

PENGARUH SUHU DAN KECEPATAN PUTAR *SPIN COATING* TERHADAP KINERJA SEL SURYA ORGANIK BERBAHAN DASAR TiO_2

EFFECT OF TEMPERATURE AND SPINNING SPEED OF SPIN COATING ON THE PERFORMANCE OF ORGANIC SOLAR CELL BASED TiO_2

Aldy Satria Hidayat ^[1], Mamat Rokhmat, M.Si^[2], Ahmad Qurthobi, MT.^[3]

^[1,2,3]Program Studi S1 Teknik Fisika, Universitas Telkom, Bandung

¹aldy.satriahidayat@gmail.com, ²mamat.rokhmat76@gmail.com, ³qurthobi@gmail.com

ABSTRAK

Alat *Spin Coating* adalah salah satu metode yang digunakan untuk membuat lapisan tipis yang salah satu aplikasinya adalah untuk mendeposisi lapisan aktif dalam aplikasi sel surya organik. Salah satu jenis sel surya organik adalah sel surya berbahan dasar TiO_2 yang umumnya digunakan dalam penelitian *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) atau sel surya tersensitasi zat warna. Dalam kajian teoritis, kecepatan putar *spin coating* berpengaruh terhadap ketipisan film yang dibuat, namun belum ada penelitian lebih lanjut yang menyatakan hubungan antara kecepatan putar *spin coating* terhadap kinerja sel surya yang dihasilkan. Selain itu, proses pemanasan suhu dalam proses *spin coating* juga menjadi salah satu bagian yang dapat mempengaruhi kinerja sel surya secara keseluruhan, namun belum ada penelitian yang menjelaskan tentang pengaruh suhu proses *spin coating* dan pengaruhnya pada kinerja sel surya yang dihasilkan. Tugas akhir ini meneliti tentang pengaruh kecepatan putar dan suhu pada proses *spin coating* sederhana yang dibuat menggunakan *Arduino Uno* sebagai kontrol *proportional-integral* pada motor DC *brushless DC fan* dan *Electric Thermostat* sebagai sistem pemanas pada alat yang dibuat, sehingga dapat dilihat pada kecepatan dan suhu yang optimal dalam fabrikasi sel surya organik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putar berpengaruh linier terhadap efisiensi sel surya yang dibuat dengan kecepatan optimal sebesar 2800 RPM (*Rotation Per-Minute*) menghasilkan efisiensi sebesar 0.008%. Sementara suhu juga mempengaruhi efisiensi sel surya secara linier dengan menghasilkan efisiensi sebesar 0.026% pada kondisi putaran 2800 RPM dan suhu 75° celcius

Kata kunci : *Spin Coating*, Sel Surya Organik, DSSC, TiO_2 , Suhu, Kecepatan Putar, Efisiensi

ABSTRACT

Spin Coating Tool is one of the methods used to create a thin layer of one of the application is to deposited active layer in organic solar cell applications. One type of organic solar cells are solar cells made from TiO_2 is commonly used in research *Dye sensitized Solar Cell* (DSSC). In a theoretical study, rotational speed *spin coating* effect on the thinness of the film were made, but no further investigation of the relationship between the rotational speed of the *spin coating* of the resulting solar cell performance. In addition, the heating temperature in the *spin coating* process is also becoming one of the sections that can affect the overall performance of solar cells, but there is no research that describes the effect of temperature on the *spin coating* process and its influence on the performance of the resulting solar cells. This final project examines the influence of rotational speed and temperature on a simple *spin-coating* process created using *Arduino Uno* as *proportional-integral* control, *brushless DC motor fan* as a spinning system, and *Electric Thermostat* as a heating system, so it can be seen the optimum spinning speed and annealing temperature in the fabrication of organic solar cells. The results showed that the rotational speed linear effect on the efficiency of solar cells made with optimum speed of 2800 RPM (*Rotation Per-Minute*) resulted in an efficiency of 0.008%. While the temperature also affects the efficiency of the solar cells with an efficiency linear of 0.026% at 2800 RPM spin conditions and a temperature of 75 ° Celcius

Keywords : *Spin Coating, Organic Solar Cell, DSSC, TiO_2 , Temperature, Spinning Speed, Efficiency*

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Terletak pada titik geografis di antara 6°LU - 11°LS dan 95°BT - 141°BT, Indonesia dianugerahi potensi sumber energi terbarukan yang cukup memadai, khususnya energi yang berasal dari radiasi cahaya matahari atau yang biasa kita kenal dengan energi surya. Hal tersebut dikarenakan Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak diantara titik *equinox* atau titik balik matahari, yang secara tidak langsung akan selalu disinari cahaya matahari di sepanjang tahun dengan intensitas radiasi matahari rata-rata mencapai 4,8

kWh/m² per hari di seluruh wilayah Indonesia dari total radiasi sebesar 174 Petawatts (PW) yang diterima bumi setiap harinya (Jalaluddin Rumi dkk., 2010). Energi dan potensi sebesar itu akan sayang sekali jika tidak dimanfaatkan dengan baik, sehingga diperlukan sebuah alat yang mampu menerima dan mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik atau energi lainnya yang bias dimanfaatkan. Alat yang digunakan untuk mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik biasa kita kenal sebagai panel *photovoltaic* atau sel surya.

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) atau sel surya tersensitasi zat warna merupakan salah satu

jenis sel surya berbasis semikonduktor yang menggunakan fenomena fotoelektrokimia sebagai prinsip dasar untuk menghasilkan energi listrik. Berbeda dengan sel surya yang dikembangkan pada generasi sebelumnya, DSSC merupakan salah satu jenis sel surya organik dan cukup murah dalam proses fabrikasi jika dibandingkan dengan jenis sel surya lainnya.

Titanium Dioksida (TiO_2) merupakan material semikonduktor yang saat ini sedang umum digunakan dalam fabrikasi DSSC. Hal ini disebabkan karena TiO_2 merupakan semikonduktor tipe-n dan memiliki *band gap* yang cukup besar, sekitar 3 eV, sehingga TiO_2 hanya akan menyerap cahaya dengan panjang gelombang dengan daerah ultraviolet dan transparan terhadap cahaya tampak (Dui Yanto, 2013). Level terbawah pita konduksi TiO_2 juga berada di bawah level *Low Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO), sehingga elektron yang tereksitasi pada level LUMO mudah tertransfer ke pita konduksi TiO_2 . Selain itu, harga TiO_2 juga relatif murah dan tidak menimbulkan efek yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan.

Berbagai metode untuk membuat lapisan tipis (*Thin Film*) TiO_2 telah dikembangkan hingga saat ini. Berbagai teknik pembuatan lapisan TiO_2 juga bermunculan (Ratno Nuryadi, 2011), seperti menggunakan teknik *slip casting* (Gärg dan Varma, 2009), *doctor blade*, *screen printing* (Ito, 2007), *spray*, *sol gel* (Minegishi, 1997), *sputtering* (Gomez, 1997), *spin coating* (Zhang, 2003), *dip coating*, dan *electrophoretic deposition* (EPD). Metode pelapisan menggunakan *spin coating* merupakan metode yang paling mudah, aman, sederhana, serta paling sering digunakan dalam pengembangan DSSC. Karena jika dibandingkan dengan metode pelapisan film tipis lainnya, teknik *spin coating* dapat memberikan homogenitas yang lebih baik dan ketebalan dapat diatur yang sulit didapatkan ketika menggunakan metode pelapisan sederhana lainnya, seperti metode *spray* maupun *screen printing*.

Spin Coating merupakan teknik khusus dengan menggunakan deposit cairan dalam jumlah kecil yang kemudian diputar pada kecepatan tinggi (sekitar 3000 RPM) dalam suatu bidang datar. Alat deposisi *spin coating* yang ada saat ini juga masih memiliki beberapa keterbatasan (Erus Rustami, 2008), diantara kecepatan putar yang dihasilkan pada nilai tertentu yang proses serta pengontrolannya juga masih bersifat manual. Padahal, kecepatan putaran yang dinyatakan dalam *rotation per minute* (RPM) adalah parameter yang sangat penting dalam metode *spin coating*. Semakin bervariasi nilai kecepatan yang dihasilkan akan membuat pelapisan material uji (dalam hal ini antara TiO_2 dengan *Fluor-Tin Oxide* / FTO) menjadi semakin beragam, dan sangat memungkinkan untuk mendapatkan hasil akhir yang lebih baik lagi.

