpoint* Berubah

Respon pengujian dengan *setpoint* berubah dapat dilihat pada Gambar 15 berikut ini :



Gambar 15. Grafik Respon *Setpoint* Berubah Menggunakan *Controller Fuzzy* (Sumber : Data Primer, 2018)

Pengujian *setpoint* berubah dilakukan dengan mengubah beban yang dimulai dari beban 2Kg (*setpoint* 34°C), kemudian diubah menjadi 1Kg (*setpoint* 35°C), kemudian diubah menjadi 3Kg (*setpoint* 33°C), dan kemudian dikembalikan ke beban 2Kg (*setpoint* 34°C).

Saat *setpoint* diubah dari 34°C ke 35°C, tidak terlihat adanya *overshoot* pada perubahan suhu. Kemudian saat *setpoint* diubah dari 35°C ke 33°C, juga tidak terlihat adanya *undershoot* dalam perubahan suhu. Begitu juga saat *setpoint* dikembalikan dari 33°C ke 34°C, suhu tidak mengalami *overshoot*.

PENUTUP
Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dari pengujian tanpa *controller*, didapatkan kondisi cahaya lampu saat keadaan *steady-state* yaitu redup-terang secara konstan, dengan E_{ss} (*Error Steady-state*) untuk *setpoint* 33°C tanpa *controller* sebesar 0,24% (dapat dilihat pada persamaan 3). Kemudian untuk pengujian menggunakan *controller Fuzzy*, didapatkan kondisi lampu saat keadaan *steady-state* yaitu dengan cahaya yang stabil sesuai *setpoint*, dengan E_{ss} (*Error Steady-state*) untuk *setpoint* 33°C sebesar 1,36% (dapat dilihat di bawah persamaan 12).

Pengujian *controller Fuzzy* memiliki *error* yang lebih tinggi, namun memiliki cahaya lampu yang stabil. Sedangkan pengujian tanpa *controller* memiliki *error* yang lebih rendah, namun cahaya lampu yang redup-terang secara konstan dapat mengurangi kenyamanan bayi.

Saran

Meskipun kedua sensor SHT11 dan *Loadcell* memiliki *error* yang terbilang rendah, sensor-sensor tersebut masih dapat diganti dengan komponen yang lebih baik yang dapat menghasilkan *error* lebih rendah. Untuk selanjutnya dapat diberikan pengendali kelembapan agar kulit bayi tidak kering dan dehidrasi, karena kelembapan akan berkurang seiring semakin tingginya suhu.

Nilai rata-rata *error steady-state* dari *setpoint mode Fuzzy controller* didapat dengan toleransi suhu sebesar $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Nilai *error* dapat ditekan dengan mengecilkan nilai toleransi di dalam program. Karena semakin kecil nilai toleransi maka nilai *error* juga akan semakin kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldrin, Muhammad. 2011. *Sensor SHT 11 >> Sensor Suhu dan Kelembaban*. (Online), (<http://allthewin.blogspot.co.id/2011/11/sensor-sht-11-sensor-suhu-dan.html>, diakses 10 April 2018)
- Kamil, Afriezal. 2014. *Analisis Tentang Perkembangan Teknologi Kesehatan dan Informasi*. (Online), (<https://ptdknurse.wordpress.com/2014/05/13/analisis-tentang-perkembangan-teknologi-kesehatan-dan-informasi/>, diakses 09 April 2018)
- Khakim, Arif Lukman, dkk. 2015. *Rancang Bangun Alat Timbang Digital Berbasis AVR Tipe ATmega32*. Semarang : Universitas Negeri Semarang (Vol 7, No 2)
- Kusumadewi, Sri, Hari Purnomo. 2010. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Yogyakarta : Graha Ilmu
- Marie, Lisa. 2017. *AC Light Dimmer 220V PWM Module Max 5A Zero Crossing Detector Arduino*. (Online), (<https://www.tokopedia.com/23shoppingcentre/ac-light-dimmer-220v-pwm-module-max-5a-zero-crossing-detector-arduino>, diakses 12 April 2018)
- Nababan, Andreas Julius. 2017. *Kontrol dan Monitoring Pada Inkubator Bayi Berbasis Fuzzy Logic*. Batam : Politeknik Negeri Batam
- Riza. 2012. *Lampu Pijar*. (Online), (<http://riza-electrical.blogspot.co.id/2012/07/lampu-pijar.html>, diakses 12 April 2018)
- Simanjuntak, Yehuda. 2012. *Tutorial LabVIEW*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada
- Surasmi, Asrining, dkk. 2013. *Perawatan Bayi Risiko Tinggi*. Jakarta : Buku Kedokteran EGC
- Arduino. 2018. *Arduino Mega*. (Online), (<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega/>, diakses 19 Agustus 2018)
- Santoso, Hari. 2015. *Arduino - Apa itu PWM?*. (Online), (<https://www.elangsakti.com/2015/06/arduino-konsep-dan-cara-kerja-pwm.html>, diakses 12 April 2018)