Selain pengaruh kecepatan, keadaan suhu pada proses *spin coating* juga memberikan pengaruh signifikan pada film tipis yang akan ditumbuhkan. Vorotilov *et.al* pada 1993 melakukan penelitian tentang pengaruh *annealing temperature* pada proses *spin coating* dengan menggunakan silika

sebagai bahan dasar dan mendapatkan kesimpulan bahwa pengaruh pemanasan pada proses berpengaruh pada ketipisan film dan indeks refraksi film tipis pada substrat. Kedua hal tersebut merupakan dua variabel penting yang juga dapat berpengaruh pada sel surya organik yang akan ditumbuhkan pada substrat, sayangnya belum ada penelitian yang dilakukan pada TiO_2 sebagai bahan dasar umum pada sel surya organik/DSSC. Oleh karena itu topik ini menarik untuk dibahas, dan penelitian ini akan mempelajari tentang pengaruh suhu dan kecepatan putar *spin coating* dalam kaitannya dengan sifat-sifat fisis TiO_2 berupa morfologi dan homogenitas pada substrat FTO yang secara tidak langsung juga akan berpengaruh terhadap kinerja DSSC secara umum.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang suatu sistem alat *spin coating* berbasis *Arduino Uno* dengan parameter kontrol suhu dan kecepatan putar pada motor.
2. Memahami korelasi yang tercipta antara perubahan suhu dan kecepatan putar pada deposisi partikel TiO_2 dengan kinerja sel surya (efisiensi)

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dijadikan acuan pada perancangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang alat *spin coating* sederhana terkontrol suhu dan putaran.
2. Bagaimana teknik mendeposisi TiO_2 menggunakan metode *spin coating*.
3. Bagaimana membuat komposisi elektrolit berbahan dasar LiOH dan PVA.
4. Bagaimana cara mengukur kinerja sel surya melalui parameter efisiensi melalui karakterisasi I-V (arus dan tegangan)

II. LANDASAN TEORI

2.1 Sel Surya

Sel surya adalah sebuah alat yang mengubah atau mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi energi listrik, yang juga biasa disebut dengan *photovoltaic* (fotovoltaik). Efek fotovoltaik ini pertama kali ditemukan oleh Becquerel pada awal tahun 1839, yang mendeteksi adanya tegangan ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit. Pada tahun 1954 peneliti di Bell Telephone berhasil menemukan sel surya, untuk yang pertama kalinya, yang terbuat dari silikon berbasis p-n junction dengan efisiensi 6%. Hingga saat ini, sel surya silikon tetap mendominasi pasar sel surya dengan efisiensi yang beragam dengan efisiensi tertinggi mencapai 41% untuk skala penelitian dan mencapai 20% untuk skala komersil (NREL, 2012 dan Wilman dkk., 2007)

2.2 Sel Surya Organik

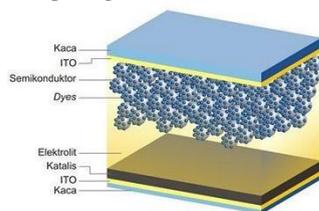
Sel surya organik adalah sel surya yang dibuat dari bahan-bahan organik, yang pada umumnya mengandung ikatan Karbon, Hidrogen, atau Oksigen. Material-material organik yang digunakan sebagai perangkat elektronik secara umum dikelompokkan menjadi dua golongan,

yaitu material organik yang berat molekulnya kecil dan polimer. Polimer adalah rantai molekul panjang yang terbentuk dari susunan molekul identik yang juga biasa disebut monomer (Dui Yanto, 2013). Sel surya organik juga biasanya terbuat dari lapisan tipis material organik dengan ketebalan hingga rentang 100 nanometer.

Salah satu tipe sel surya organik adalah *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) atau sel surya tersensitasi *Dye* (pewarna). Penggunaan *Dye* pada DSSC dilakukan untuk menggantikan peran Silikon pada sel surya konvensional yang harganya relatif mahal dalam proses fabrikasi. Selain itu, *Dye* disini juga berfungsi sebagai penyerap foton yang selanjutnya akan menghasilkan eksitasi elektron dan hole. Selanjutnya, elektron akan mengalir menuju TiO_2 dan elektroda, yang kemudian mengalir sebagai arus ke sirkuit luar.

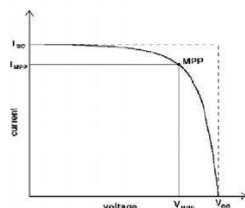
Perbedaan utama dari prinsip kerja sel surya konvensional berbasis silikon dengan sel surya organik adalah, pada sel surya silikon penyerapan cahaya dapat langsung menghasilkan pembawa muatan bebas dikarenakan terdapat medan listrik yang lebih besar dari 10^6 V/cm yang langsung dapat memisahkan elektron dari hole, sehingga elektron dapat bergerak bebas dan berperan sebagai konduksi listrik. Sementara pada sel surya organik, cahaya yang diserap hanya menghasilkan pasangan eksiton (elektron dan hole) yang tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi, tetapi kedua muatan tersebut masih terikat oleh energi ikat (dikarenakan interaksi coulomb antara keduanya) pada kisaran 0,3-0,5 V. Apabila ada energi yang cukup untuk melepaskan ikatan tersebut, barulah elektron tersebut dapat berperan sebagai elektron bebas dan konduksi listrik. (Dui Yanto, 2013).

Pada umumnya, sel surya organik terdiri dari beberapa lapisan penting, yaitu lapisan penyerap cahaya, lapisan elektroda, lapisan transpor elektron dan hole, serta lapisan *counter* elektroda. Berikut adalah struktur umum DSSC seperti yang terangkum pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Struktur Umum DSSC

2.3 Karakteristik I-V, *Fill Factor*, dan Efisiensi



Gambar 2.2 Karakteristik I-V

Ketika sel dalam kondisi *short circuit*, arus maksimum atau arus *short circuit* (I_{sc}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga akan menghasilkan tegangan maksimum atau tegangan *open circuit* (V_{oc}). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut dengan titik daya maksimum atau *maximum power point* (MPP).

Fill factor atau faktor pengisian adalah pengertian dari seberapa penuh kurva I-V mendekati performansi sel surya ideal yang dalam hal tersebut MPP berada pada garis putus-putus pada gambar 2.7. Nilai maksimum yang dapat diperoleh adalah 1 atau terisi seluruhnya, yang menandakan sel surya bekerja ideal.

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mencari *fill factor* dan efisiensi sel surya

Dengan;

- I_{max} : Arus maksimum terukur
- V_{max} : Tegangan maksimum terukur
- V_{oc} : Tegangan *Open Circuit*
- I_{sc} : Arus *Short Circuit*
- P_{in} : Daya masukan

2.4 Titanium Dioksida (TiO_2)

Dalam aplikasi sel surya organik, TiO_2 berfungsi sebagai semikonduktor tipe-n yang memiliki celah pita energi sangat lebar yaitu 3,2-3,8 eV (Dui Yanto, 2013). Namun, jangkauan energi matahari yang mampu diserap oleh TiO_2 hanya pada panjang gelombang ultraviolet saja, atau dibawah 388 nm dan memiliki efisiensi penyerapan yang relatif kecil (maksimal 5%) (Vu, dkk., 2010). Meskipun demikian, TiO_2 tetap menjadi pilihan terbaik karena efisiensi yang dihasilkan masih lebih baik jika dibandingkan dengan ZnO , CdSe , CdS , WO_3 , Fe_2O_3 , SnO_2 , dan Nb_2O_5 yang juga sering digunakan sebagai semikonduktor pada penelitian DSSC (Ruri Agung, 2013).

2.5 FTO

Substrat yang digunakan pada DSSC adalah jenis *Transparent Conductive Oxide* atau TCO, yang merupakan kaca transparan konduktif. Material substrat ini berfungsi sebagai bagian utama pembentuk DSSC dan muatan konduktifnya sebagai tempat muatan mengalir. Material yang umumnya digunakan adalah *Indium Tin Oxide* (ITO), dan *Fluorine-doped Tin Oxide* (SnF atau FTO) yang akan digunakan pada penelitian ini.

2.6 Elektrolit

Elektrolit yang baik bagi DSSC harus memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, stabil secara kimia dan elektrokimia, transpor ion yang tinggi, *inert*, dan memiliki konduktivitas yang baik (Buraidah, dkk, 2011). Semua sifat-sifat tersebut dipenuhi oleh polimer elektrolit PVA LiOH, dimana PVA

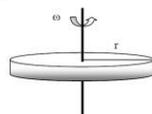
berfungsi sebagai matrik dan LiOH sebagai sumber ion, dan terbukti telah berhasil meningkatkan efisiensi DSSC. (Sahrul Saehan, dkk., 2012)

2.7 Counter Elektroda

Counter Elektroda atau elektroda bantu adalah elektroda yang berfungsi untuk mengalirkan elektron dalam rangkaian yang tersambung dengan elektroda utama. Elektroda bantu akan berfungsi sebagai katoda, sedangkan elektroda kerja berfungsi sebagai anoda.

2.8 Metode Spin Coating

Metode *spin coating* dapat diartikan sebagai sebuah metode pembentukan lapisan tipis melalui proses pemutaran atau *spin*. Bahan yang akan dibentuk lapisan tipis dibuat dalam bentuk larutan atau *gel*, yang kemudian diteteskan diatas suatu substrat (dalam hal ini adalah FTO) dan disimpan diatas piringan, yang dapat berputar dengan kecepatan yang cukup tinggi. Karena adanya gaya sentripetal ketika piringan tersebut berputar maka bahan tersebut akan tertarik ke pinggir substrat dan tersebar secara merata. Sketsa putaran dan metode *spin coating* dapat dilihat pada gambar 2.3 dan gambar 2.4.



Gambar 2.3 Piringan Berputar Spin Coating



Gambar 2.4 Skema Tahapan Spin Coating

2.9 Motor DC Brushless Fan

Dibandingkan dengan motor DC jenis lainnya, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya *brush*. Dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang, karena rotor terbuat dari magnet permanen.

2.10 Arduino Uno

Arduino UNO adalah *board* modul mikrokontroler pada ATmega 328. *Board* ini merupakan *open source* dan memiliki 14 *digital input / output pin*, yang 6 pin dapat digunakan sebagai *output PWM*, 6 *input analog*, *oscillator* Kristal 16 MHz, koneksi USB, serta tombol *reset*. Pin-pin ini bersisi semua yang diperlukan untuk mendukung pemrosesan mikrokontroler dengan memberikan sumber tegangan DC 5 Volt.

2.11 Sensor Optocoupler

Optocoupler adalah sebuah sensor yang terdiri dari 2 bagian, yaitu *transmitter* dan *receiver*, yang berada dalam suatu celah dan terletak terpisah. *Optocoupler* biasa digunakan sebagai sakelar elektrik maupun sebagai sensor kecepatan dengan

cara menghitung jeda waktu yang ditimbulkan oleh cahaya yang ditangkap oleh *receiver*.



Gambar 2.5 Sensor Optocoupler

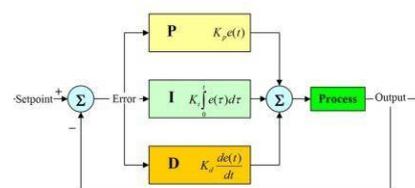
2.12 Electric Thermostat

Electric Thermostat adalah alat untuk mengatur suhu agar selalu sesuai dengan *set point* yang diinginkan. *Thermostat* biasa ditemukan pada alat-alat seperti lemari es, setrika listrik, *microwave*, inkubator, hingga alat pemanas air. *Electric thermostat* bekerja seperti *relay* pada komponen elektronika yang mengubah *switch* dalam keadaan ON dan OFF sesuai dengan keadaan sistem pada *set point* yang ditentukan. Ketika suhu belum sesuai, maka *switch* akan dalam keadaan ON hingga suhu sistem mendekati *set point*. Sebaliknya, jika suhu sudah sesuai dan untuk menghindari *over-heated*, *electric thermostat* akan berubah ke keadaan OFF

2.13 Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan suatu teknik manipulasi dalam pengemudian motor. Beberapa contoh aplikasi PWM adalah pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, *audio effect* dan penguatan, serta aplikasi-aplikasi lainnya. Aplikasi PWM berbasis mikrokontroler biasanya berupa pengendalian kecepatan motor DC, pengendalian motor *servo*, pengaturan nyala terang LED dan lain sebagainya. Dalam penelitian ini, akan digunakan transistor sebagai *switch* pengendali motor dan menggunakan teknik *switch* ON dan OFF.

2.14 Kontroler PI



Gambar 2.5 Sistem Kontrol PID

Ada 3 macam kontrol yang biasa digunakan dalam kontroler PID, yaitu kontrol PI, PD, dan PID. PI adalah kontrol yang menggunakan komponen *proportional* dan integratif, PD adalah kontrol yang menggunakan komponen *proportional* dan derivative, sedangkan PID adalah kontrol yang menggunakan komponen *proportional*, integratif, dan derivatif. Dalam pembahasan ini akan dibahas tentang dua kontroler yang dapat digunakan sendiri maupun bersamaan, yaitu kontroler PI.

Ada beberapa parameter penting dalam menentukan suatu sistem *close loop*, yaitu *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*. *Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh *output plant* untuk mencapai 90 % dari *set point* sejak pertama kali sistem dijalankan. *Overshoot* adalah nilai seberapa besar simpangan yang lebih tinggi dari nilai *steady state*. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk meng-konvergenkan *steady state*. Sedangkan *steady state error* adalah perbedaan antara *steady state output* dengan *set point* yang diinginkan. K_p pada sistem berguna untuk mengurangi *rise time*, sedangkan K_i untuk menghilangkan *steady state error*.

Tabel 2.1 Pengaruh K_p dan K_i

Respon	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State Error
K_p	Turun	Naik	-	Turun
K_i	Turun	Naik	Naik	Hilang

III. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Proses Perancangan Sistem

Proses yang dilakukan untuk perancangan sistem alat *spin coating* sederhana adalah sebagai berikut.

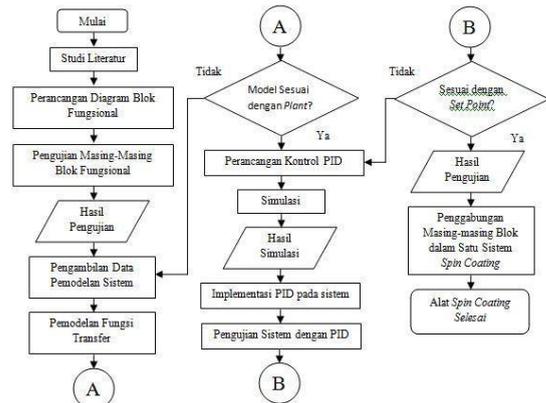
1. Menentukan blok sistem dan spesifikasi komponen yang akan digunakan;
2. Perancangan blok *driver* motor;
3. Melakukan pemodelan kontrol PI pada motor;
4. Pengimplementasian kontrol PI pada pada motor;
5. Melakukan pengukuran dan pengambilan data berdasarkan *set point* yang diberikan;
6. Perancangan blok sistem *heater*;
7. Integrasi blok yang sudah ditetapkan menjadi satu kesatuan sistem;
8. Melakukan percobaan alat *spin coating* menggunakan substrat FTO;
9. Deposisi TiO_2 pada substrat;
10. Membuat dan Memakai elektrolit dari bahan LiOH dan PVA;
11. Menyusun sel surya menjadi satu kesatuan
12. Karakterisasi I-V meter untuk mengukur performansi sel surya

3.2 Alat dan bahan

Alat-alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

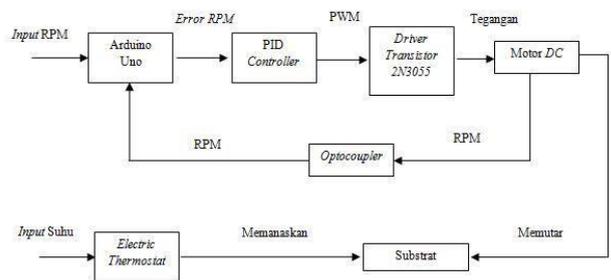
Alat	Bahan
Neraca Digital	Papan PCB (<i>Printed Circuit Board</i>)
Gelas Kimia	Plat besi
<i>Ultrasonic Bath</i>	Motor DC <i>brushless</i> (<i>fan</i>)
<i>Magnetic Stirrer</i>	Kabel <i>Jumper</i>
Catu Daya DC	Arduino UNO (<i>DFRobot</i>)
Multimeter Digital	Kompur listrik
Solder	<i>Electric Thermostat</i> (HOPE, China)
Timah	Sensor <i>Optocoupler</i>
Penyedot Timah	<i>Flourine-doped Tin Oxide / FTO</i> (Solaronix, Swiss)
Pipet	TiO_2 Anatase (Bratachem, Indonesia)
Lap Kanebo	Alkohol 70%
Gelas Ukur	<i>Aquadest</i>
Osiloskop	<i>Poly-vinyl Alcohol / PVA</i> (Bratachem, Indonesia)
Isolasi hitam	LiOH (Bratachem, Indonesia)

3.3 Perancangan Sistem Putaran *Spin Coating*



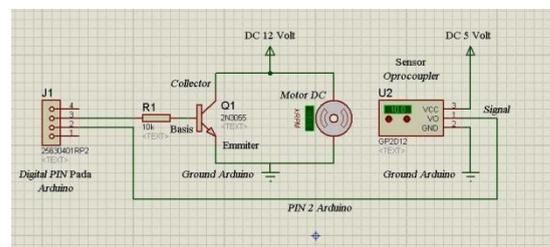
Gambar 3.6 Diagram Alir Sistem Putaran

3.4 Diagram Blok Fungsional



Gambar 3.7 Diagram Blok Fungsional

3.5 Skematik *Driver Motor*



Gambar 3.8 Skematik *Driver Motor*

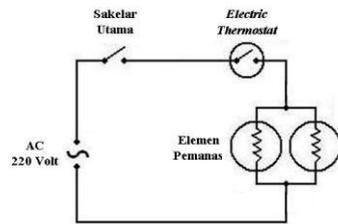
3.6 *Heater*

Thermostat yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *digital thermostat* merk HOPE tipe TCG-6131-PC, yang telah diintergrasikan dengan *Thermocouple* sebagai detektor suhu yang kemudian akan dikalibrasi secara otomatis ke besaran suhu pada saat itu (*real time*) untuk mengontrol panas kompor listrik dalam ruang *spin coating*

Pada perancangan pemanas pada sistem *spin coating*, akan digunakan prinsip kerja elemen pemanas kompor listrik untuk memanaskan *box spin coating*. Akan tetapi rata-rata pemanasan pada kompor listrik komersial tidak melibatkan pengatur suhu dalam prosesnya, sementara suhu aktual terukur yang akan dicatat adalah salah satu variabel penting yang ingin diperhatikan prosesnya terhadap deposisi substrat untuk DSSC, oleh

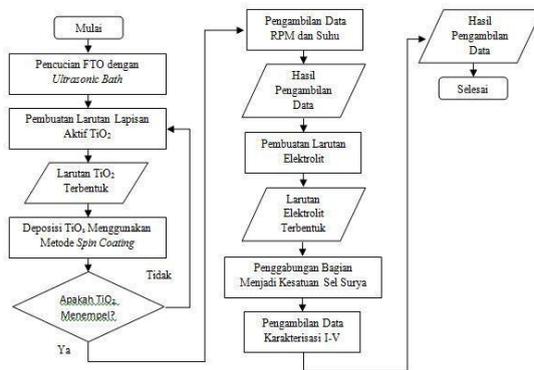
karena itu dalam penelitian ini panas dari elemen pemanas akan di kontrol suhunya dengan menggunakan *electric thermostat*.

Berikut adalah skematik rangkaian penggabungan antara elemen pemanas dengan *electric thermostat*.



Gambar 3.9 Sistem Heater

3.7 Perancangan Sistem Sel Surya



Gambar 3.10 Pembuatan Sel Surya

3.8 Pembuatan Lapisan Aktif TiO₂

Lapisan TiO₂ adalah salah satu bagian yang penting dalam pembuatan sel surya organik maupun sel surya *hybrid*. Lapisan aktif TiO₂ berfungsi sebagai penyerap spektrum cahaya matahari sebelum melepaskan elektron ke lapisan elektrolit. Dalam penelitian ini, lapisan aktif TiO₂ akan ditumbuhkan dengan menggunakan alat *spin coating* yang dirancang.

Berikut adalah tata cara pembuatan larutan TiO yang nantinya akan ditumbuhkan dengan menggunakan alat *spin coating*.

1. Serbuk TiO₂ anatase sebesar 5 gram disiapkan pada gelas kimia dan dicampur dengan *aquadest* sebanyak 20 ml.
2. Setelah dicampur, campuran ditaruh pada *magnetic stirrer* dan diaduk selama 1 jam

3.9 Pembuatan Lapisan Elektrolit

Lapisan elektrolit berfungsi sebagai penempel antara bagian *counter-elektroda* dan lapisan aktif TiO₂. Selain itu, lapisan elektrolit juga merupakan tempat tereksitasinya elektron membentuk rantai elektron dan *hole* selama proses ekesitasi elektron berlangsung.

Berikut adalah tata cara pembuatan lapisan polimer elektrolit yang akan digunakan.

1. Campurkan LiOH sebesar 0.18 gram dan *aquadest* sebesar 10 ml pada gelas kimia dan diaduk pada *magnetic stirrer* yang telah

dipanaskan *plate*-nya pada suhu 70° celcius selama 30 menit.

2. Disaat bersamaan, siapkan PVA sebesar 1.8 gram yang telah dicampur dengan *aquadest* sebesar 20 ml. Setelah tercampur, campuran ini dimasukkan pada gelas kimia campuran LiOH dan *aquadest* yang masih dipanaskan dan diputar pada *magnetic stirrer*.
3. Campuran ini kembali diaduk dan dipanaskan pada suhu 70° celcius selama 60 menit hingga berbentuk *gel*.

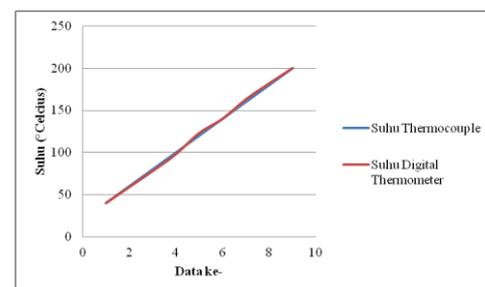
3.10 Karakterisasi I-V

Karakterisasi kurva I-V (arus dan tegangan) dilakukan untuk mengukur efisiensi sel surya yang dibuat. Karakterisasi menggunakan *electrometer* yang sudah terhubung dengan modul lampu halogen dan aplikasi *keithley*. Pengujian kurva I-V dilakukan di laboratorium karakterisasi Departemen Fisika ITB.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi *Thermocouple* pada *Thermostat*

Karakterisasi dilakukan dengan menaruh *thermocouple* dan sensor *digital thermometer* di atas kompor listrik dan dicatat hasilnya pada waktu yang bersamaan sesuai *set point* karakterisasi yang ditentukan sebelumnya. Pada penelitian ini, dipilih *range* suhu antara 40° Celcius hingga 200° Celcius dengan peningkatan masing-masing sebesar 20° Celcius dan dibandingkan dengan *digital thermometer* TM-914C.



Gambar 4.1 Hasil Karakterisasi

4.2 Karakterisasi *Electric Thermostat*

Karakterisasi *digital thermostat* dilakukan dengan cara memberikan nilai *set point* pada *display Set Value* dari *range* suhu antara 40° Celcius hingga 200° Celcius dengan peningkatan masing-masing sebesar 20° Celcius. Adapun suhu awal sistem dikondisikan pada nilai suhu ruangan sebesar 30° Celcius yang kemudian akan dicatat berapa lama waktu yang diperlukan oleh *digital thermostat* untuk mencapai *set point* suhu yang ditentukan dari nilai awal suhu 30° Celcius tersebut..

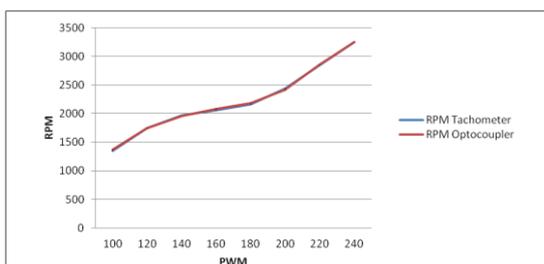
Berikut adalah hasil karakterisasi *digital thermostat* terhadap *set point* yang ditentukan.

Set Point (°Celcius)	Suhu Awal (°Celcius)	Over Shoot Suhu (°Celcius)	Waktu Menuju Stabil (Detik)
40	31	47	673
60	32	65	282
80	31	85	275
100	30	104	261
120	30	123	263
140	28	143	301
160	30	161	356
180	30	191	388
200	30	200	419

4.3 Karakterisasi Sensor *Optocoupler*

Sensor yang digunakan untuk menghitung kecepatan putar motor adalah sensor *optocoupler* yang mampu menghitung putaran hingga maksimal 3500 rpm. Sensor ini bekerja menggunakan fenomena optis antara transistor sebagai *transmitter* dan *photo-transistor* sebagai *receiver* yang nantinya akan diberikan penghalang sehingga akan terhitung sebagai logika 1 jika di antara *transmitter* dan *receiver* tidak terhalang oleh penghalang yang telah dipasang pada poros putaran motor, dan sebaliknya, sensor akan bernilai logika 0 jika di antara *transmitter* dan *receiver* tertutup oleh penghalang. Logika 1 dan 0 ini akan menjadi interupsi yang frekuensinya akan dihitung pada mikrokontroler *Arduino*.

Sebagai pembandingan untuk mengkalibrasi sensor *optocoupler*, digunakan *digital tachometer* untuk melihat tingkat akurasi sensor yang selanjutnya hasil yang tercatat pada sensor akan dibandingkan dengan hasil putaran yang tercatat pada *digital tachometer*. Adapun waktu pembacaan sensor dan waktu pembacaan pada *digital tachometer* dilakukan pada waktu yang bersamaan untuk dapat mengetahui perbedaan kecepatan putar di waktu tersebut. Adapun tegangan yang digunakan adalah 12 Volt sesuai dengan tegangan maksimal yang dapat diberikan pada motor. Berikut adalah hasil kalibrasi sensor *optocoupler* yang digunakan untuk mengukur kecepatan putar motor DC *brushless* yang dibandingkan dengan pengukuran yang terbaca pada *digital tachometer*



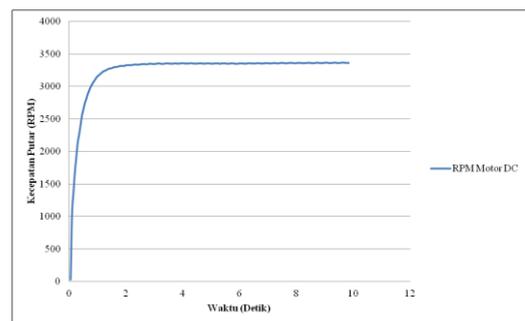
Gambar 4.2 Hasil Perbandingan

Berdasarkan data dan grafik yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa sensor *optocoupler* layak digunakan karena pengukurannya yang tidak jauh berbeda dengan pengukuran pada *digital tachometer* dengan rata-rata *error* pengukuran sebesar 0.65%.

4.4 Identifikasi Plant Motor DC *Brushless Fan*

Pada pemodelan *plant* motor DC *brushless* penelitian ini, motor DC *brushless* diberikan *input step* tegangan 12 Volt DC sesuai dengan tegangan maksimal yang mampu diberikan pada motor. Setelah itu, kecepatan putar motor yang terukur oleh sensor *optocoupler* di-*sampling* sebesar 0.05 detik untuk diambil datanya. Nilai kecepatan putar dari pembacaan sensor kemudian akan dibentuk kedalam bentuk grafik agar dapat dicari nilai fungsi transfernya menggunakan pendekatan metode grafik seperti yang dilakukan oleh Unis Badri, dkk. (2012)

Berikut adalah grafik respon kecepatan motor DC *brushless* yang digunakan dan telah di-*sampling* sebesar 0.05 detik.



Gambar 4.3 Grafik Respon Motor DC *Brushless*

Dapat dilihat dari gambar 4.18 bahwa dengan menggunakan pendekatan metode grafik, respon mencapai kondisi *steady state* pada sumbu Y (RPM) sebesar 3363 RPM. Karena nilai *input* tegangan yang diberikan adalah sebesar 12 Volt, maka didapatkan nilai K sebesar 280.4167 yang memiliki arti bahwa penguatan 1 Volt adalah sebesar 280.4167 RPM. Sedangkan nilai τ sebesar 0.632 dari kondisi *steady state* adalah pada 2119.95 RPM dan nilai τ di titik tersebut adalah sebesar 0.25 detik.

Melihat parameter yang dibutuhkan, maka dapat dimasukkan kedalam persamaan berikut.

Sehingga didapatkan rumus fungsi transfer sebagai berikut.

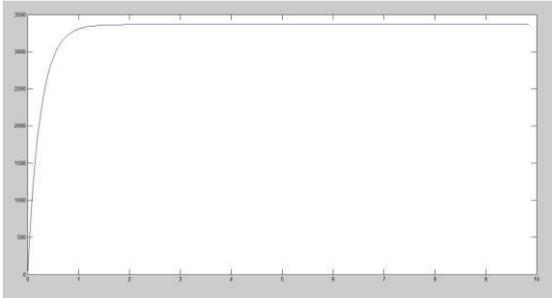
4.5 Identifikasi dan Validasi Data

Setelah mendapatkan estimasi pendekatan fungsi transfer yang akan digunakan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan identifikasi dan validasi data eksperimen yang didapat dengan data simulasi pada *software* MATLAB.

Setelah memasukkan fungsi *Numerator* (NUM) dan *Denominator* (DEN) sesuai fungsi transfer yang didapat pada MATLAB, langkah selanjutnya adalah memberikan waktu *sampling* dari mulai 0.05 detik hingga 9.85 detik (sesuai dengan waktu pada data eksperimen) dan dilanjutkan dengan melihat respon sistem saat

diberikan *input step* sesuai dengan rentang waktu *sampling* yang diberikan sebelumnya. Setelah itu, nilai sistem Y akan dikalikan 12 sesuai dengan penguatan *step* yang diberikan yaitu sebesar 12 Volt dan di *plot*-kan kembali nilai T dan Y kemudian dilihat kembali *respon step*-nya yang merupakan data simulasi dan dibandingkan dengan data eksperimen yang dilakukan

Berikut adalah grafik respon *step* dari data simulasi menggunakan MATLAB.



Gambar 4.4 Grafik Respon Data Simulasi

Meskipun memiliki *error* validasi yang kecil, sebelum memutuskan bahwa fungsi transfer tersebut adalah yang paling mendekati sistem, maka dilakukan uji data statistik untuk melihat tren data prediksi dan data aktual pada sistem dengan menggunakan *recursive least square* (RLS) yang terdiri dari *mean square error* (MSE), *normalized root mean square error* (NRMSE), *normalized mean bias error* (NMBE), dan nilai *pearsons correlation coefficient*.

NRMSE	MSE	NMBE	Pearsons
0.042918	2392.989	1.114622	0.71

Nilai NRMSE menunjukkan besar penyimpangan hasil prediksi dari nilai data aktual tanpa melihat arah data penyimpangannya. Selama hasil simulasi masih mengikuti tren data aktual, maka nilai NRMSE akan cenderung kecil. Nilai NRMSE pada validasi parameter fungsi transfer yang akan digunakan adalah 0.042918 dan masih cenderung bernilai kecil.

Nilai MSE menyatakan nilai rata-rata kuadrat *error*. Selama nilai data simulasi masih mengikuti data aktual, nilai rata-rata kuadrat *error* akan cenderung kecil. Nilai MSE pada fungsi transfer ini bernilai 2392.982 dan masih dapat digolongkan kecil mengingat nilai pada data simulasi dan data aktual paling besar adalah pada range 3500.

Nilai NMBE bernilai positif 1.11 mengindikasikan bahwa nilai rata-rata hasil simulasi lebih tinggi dari nilai eksperimen (*over prediction*), sementara nilai *pearsons correlation coefficient* bernilai positif akan menyatakan hasil data simulasi mengikuti tren data aktual. Pada tabel 4.6, nilai *Pearsons* bernilai positif 0.71 yang menyatakan bahwa hasil data simulasi mengikuti tren data aktual pada eksperimen.

Berdasarkan data identifikasi pada MATLAB dan validasi parameter menggunakan metode RLS,

maka dapat disimpulkan bahwa fungsi transfer $G(s)$ yang diprediksikan dapat merepresentasikan sifat dan respon sistem yang akan digunakan.

4.6 Respon Step Sistem

Setelah mendapatkan model sistem yang paling mendekati *plant*, langkah selanjutnya adalah melihat perilaku sistem untuk memastikan apakah sistem memerlukan *controller* untuk menghasilkan nilai keluaran yang diinginkan. Peninjauan dapat dilakukan dengan melihat respon sistem jika diberi masukan berupa sinyal *step*. Gambar 4.8 adalah respon sistem dengan *input* nilai *step* pada *software* MATLAB.

Berdasarkan hasil simulasi pada *software* MATLAB, sistem memiliki nilai *rise time* 0.549 s, *settling time* 0.978 s, *peak time* 1.5 s, *steady state* 280, dan nilai *overshoot* sebesar 0%. Nilai *overshoot* 0% juga mendekati dengan nilai *overshoot* pada data aktual yang diketahui dengan persamaan sebagai berikut.

Meskipun demikian, nilai *steady state* yang mencapai nilai 280 merupakan salah satu faktor yang perlu diperhatikan, sehingga akan diimplementasikan sebuah kontroler PID untuk meminimalisasi dan memaksimalkan kinerja sistem agar sesuai dengan kinerja yang diharapkan

4.7 Desain dan Implementasi Kontroler PI

Setelah mendapatkan fungsi transfer yang mendekati sistem, langkah selanjutnya adalah merancang desain kontroler PID yang terdiri dari pencarian penguat atau konstanta proporsional (K_p), konstanta integrator (K_i), dan konstanta derivatif. Konstanta proporsional adalah gain atau penguatan yang akan dikalikan pada sistem untuk mempercepat *settling time* dan *rise time* namun akan menaikkan *overshoot*. Konstanta integrator adalah konstanta yang berfungsi memperkecil *error steady state* dan meminimalisasi *overshoot*. Sementara konstanta derivatif berfungsi untuk menaikkan *rise time* dan mempercepat respon pada sistem.

Konstanta Proporsional

Pencarian konstanta proporsional atau K_p dilakukan dengan mencoba satu per-satu *gain* atau penguatan yang ada pada *range rootlocus* setelah sebelumnya sistem diberi input *step* dalam kondisi *open loop*

Berdasarkan hasil yang ada pada *rootlocus*, terdapat *gain* atau penguat yang terbaik untuk diimplementasikan pada sistem. Langkah selanjutnya adalah melakukan *tuning* pada *gain* yang ada pada *range rootlocus* yang kemudian dilihat bagaimana karakteristiknya kembali setelah diberikan *input* fungsi *step* dalam sistem *close loop*

yang telah diberi *gain* yang ditentukan sebelumnya. *Gain* inilah yang selanjutnya akan menjadi konstanta proporsional atau K_p pada sistem. Berikut adalah data karakteristik fungsi transfer dengan penambahan *gain* yang ada pada *range rootlocus*

Gain	Peak Time (s)	Overshoot (%)	Final Value	Settling Time (s)	Rise Time (s)
0.000103	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.00185	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.0032	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.00447	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.00562	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.00692	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.00826	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.00947	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195
0.0106	0.006	0	0.996	0.00348	0.00195

Berdasarkan tabel di atas, perubahan *gain* dari *range rootlocus* tidak memberikan efek perubahan pada nilai respon, namun respon ini lebih baik jika dibandingkan dengan nilai respon *step* sistem sebelumnya yang memiliki nilai *rise time* 0.549 s, *settling time* 0.978 s, *peak time* 1.5 s, dan *steady state* 280. Akan tetapi sistem masih memiliki *error steady state* karena nilai akhir masih sistem belum mendekati 1. Oleh karena itulah sistem memerlukan penambahan nilai konstanta integral atau K_i untuk meminimalisasi nilai *error steady state* tersebut.

Konstanta Integral

Pencarian konstanta integrator atau K_i dilakukan untuk meminimalisasi nilai *steady state* atau *final value* sistem yang belum mendekati 1. Pencarian nilai K_i dilakukan dengan mengalikan fungsi transfer $G(s)$ dengan fungsi integratornya berupa 1 *zero* yang mendekati nol. Adapun nilai fungsi yang tepat dipilih dengan melihat respon transien sistem terhadap *gain* pada *range rootlocus* yang sebelumnya telah ditentukan dengan memberi input *step* dalam kondisi *open loop*

Setelah mengetahui *range gain* yang akan digunakan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan *tuning* fungsi integrator berupa nilai *zero* yang mendekati nol. Untuk menentukan nilai fungsi yang digunakan, dapat dilihat dari respon transien sistem tersebut setelah diberikan input fungsi *step*, apakah telah memberikan nilai respon yang cukup baik atau belum, dan berikut adalah fungsi integrator yang digunakan

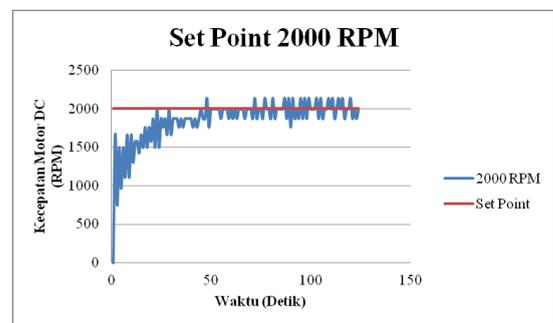
Berikut adalah data karakteristik fungsi transfer dengan penambahan *gain* yang ada pada *range rootlocus* dan dikalikan dengan fungsi integrator.

Gain	Peak Time (s)	Overshoot (%)	Final Value	Settling Time (s)	Rise Time (s)
0.000293	100	0	1	71.4	40.8
0.00481	14	0	1	7.23	3.38
0.00717	14	0	1	5.67	2.32
0.00937	12	0	1	4.86	1.79

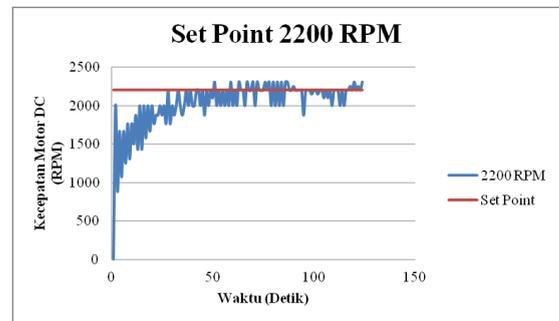
Pada respon transien yang ditunjukkan, sistem telah menghasilkan *error steady state* 0 dengan *final value* 1, *overshoot* yang bernilai 0, dan nilai *settling time* dan nilai *rise time* yang sangat cepat, maka sistem tidak perlu ditambahkan kontrol derivatif

4.8 Hasil Pengujian Kontroler PI

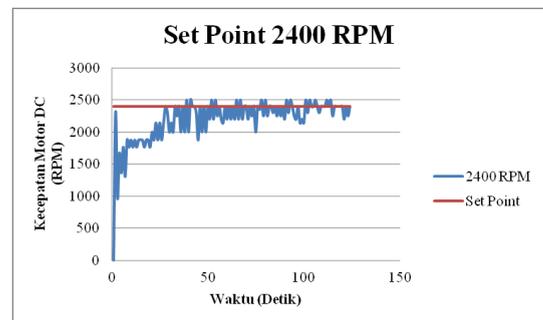
Setelah merancang kontroler PI dengan menggunakan *software* MATLAB, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah menguji dan membuktikan kesesuaian teori dengan melakukan pengimplementasian langsung kontroler PI pada sistem. Adapun *set point* yang digunakan sebagai acuan adalah pada rentang 1000 RPM hingga 3000 RPM dengan peningkatan sebesar 200 RPM di tiap proses pengambilan data. Berikut adalah pengimplementasian kontroler PI pada sistem motor DC *brushless*.



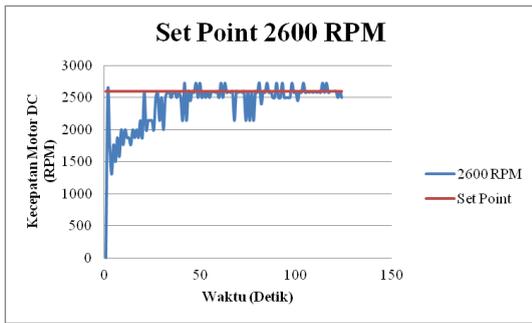
Gambar 4.5 Set Point 2000 RPM



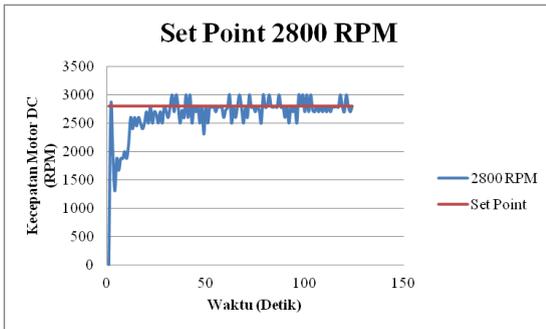
Gambar 4.6 Set Point 2200 RPM



Gambar 4.7 Set Point 2400 RPM



Gambar 4.8 Set Point 2600 RPM



Gambar 4.9 Set Point 2800 RPM

Berdasarkan grafik diatas, terlihat bahwa sistem pengontrol kecepatan putar motor DC brushless mampu mencapai nilai set point yang diberikan pada sistem, yaitu pada kecepatan putar 2000 RPM, 2200 RPM, 2400 RPM, 2600 RPM, serta 2800 RPM. Meskipun demikian, masih terdapat overshoot selisih antara kecepatan putar dan set point yang diberikan yang salah satu faktor penyebabnya adalah keterbatasan kemampuan sensor untuk menerima interupsi logika 0 dan 1 dalam kecepatan tinggi dan secara langsung akan memengaruhi kalkulasi delay dan perhitungan error dalam kontroler PI yang diberikan pada sistem. Meskipun demikian, sistem masih dapat menjaga putaran motor agar mencapai set point yang diberikan.

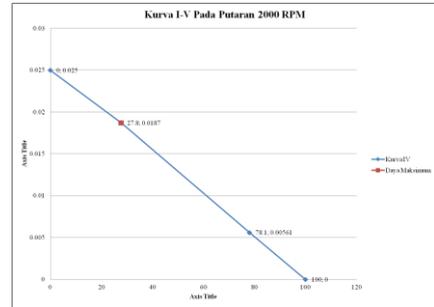
Dengan membandingkan hasil eksperimen dan simulasi, dapat disimpulkan bahwa kontroler PI bekerja dan mampu mencapai nilai yang ditentukan, hanya saja memiliki respon sistem yang berbeda. Pada hasil simulasi, sistem mulai memberikan keluaran pada 1.79 detik dan mulai stabil terhadap set point pada 4.86 detik dengan error steady state 0, namun pada hasil eksperimen masih terdapat beberapa error steady state yang terjadi pada sistem, yaitu selisih antara nilai output sistem saat keadaan steady dengan nilai set point yang telah ditentukan sebelumnya.

Berdasarkan data diatas, diapatkan kesimpulan bahwa pengontrol PI yang diimplementasikan pada sistem pengatur kecepatan motor DC brushless mampu menghasilkan respon performansi yang cukup baik dengan rata-rata error steady state sebesar 41.91 RPM dan rata-rata nilai overshoot sebesar 4.13% dari nilai set point yang diberikan

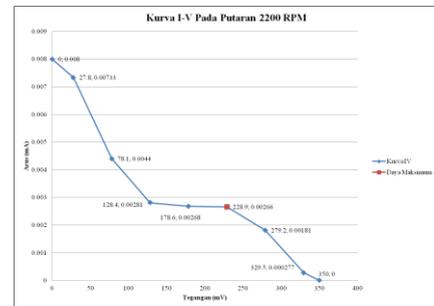
4.9 Pengaruh Kecepatan Putar Spin Coating

Penelitian tentang pengaruh kecepatan putar spin coating dilakukan dengan membandingkan range kecepatan putar 2000 RPM hingga 3000

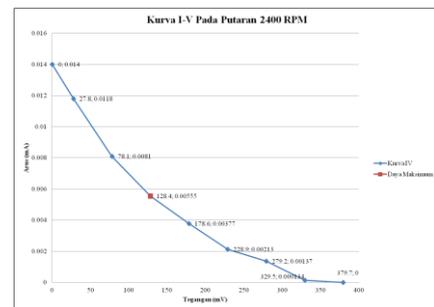
RPM dengan kenaikan masing-masing sebesar 200 RPM. Parameter kinerja yang dihasilkan dilihat dari hasil karakterisasi I-V (arus dan tegangan) dan pengaruhnya pada efisiensi yang dihasilkan. Berikut adalah hasil karakterisasi I-V untuk melihat pengaruh kecepatan putar spin coating pada kecepatan 2000 RPM, 2200 RPM, 2400 RPM, 2600 RPM, dan 2800 RPM yang dilakukan pada kondisi suhu ruangan (25° celcius).



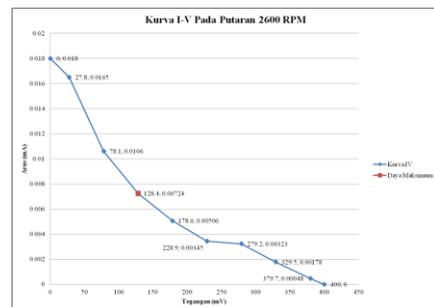
Gambar 4.10 Kurva IV 2000 RPM



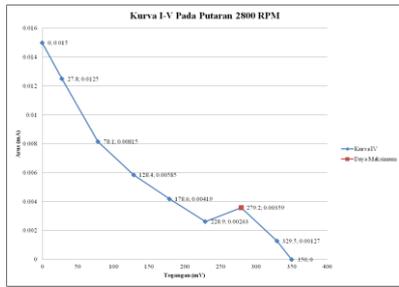
Gambar 4.11 Kurva IV 2200 RPM



Gambar 4.12 Kurva IV 2400 RPM



Gambar 4.13 Kurva IV 2600 RPM



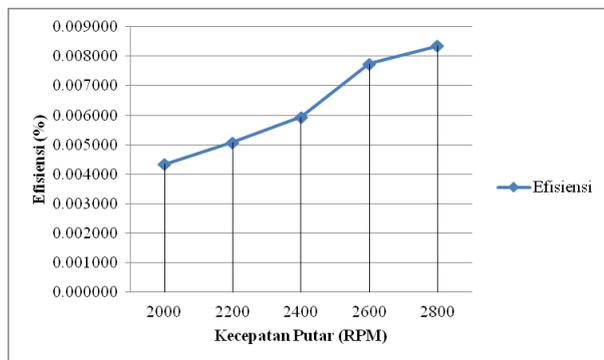
Gambar 4.14 Kurva IV 2800 RPM

Tabel dibawah menunjukkan perbandingan kinerja sel surya berdasarkan kecepatan putar yang digunakan. *I short circuit* adalah arus maksimum yang diukur pada saat tegangan terukur 0 volt sedangkan *V open circuit* adalah tegangan maksimum pada saat arus terukur 0 ampere. Daya maksimum adalah faktor perkalian terbesar antara tegangan dan arus saat karakterisasi, sedangkan *fill factor* menunjukkan rasio kurva IV sel surya terhadap kurva sel surya ideal (bernilai maksimum 1). Efisiensi yang dihasilkan adalah perbandingan antara daya maksimum sel surya dengan daya masukan yang diberikan pada sel surya dikali 100%. Adapun perhitungan daya maskan atau Pin adalah sebagai berikut

Dengan,

- I_{in} = I lampu halogen per-satuan luas
- A = Luas penampang sel surya
- P_{in} = Daya masukan

Kecepatan Putar (RPM)	<i>I Short Circuit</i> / I_{sc} (mA)	<i>V Open Circuit</i> / V_{oc} (mV)	Daya Maksimum (mW)	Fill Factor	Efisiensi (%)
2000	0.0259	86.33	0.000520	0.232	0.004332
2200	0.0065	325.00	0.000609	0.288	0.005074
2400	0.0113	282.50	0.000712	0.223	0.005936
2600	0.0142	355.00	0.000929	0.184	0.007744
2800	0.0113	376.67	0.001002	0.235	0.008352



Gambar 4.15 Grafik Efisiensi

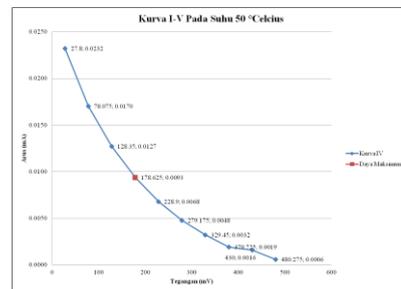
Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan hasil bahwa kecepatan putar berpengaruh terhadap efisiensi yang dihasilkan oleh sel surya. Semakin besar kecepatan putar akan berpengaruh terhadap

besarnya efisiensi secara linier. Hal ini disebabkan kecepatan putar yang mempengaruhi ketipisan dari film tipis TiO_2 yang terdeposisi, semakin besar putaran yang digunakan maka film akan semakin tipis. Sebaliknya, dalam kecepatan putar yang kecil, film yang dihasilkan akan semakin tebal. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Musa Mohammd Zahidi, dkk, (2010) dalam penelitian yang berjudul “*Effects of Spin Coating Speed on Nanostructured Titanium Dioxide Thin Film Properties*”.

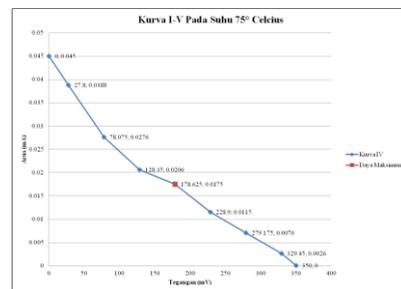
Semakin tipisnya deposisi TiO_2 yang dihasilkan akan berpengaruh terhadap homogenitas partikel TiO_2 yang ditumbuhkan, sehingga lapisan TiO_2 yang ditumbuhkan akan semakin transparan dan dapat menyerap sinar matahari secara maksimal. Akan tetapi, pengaruh ini juga harus dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan SEM untuk dapat melihat ketipisan lapisan TiO_2 yang ditumbuhkan pada substrat FTO.

4.10 Pengaruh Suhu pada Proses Spin Coating

Setelah mengetahui pengaruh kecepatan putar terhadap efisiensi yang dihasilkan, selanjutnya melihat pengaruh perubahan suhu dalam proses *spin coating* terhadap efisiensi yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, suhu yang digunakan adalah pada saat suhu 50° celcius dan suhu 75° celcius. *Thermostat* diatur untuk mencapai *set point* yang diinginkan dan setelah mencapai suhu tujuan, FTO ditempelkan pada *substrate holder* dan diputar menggunakan kecepatan putar 2800 RPM.



Gambar 4.16 Kurva IV 2800 RPM 50° C



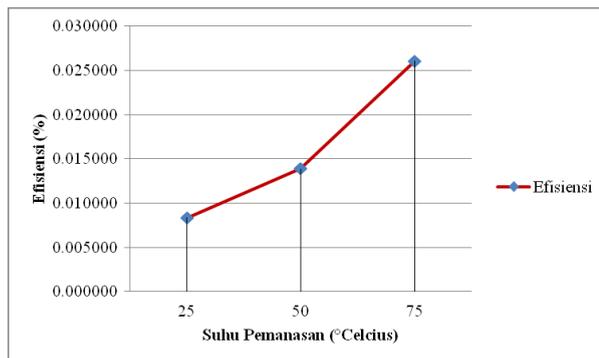
Gambar 4.17 Kurva IV 2800 RPM 75° C

Setelah mengetahui respon kinerja sel surya terhadap suhu pemanasan dalam proses *spin coating*, langkah selanjutnya adalah mengetahui korelasi antara suhu pemanasan dengan kinerja sel surya yang dilihat dari efisiensi yang dihasilkan. Tabel dibawah menunjukkan perbandingan kinerja

sel surya berdasarkan suhu pemanasan dalam proses *spin coating*

Suhu (°Celsius)	<i>I Short Circuit / Isc</i> (mA)	<i>V Open Circuit / Voc</i> (mV)	Daya Maksimum (mW)	Fill Factor	Efisiensi (%)
25	0.0113	376.67	0.001002	0.235	0.008352
50	0.0199	398.00	0.001668	0.211	0.013903
75	0.0381	381.00	0.003126	0.215	0.026049

Suhu pada 25° celsius adalah suhu tanpa pemanasan dan mengacu pada percobaan yang dilakukan sebelumnya. Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat grafik perubahan suhu yang diberikan terhadap efisiensi adalah sebagai berikut



Gambar 4.18 Pengaruh Suhu pada Efisiensi

Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan hasil bahwa perubahan suhu dapat mempengaruhi kinerja sel surya dilihat dari efisiensi yang dihasilkan. Semakin besar suhu pemanasan yang diberikan, efisiensi yang dihasilkan juga semakin baik. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Vorotilov, dkk. (1993) dalam penelitiannya yang mendapatkan kesimpulan bahwa semakin besar suhu pemanasan akan berpengaruh terhadap ketipisan film yang ditumbuhkan. Suhu yang tinggi berpengaruh terhadap penguapan zat terlarut yang tercampur pada TiO_2 yang tentu dapat menjadi *defect* jika tidak diantisipasi. Zat terlarut yang dimaksud dapat berupa air sebagai pelarut TiO_2 , uap air yang ada di sekitar proses *spin coating*, maupun zat atau partikel lainnya yang tidak dapat terlihat secara langsung karena ukurannya yang sangat kecil. Pemanasan di suhu tinggi akan memaksa zat dan partikel tersebut untuk menguap dengan cepat meninggalkan substrat dan TiO_2 akan terdepositasi homogen dengan baik pada substrat FTO.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Telah berhasil dirancang sebuah alat *spin coating* sederhana terkontrol kecepatan putar (RPM) dan suhu (Celsius) dengan menggunakan mikrokontroler *Arduino Uno*, motor DC *brushless fan*, serta sensor *optocoupler* sebagai sistem kontrol putaran dan menggunakan *electric thermostat*, sensor *thermocouple*, serta filamen pemanas kompor listrik sebagai sistem pemanasan pada alat *spin coating* yang dibuat.

2. Berdasarkan hasil simulasi, parameter kontrol yang paling cocok digunakan pada sistem pengontrol kecepatan putar motor DC *brushless fan* ini adalah kontrol PI (*proportional-integral*) dengan nilai gain $K_p = 0.106$ dan gain $K_i = 0.006559$. Sistem dapat mencapai nilai *set point* yang ditentukan dengan mengimplementasikan nilai kontanta tersebut ke dalam sistem.
3. Sistem dengan kontrol PI yang dirancang menghasilkan nilai rata-rata *error steady state* pada putaran motor sebesar 41.91 RPM dan rata-rata nilai *overshoot* sebesar 4.13 % melalui 11 nilai *set point* yang berbeda dalam range 1000 RPM hingga 3000 RPM.
4. Telah berhasil dibuat komposisi larutan TiO_2 yang dideposisi pada FTO dalam proses *spin coating* yaitu sebesar 25 gram TiO_2 dan 20 ml *aquadest* dan juga telah berhasil dibuat komposisi lapisan elektrolit menggunakan campuran LiOH, PVA, dan *aquadest* dengan komposisi LiOH sebesar 0.18 gram yang dicampur *aquadest* 10 ml serta PVA sebesar 1.8 gram yang dicampur *aquadest* sebesar 20 ml
5. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan kesimpulan bahwa kecepatan putar pada proses *spin coating* mempengaruhi kinerja sel surya jika dilihat dari efisiensi yang dihasilkan. Efisiensi sel surya meningkat secara linier dari kecepatan putar 2000 RPM hingga 2800 RPM dengan efisiensi terendah sebesar 0.004% dan efisiensi tertinggi sebesar 0.008%
6. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan kesimpulan bahwa pengaruh suhu pada proses *spin coating* mempengaruhi efisiensi sel surya yang dibuat. Kecepatan putar 2800 RPM yang menghasilkan efisiensi terbaik kemudian dicoba dengan menambahkan penambahan suhu dalam proses pematurnannya dalam suhu 50° celsius dan 75° celsius. Didapatkan hasil bahwa dalam suhu 50° celsius efisiensi sel surya mencapai 0.013% dan pada suhu 75° celsius efisiensi sel surya mencapai 0.026% atau dapat disimpulkan bahwa efisiensi meningkat sesuai dengan peningkatan suhu.

5.2 Saran

Dalam rangka pengembangan penelitian, adapun saran yang dapat dilakukan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan fungsi transfer untuk menemukan parameter kontroler PID sebaiknya menggunakan metode *system identification* atau ARX pada MATLAB karena memungkinkan untuk pemodelan sifat sistem yang lebih baik dibandingkan dengan pendekatan metode grafik.
2. Dalam proses penelitian, alat *spin coating* yang dirancang tidak menggunakan tutup yang mungkin dapat menimbulkan *defect* pada deposisi TiO_2 pada substrat. Oleh karena itu penulis menyarankan agar pada penelitian selanjutnya dapat ditambahkan tutup pada ruang *spinner* atau akan lebih baik juga ruang *spinner* berada dalam keadaan kedap udara (dapat menggunakan kompresor untuk

- menghisap udara bebas atau dengan melakukan proses *spin coating* dalam *glove box*.
3. Proses pemanasan pada alat *spin coating* dapat ditingkatkan hingga *range* 200° celcius dan proses pematangan susbrat juga dapat ditingkatkan hingga *range* 8000 RPM untuk dapat melihat bagaimana respon kinerja sel surya dalam kondisi putaran dan suhu yang lebih tinggi.
 4. Proses pemberian dan penempelan TiO₂ sebaiknya juga di antisipasi bagaimana untuk menempelkan dan mengambil FTO dengan menggunakan tangan ketika proses sudah selesai, khususnya pada penempelan dan pengambilan di saat suhu tinggi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rumi, Jalaludin. 2010. *Tenaga Surya Sebagai Peluang Energi Terbarukan Indonesia*. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluhnoember.
- [2] Mashudi. 2008. *Studi Pengaruh Pembangunan PLTP Subang 150 mW di Gunung Tangkuban Perahu Terhadap Tarif Listrik Regional Jawa Barat*. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluhnoember.
- [3] Rahman, Dui Yanto. 2013. *Studi Pengembangan Sel Surya Grafit/TiO₂ dengan Penyisipan Tembaga (Cu/Grafit/TiO₂) Menggunakan Metoda Elektroplating*. Bandung: Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung.
- [4] Nuryadi, Ratno.,Aprilia, Lia., dan Akbar Junior, Zico Alaia. 2010. *Fabrikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Warna Berbasis Semikonduktor TIO₂ dengan Metode Elektroforesis*. Jakarta: Pusat Teknologi Material, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
- [5] Rustami, Erus. 2008. *Sistem Kontrol Kecepatan Putar Spin Coating Berbasis Mikrokontroler Atmega8535*. Bogor: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.
- [6] Septina, Wilman. 2007. *Pembuatan Prototipe Dye-Sensitized Solar Cell*. Bogor: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.
- [7] Shaw, Gary A., dan K.Burke, Hsiao-hua. 2013. *Spectral Imaging for Remote Sensing*. JPL Airborne Earth Science Environ.44 (2/3) 2013 pp.165-178
- [8] National Renewable Energy Laboratory Team. 2013. *Reporting Solar Cell Efficiencies in Solar Energy Materials and Solar Cells*. Energy Materials and Solar Cells Vol 92 pp. 371-373.
- [9] Murakami, Hirohiko., dan Nagata, Tomohiro. 2009. *Development of Dye-Sensitized Solar Cells*. Ulvac Technical Journal (English) No.70E-2009.
- [10] Dye-Sensitized Solar Cell Works. *Dye-Sensitized Solar Cell with Animation* [Internet]. Dikutip 30 Juli 2014: Tersedia dari www.thesolarspark.co.uk
- [11] Halme, Janne., Vahermaa, Paula., Lund, Peter., and Mietunnen, Kati. 2010. *Device Physics of Dye Solar Cell*. Weineheim: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co.
- [12] Sengupta, Rajatendu. 2010. *Effect of Doping of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Phenolic Based Carbon Fiber Reinforced Nanocomposites*. Journal of Physics Conference Series.
- [13] Naira, Prabitha B. 2013. *Photochemistry and Solar Energy for Dye-Sensitized Solar Cell*. Journal of Chemistry.
- [14] Wahyuono, Ruri Agung., Risanti, Doty D., dan Shirosaki, Tomohiro. 2013. *Photoelectrical Performance of DSSC with Monodisperse and Polydisperse ZnO SPs*. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluhnoember.
- [15] Karim, Saeful., Danawan, Agus., dan Suhandi, Andi. 2005. *Rancang bangun Alat Spin-Coating untuk Deposisi Lapisan Tipis Semikonduktor*. Bandung: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia.
- [16] Chou, Kan-Sen., Huang, Ya-Yu. 2009. *Studies on the Spin Coating Process of Silica Films*. Department of Chemical Engineering: National Tsing Hua University Taiwan.
- [17] Gamazo Real, Jose Carlos., dkk. 2010. *Position and Speed Control of Brushless DC Motors using Sensorless Techniques and Application Trends*. Department of Signal Theory: University of Valladolid (UVA) Spain.
- [18] Please, Colin P. dan Munch, Andreas. 2009. *System Control of Brushless Motor DC Using CPLD*. AIP Publishing Volume 23 Issue 10.
- [19] DFRDuino Uno Datasheet. *Microcontroller DFRDuino Uno V.3* [Internet]. Dikutip 11 Oktober 2013. Tersedia dari www.dfrobot.com
- [20] Suryaningsih, Vany. 2013. *Rancang Bangun Kecepatan Putar Motor DC Brushless dengan Kontrol PID*. Bandung: Program Studi S1 Teknik Fisika Universitas Telkom.
- [21] Laware A.R dkk. 2013. *Real Time Temperature Control System Using PID Controller and SCADA*. Research Guide, Government College of Engineering, Department of Electrical Engineering, Pune, India.
- [22] Al-Numay, Mohammed., dan Adamali Shah, NM. 2010. *Averaging Method for PWM DC-DC Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode With Feedback*. Department of Electrical Engineering KingSaudi University.
- [23] Hendra Cordova, Firmansyah. 2010. *Perancangan Sistem Kontrol PID Pada Proses PH Berbasis Pembagian Region Kurva Titrasi*. Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluhnoember.
- [24] Planita Byaztuti, Ulfah. 2014. *Sistem Kontrol Laju Aliran Hidrogen dalam PEMFC Menggunakan Metode*

PID. Bandung: Program Studi S1 Teknik Fisika, Universitas Telkom

[25] Firdaus, Idam. 2014. *Analisis Pengaruh Kontrol Suhu Terhadap Performansi PEMFC Menggunakan Kontrol PID*. Bandung: Program Studi S1 Teknik Fisika, Universitas Telkom

[26] Sahrul Hudha, Lalu., P.S, Setyawan., dan Masruroh. 2010. *Rancang Bangun Mini System Spin Coating untuk Pelapisan Sensor QCM (Quad Crystal Microbalance)*. Malang: Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya

[27] Vorotilov, Konstantin., Petrovsky, Vladimir., dan Vasiljev, Vladimir. 1993. *Spin Coating Process of Sol- Gel Silicate Film Deposition: Effect of Spin Speed and Processing Temperature*. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 5, 173-183 (1995).

[28] Musa Mohammad Zahidi, dkk. 2010. *Effects of Spin Coating Speed on Nanostructured Titanium Dioxide Thin Film Properties*. University Kebangsaan Malaysia.

[29] Novitasari, Aldila Talia. 2013. *Studi Pengaruh Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap aktivitas Antioksidan Selai Berbahan Dasar Buah Rasberi*. Bandung: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia.