

**APLIKASI FPGA SEBAGAI PENGENDALI KECEPATAN
PUTARAN MOTOR DC PADA SISTEM *SPIN COATING***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ELEKTRONIKA

*Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*



**DISUSUN OLEH:
NANANG AGUNG A.
NIM. 0810630078-63**

**KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2015**

LEMBAR PERSETUJUAN

**APLIKASI FPGA SEBAGAI PENGENDALI KECEPATAN
PUTARAN MOTOR DC PADA SISTEM *SPIN COATING***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ELEKTRONIKA

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
NANANG AGUNG A.
NIM. 0810630078-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II

Mochammad Rif'an, ST., MT.

Eka Maulana, ST., MT., M.Eng.

NIP. 19710301 200012 1 001

NIK. 201201841130 1 001

LEMBAR PENGESAHAN
APLIKASI FPGA SEBAGAI PENGENDALI KECEPATAN
PUTARAN MOTOR DC PADA SISTEM *SPIN COATING*

SKRIPSI
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ELEKTRONIKA

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

NANANG AGUNG A.

NIM. 0810630078-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 27 Agustus 2015

DOSEN PENGUJI

Ir. Nurussa'adah, MT.

NIP. 19680706 199203 2 001

Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, ST., MT.

NIP. 19700329 200012 1 001

Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.Sc.

NIP. 19590304 198903 1 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D.

NIP. 19741203 200012 1 001

PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karuniaNya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Aplikasi FPGA sebagai Pengendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Sistem *Spin Coating*”. Skripsi ini disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan ketulusan dan kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih kepada:

- Allah SWT yang memberikan rizqi, rahmat, hidayah, serta ma’uanNya kepada penulis, baik dalam hidup penulis pada umumnya, maupun hingga terselesaikannya skripsi ini pada khususnya,
- Bapak dan ibu, atas segala nasihat, dukungan, kasih sayang, perhatian dan kesabarannya di dalam membesarkan dan mendidik penulis, khususnya ibu yang telah banyak memberikan dukungan, baik moral maupun material, serta mendoakan kelancaran penulis hingga terselesaikannya skripsi ini,
- Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya,
- Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya,
- Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. sebagai Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya,
- Ibu Nurussa’adah, Ir, M.T. sebagai Ketua Kelompok Dosen Keahlian Elektronika Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya,
- Bapak Mochammad Rif’an, S.T., M.T. sebagai Dosen Pembimbing I atas segala bimbingan, pengarahan, gagasan, ide, saran serta motivasi yang telah diberikan,
- Bapak Eka Maulana, S.T., M.T., M.Eng. sebagai Dosen Pembimbing II atas segala bimbingan, pengarahan, gagasan, ide, saran serta motivasi yang telah diberikan,
- Staf Rekording, staf Pengajaran, staf Pengajar, dan staf Ruang Baca Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu segala urusan penulis selama ini,

- Teman-teman seperjuangan skripsi
- Denny Satrio N. atas referensi-referensi yang sangat membantu
- Teman-teman Concordes angkatan 2008 yang telah berbagi ilmu dengan penulis dan selalu memberikan semangat,
- Seluruh teman-teman, senior serta semua pihak yang tidak mungkin untuk dicantumkan namanya satu-persatu, terima kasih banyak atas bantuan dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Penulis berharap, semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Agustus 2015

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL.....	vi
ABSTRAK.....	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Spin Coating	4
2.2 FPGA (Field Programmable Gate Array) Nexys 2	5
2.3 Motor DC	7
2.4 PWM (Pulse Width Modulation)	9
2.5 <i>Rotary Encoder</i>	9
BAB III METODOLOGI.....	11
3.1 Penentuan Spesifikasi Alat.....	11
3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat	11
3.2.1 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>).....	11
3.2.2 Perancangan dan Penyusunan Perangkat Lunak.....	11
3.3 Pengujian Alat	12
3.3.1 Pengujian Tiap Blok	12
3.3.2 Pengujian Keseluruhan Sistem	12
3.4 Pengambilan Kesimpulan.....	12

BAB IV PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT.....	13
4.1 Perancangan Sistem.....	13
4.2 Perancangan Mekanik Alat	14
4.3 Perancangan Rangkaian <i>Driver</i> Motor DC	16
4.4 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Lunak.....	18
4.4.1 Perancangan <i>encoder keypad</i> matriks 4x4.....	19
4.4.2 Perancangan rangkaian <i>feedback controller</i>	20
4.4.3 Perancangan pembangkit sinyal PWM	21
4.4.4 Perancangan penerima pulsa <i>rotary encoder</i>	22
4.4.5 Perancangan pengondisi data <i>output</i>	23
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS	26
5.1 Pengujian Catu Daya	26
5.2 Pengujian Input/Output	27
5.3 Pengujian Rotary Encoder.....	30
5.4 Pengujian PWM	31
5.5 Pengujian Main Controller.....	32
5.6 Pengujian ALU.....	34
5.7 Pengujian Keseluruhan Alat.....	35
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	39
6.1 Kesimpulan.....	39
6.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN.....	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi proses <i>spin coating</i>	5
Gambar 2.2 Arsitektur FPGA	6
Gambar 2.3 Penampang melintang motor DC	7
Gambar 2.4 Proses kerja motor DC	8
Gambar 2.5. Sinyal PWM secara umum.....	9
Gambar 2.6. <i>Rotary encoder</i> menggunakan <i>optocoupler</i> dan roda pencacah	10
Gambar 4.1 Diagram blok sistem secara keseluruhan.....	13
Gambar 4.2 Rancangan alat tampak perspektif	15
Gambar 4.3 Rancangan Struktur Pemutar Substrat pada Spin Coater.....	15
Gambar 4.4 Bentuk fisik piringan <i>spin coater</i>	15
Gambar 4.5 Rangkaian <i>driver</i> motor E-MOSFET.....	16
Gambar 4.6 Perancangan perangkat lunak sistem dalam FPGA	19
Gambar 4.7 Skema <i>Keypad</i> Matriks 4x4.....	20
Gambar 4.8 Diagram blok rangkaian <i>main controller</i>	20
Gambar 4.9 <i>Timing diagram</i> sinyal PWM.....	21
Gambar 4.10 Diagram blok rangkaian pembangkit sinyal PWM pada FPGA	22
Gambar 4.11 <i>Timing diagram</i> proses sampling pulsa <i>rotary encoder</i>	22
Gambar 5.1 Pengujian tegangan masukan dan keluaran pada rangkaian catu daya 5V dengan menggunakan multimeter.....	27
Gambar 5.2 Pengujian input/output pada modul FPGA	30
Gambar 5.3 <i>timing diagram</i> sinyal PWM dengan <i>input</i> 01111101 menggunakan ISim 31	
Gambar 5.4 Diagram Blok Pengujian <i>Main Controller</i>	33
Gambar 5.5 Rangkaian Pengujian ALU pada FPGA	34

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Algoritme <i>double dabble</i> bilangan biner 8 bit ke bilangan BCD	24
Tabel 5.1 Pengujian <i>Input Output</i> Pada FPGA.....	29
Tabel 5.2 Pengujian <i>Rotary Encoder</i> Pada FPGA.....	30
Tabel 5.3 Pengujian sinyal PWM FPGA dalam volt.....	32
Tabel 5.4 Data hasil pengujian <i>main controller</i>	33
Tabel 5.5 Pengujian ALU pada FPGA dengan operator Tambah (+)	34
Tabel 5.6 Pengujian ALU pada FPGA dengan operator Kurang (-).....	35
Tabel 5.7 Data hasil pengujian kecepatan putaran motor alat ukur tachometer dalam kondisi tanpa beban	36
Tabel 5.8 Data hasil pengujian kecepatan putaran motor alat ukur tachometer dalam kondisi berbeban 0,5kg	37



ABSTRAK

Nanang Agung A., Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2015, *Aplikasi FPGA Sebagai Pengendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Sistem Spin Coating*, Dosen Pembimbing: Mochammad Rif'an, ST., MT. dan Eka Maulana, ST., MT., M.Eng.

Abstrak—Indonesia memiliki kekayaan berupa energi sinar matahari yang sangat disayangkan apabila potensi sebesar ini tidak dimanfaatkan dengan baik. Salah satu cara memanfaatkannya adalah dengan menggunakan sel surya organik jenis *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) untuk mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Dengan memakai TiO_2 sebagai bahan pelapis substrat dan metode *Spin Coating* sebagai metode deposisi untuk proses pelapisan substrat, maka proses pembuatan DSSC akan lebih mudah dan murah. *Spin Coating* dilakukan dengan cara memberikan putaran pada substrat hingga pasta TiO_2 melapisi permukaan substrat, kemudian dilakukan pemanasan substrat untuk menguapkan *solvent* atau pelarut. Perancangan akan dipusatkan pada pembuatan pengendali kecepatan putaran motor DC dengan menggunakan FPGA sebagai *Main Controller*, yang akan memberikan sinyal PWM untuk mengendalikan kecepatan putaran motor DC. Dilengkapi dengan *timer* untuk mengatur durasi putaran. *Rotary Encoder* digunakan sebagai sensor pencatat putaran motor DC yang akan dikonversi oleh FPGA sebagai data kecepatan putaran motor DC dalam satuan RPM (*Rotation Per-Minute*). Dari hasil pengujian sistem secara keseluruhan didapatkan kesalahan rata-rata sistem sebesar 0,287%.

Kata Kunci—*Spin Coating*, FPGA, PWM, Motor DC, *rotary encoder*.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai negara yang mempunyai wilayah yang luas, Indonesia memiliki sumber daya alam dan energi yang melimpah. Terlebih letaknya yang berada di sekitar garis Khatulistiwa, membuat Indonesia hampir sepanjang tahun disinari cahaya matahari. Sangat disayangkan apabila potensi sebesar itu tidak dimanfaatkan dengan baik. Sehingga diperlukan alat yang dapat menerima dan mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang dapat kita gunakan dalam kehidupan sehari-hari, alat ini biasa dikenal dengan *solar cell* atau sel surya.

Fabrikasi sel surya konvensional memerlukan biaya yang cukup mahal. Dalam hal ini, *Dye -Sensitized Solar Cell* (DSSC) bisa menjadi pilihan yang bagus. DSSC merupakan sel surya berbasis semikonduktor dengan bahan organik yang menggunakan proses fotoelektrokimia sebagai prinsip dasar dalam menghasilkan energi listrik. Sel surya jenis ini relatif murah dalam proses fabrikasinya dibandingkan dengan sel surya lainnya. TiO_2 merupakan material semikonduktor yang sedang umum digunakan dalam fabrikasi DSSC. Dengan kinerja yang bagus, tidak adanya efek negatif bagi kesehatan, serta harga TiO_2 yang relatif murah, biaya fabrikasi DSSC dapat lebih ditekan lagi.

Mengenai pembuatan lapisan tipis (*Thin Film*) TiO_2 , berbagai teknik telah bermunculan, seperti teknik *Slip Casting*, *Doctor Blade*, *Screen Printing*, *spray*, *sol gel*, *sputtering*, *spin coating*, *dip coating*, dan masih banyak lagi. *Spin coating* adalah metode pelapisan yang paling mudah, aman, dan sederhana. Dengan homogenitas yang baik dan dapat dilakukannya pengaturan ketebalan lapisan dalam teknik ini, maka menjadikan *Spin Coating* umum digunakan dalam fabrikasi DSSC.

Dalam teknik *Spin Coating* digunakan cara meletakkan sedikit pasta berbahan semikonduktor pada permukaan substrat/bidang datar, kemudian diberikan putaran yang memanfaatkan adanya gaya sentrifugal untuk melapisi substrat dengan pasta semikonduktor tersebut, yang dalam hal ini adalah TiO_2 . Semakin bervariasi nilai kecepatan putaran yang dikenakan pada substrat TiO_2 , maka akan semakin banyak pula variasi hasil akhir yang didapatkan. Dengan kecepatan putaran sekitar 2000 RPM hingga 3000 RPM dengan waktu putar tertentu.

Maka diperlukan pengontrolan putaran motor terhadap waktu untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal dan presisi. Selain kecepatan putaran, pengaruh suhu juga sangat signifikan dalam teknik *Spin Coating*. Sama seperti pada variabel kecepatan putar, variasi suhu yang diaplikasikan pada sistem memberikan variasi ketipisan dan indeks refraksi pada substrat yang juga mempengaruhi hasil akhir.

Penggunaan *Field Programmable Gate Array* (FPGA) untuk memproses suatu sistem kompleks sudah umum dilakukan. Dengan menggunakan FPGA sebagai pemroses utama sistem alat untuk fabrikasi DSSC menggunakan metode *Spin coating* ini, pengaturan kecepatan putaran motor dapat dilakukan baik secara manual maupun otomatis. Diharapkan akan didapatkan hasil akhir yang maksimal dengan pemakaian FPGA dalam sistem ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka pembahasan skripsi ini ditekankan pada:

1. Bagaimana merancang RTC/timer dan generator sinyal PWM untuk kendali motor DC pada FPGA?
2. Bagaimana membuat sebuah rangkaian *driver* motor DC?
3. Bagaimana merancang sistem antarmuka (*interface*) antara FPGA dengan *input unit*, *display*, rangkaian *driver* motor DC, dan *sensor* kecepatan putaran motor?

1.3 Ruang Lingkup

Dengan mengacu pada permasalahan yang telah dirumuskan, maka hal-hal yang berkaitan dengan alat diberi batasan sebagai berikut:

1. Penelitian hanya terbatas pada perancangan dan pembuatan alat untuk proses *Spin Coating*. Pembahasan penelitian akan terpusat pada perancangan sistem pengendali kecepatan putaran motor DC.
2. Batas masukan yang diberikan untuk kecepatan putaran motor adalah antara 2000 RPM sampai dengan 3000 RPM.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan membuat suatu alat pengendali putaran motor pada proses *Spin coating* pada fabrikasi DSSC (*Dye-Sensitized Solar*

Cell) untuk mendapatkan tingkat ketipisan substrat TiO_2 dan efisiensi yang diinginkan, sehingga didapatkan hasil akhir berupa sebuah DSSC yang bekerja optimal.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Memuat latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Membahas teori-teori yang mendukung dalam perencanaan dan pembuatan alat, yaitu tentang *Spin Coating*, FPGA, Motor DC, *Pulse Width Modulation*, dan *Rotary Encoder*.

BAB III Metodologi

Berisi tentang metode-metode yang dipakai dalam melakukan perancangan, pengujian, dan analisis data, yaitu studi literatur, penentuan spesifikasi alat, perancangan dan pembuatan alat, pengujian alat, dan pengambilan kesimpulan.

BAB IV Perancangan

Perancangan dan perealisasiian alat yang meliputi spesifikasi, perencanaan diagram blok, prinsip kerja dan realisasi alat. Perancangan yang dilakukan meliputi perancangan perangkat keras dan perancangan perangkat lunak.

BAB V Pengujian dan Analisis

Memuat aspek pengujian meliputi penjelasan tentang cara pengujian dan hasil pengujian. Aspek analisis meliputi penilaian atau komentar terhadap hasil-hasil pengujian. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian catu daya, pengujian I/O, pengujian PWM, pengujian ALU, dan pengujian keseluruhan sistem.

BAB VI Kesimpulan dan Saran

Memuat intisari hasil pengujian dan menjawab rumusan masalah serta memberikan rekomendasi untuk perbaikan kualitas penelitian yang akan datang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

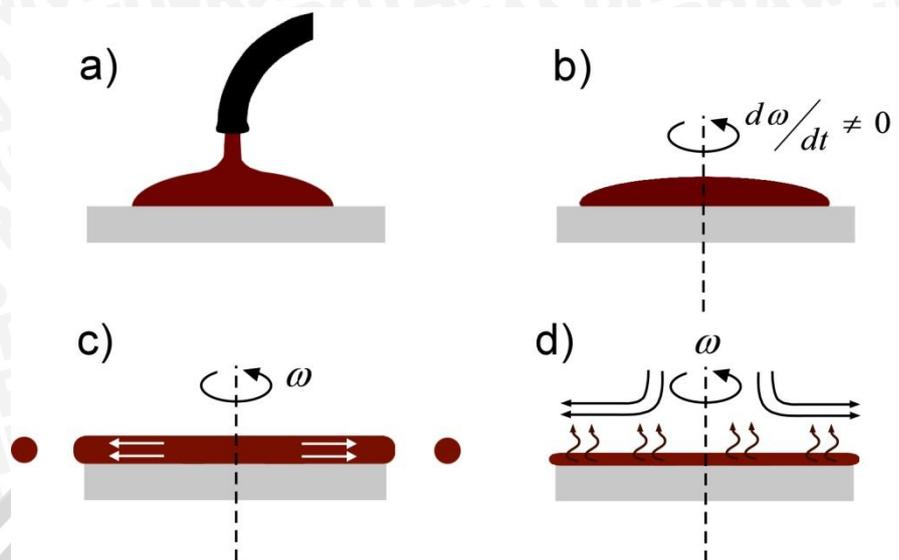
Spin coater adalah sebuah alat untuk menjalankan proses *spin coating*. Dalam proses *spin coating*, kecepatan putaran motor merupakan salah satu faktor utama yang sangat berpengaruh terhadap hasil pelapisan substrat. Dengan rentang masukan kecepatan putaran antara 2000 hingga 3000 putaran per menit (RPM), maka dibutuhkan pengendali putaran motor dan pengkonversi data putaran motor dalam satuan RPM.

Dalam perancangan alat untuk mengendalikan kecepatan motor DC pada proses *spin coating* ini diperlukan pemahaman tentang beberapa hal yang menunjang kelancaran proses perancangan alat ini. Teori-teori yang perlu dipahami dalam merancang sistem ini antara lain adalah tentang metode *Spin coating*, FPGA, motor DC, dan *Rotary Encoder*.

2.1 Spin Coating

Secara harfiah *Spin Coating* berarti melapisi dengan memanfaatkan putaran. Lengkapnya *Spin Coating* adalah suatu metode yang digunakan untuk pelapisan film tipis (*Thin Film*) pada substrat datar. Caranya dengan meletakkan sebagian kecil bahan pelapis berbahan semikonduktor ke tengah permukaan substrat, kemudian diputar secara horizontal dengan kecepatan tertentu. Dengan bantuan gaya sentrifugal yang ada saat diputar, maka perlahan-lahan pelapis akan menipis dan melebar, serta menutupi permukaan substrat. *Spin Coating* banyak digunakan dalam pembuatan film tipis karena dapat menghasilkan kehomogenan pelapisan yang baik serta biaya yang dibutuhkan untuk proses ini relatif murah

Hasil proses *Spin Coating* bergantung pada dua faktor, kecepatan putaran motor (*spin*) dan penguapan (*evaporation*). Kecepatan putaran berpengaruh pada kehomogenan pelapis, sedangkan yang dimaksud dengan penguapan adalah penguapan pelarut (*solvent*) agar didapatkan konsentrasi bahan semikonduktor yang maksimal.



Gambar 2.1 Ilustrasi Proses *Spin Coating*.

dari Hellstrom, S.L.(2007). *Basic Models of Spin Coating*: 2.fig.2

Dalam Gambar 2.1 di atas ditunjukkan urutan proses dalam metode *Spin Coating* yaitu:

- a) Peletakan bahan pelapis berupa pasta semikonduktor ke tengah permukaan substrat.
- b) Mulai dilakukan proses pelapisan dengan memutar substrat dan pelapis.
- c) Pelapis mulai merata pada permukaan substrat karena adanya gaya sentrifugal.
- d) Penguapan bahan pelarut (*solvent*) pada pasta semikonduktor.

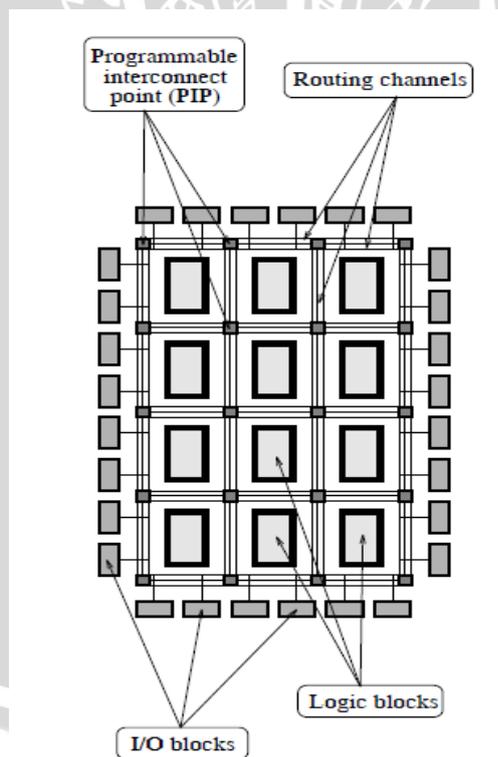
2.2 FPGA (Field Programmable Gate Array) Nexys 2

FPGA (*Field Programmable Gate Array*) adalah komponen elektronika dan semikonduktor yang mempunyai komponen gerbang terprogram (*Programmable Logic*) dan sambungan terprogram berdasarkan *array*. Komponen gerbang yang dimiliki meliputi jenis gerbang logika biasa (AND, OR, XOR, NOT) maupun jenis fungsi matematis dan kombinatorik yang lebih kompleks (decoder, adder, subtracktor, multiplier dan lain-lain). Blok-blok komponen didalam FPGA bisa juga mengandung berupa elemen memory (register) mulai flip-flop sampai pada RAM (*Random Acces Memory*).

Secara umum arsitektur bagian dalam dari IC FPGA terdiri atas tiga elemen utama yaitu *Input/Output Blok (IOB)*, *Configurable Logic Block (CLB)* dan *Interkoneksi*. Arsitektur FPGA tersebut memungkinkan setiap logic block dapat digunakan dan

diimplementasikan ke dalam suatu fungsi yang sederhana. Sebagai contoh hal itu mungkin untuk mengkonfigurasi blok logika menjadi sebuah seperti fungsi yang memiliki 3 input, seperti gerbang logika (AND, OR, NAND, dan lain-lain) atau sebuah elemen penyimpan (D Flip-flop, D Latch, dan lain-lain) (Clive Maxfield, 2009). Gambar 2.6 menunjukkan arsitektur FPGA.

- *Configurable Logic Blocks* :
 - *Look up table based complex structure*
 - *Implement the sequential circuit*
- *Programmable Interconnect* :
 - Berisi *wire segments* dan *programmable switches*
 - Menghubungkan antar *Configurable Logic Blocks* yang berbeda
- *Input/output block* :
 - Sebagai antar muka/*interface* antara *external package pin* dari device dan *internal user logic*



Gambar 2.2 Arsitektur FPGA

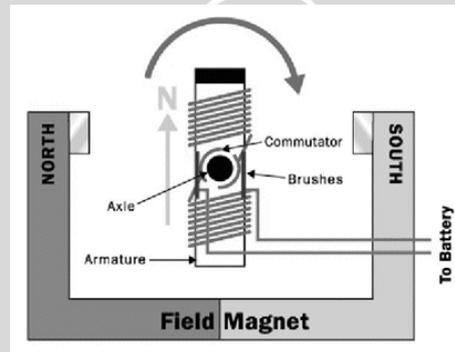
Dari U. Meyer and Baese.(2007). *Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Array*

2.3 Motor DC

Motor adalah sebuah instrumen yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi kinetik atau gerak. Segulung kawat yang dialiri arus listrik dan ditempatkan di dalam suatu medan magnet akan mengalami gaya yang sebanding dengan arus dan kekuatan medan magnetnya. Gaya yang ditimbulkan disebut dengan Gaya Lorentz yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = I . L . B \dots (N) \quad (2.15)$$

Dalam hal ini I adalah arus yang mengalir (A), L adalah panjang kawat (m) dan B adalah kerapatan fluks magnet (Wb/m^2). Gambar penampang melintang dari motor DC ditunjukkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Penampang melintang motor DC.

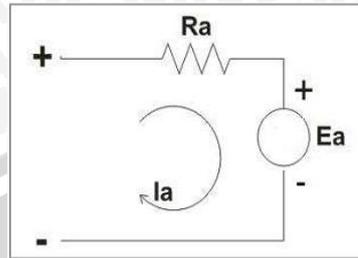
Diambil pada 3 Agustus 2015, dari www.electronics-scheme.com

Persamaan 2.16 menunjukkan prinsip dasar sebuah motor, di mana terjadinya proses perubahan energi listrik (I) menjadi energi mekanik (F). Jika motor mempunyai jari-jari sebesar r , maka akan menimbulkan torsi sebesar

$$\text{Torsi} = F . r = B . I . L . r \dots (Nm) \quad (2.16)$$

Torsi didefinisikan sebagai aksi dari suatu gaya pada benda yang cenderung menyebabkan benda berputar. Jadi ukuran kecenderungan dari suatu jangkar motor untuk berputar disebut torsi dari motor (Eugene Lister, 1984). Pada saat dibangkitkan, konduktor akan bergerak di dalam medan magnet dan akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) yang merupakan reaksi lawan terhadap tegangan penyebabnya. Proses konversi energi listrik menjadi energi mekanik dapat berlangsung jika tegangan sumber

lebih besar dari gaya gerak listrik lawan. Gambar 2.3 menunjukkan proses kerja motor DC.



Gambar 2.4 Proses Kerja Motor DC

Diambil pada 3 Agustus 2015, dari www.mikron123.com

Motor dapat berputar jika tegangan masukan motor lebih besar dari ggl yang timbul. Hubungan antara tegangan sumber dan ggl lawan seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4 dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_a = V_{in} - I_a \cdot R_a \dots (V) \quad (2.17)$$

Dalam hal ini E_a adalah tegangan pada jangkar, V_{in} adalah tegangan masukan, I_a adalah arus jangkar dan R_a adalah tahanan jangkar, sedangkan induksi yang timbul adalah:

$$E_a = C n \Phi \dots (V) \quad (2.18)$$

Dengan C adalah konstanta, n adalah kecepatan motor, dan Φ adalah fluks magnetik yang besarnya sebanding dengan arus penguatan torsi. Torsi pada motor juga sebanding dengan fluks magnetik dan arus. Hal ini ditunjukkan dalam Persamaan 2.19:

$$\tau = C \Phi I_a \dots (Nm)$$

Jika diketahui kecepatan sudut ω adalah:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \dots (\text{rad/s}) \quad (2.20)$$

Maka hubungan torsi dan kecepatan motor adalah:

$$\tau = P / \omega \dots (Nm) \quad (2.21)$$

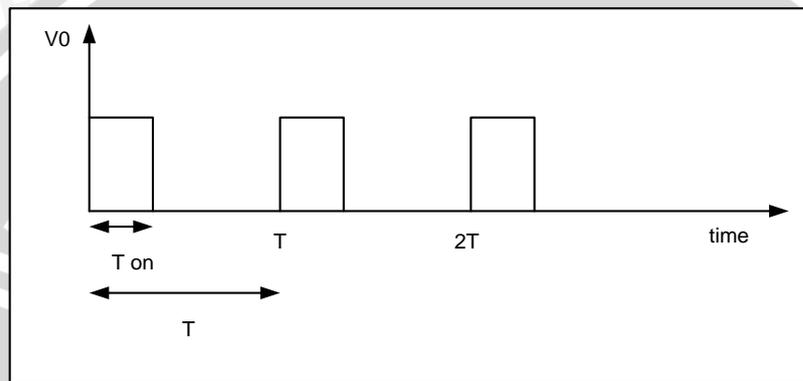
$$\tau = \frac{P}{2\pi n / 60} \dots (Nm) \quad (2.22)$$



2.4 PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM (*Pulse Width Modulation*) digunakan untuk mengatur kecepatan dari motor DC. Di mana kecepatan motor DC tergantung pada besarnya *duty cycle* yang diberikan pada motor DC tersebut.

Pada sinyal PWM, frekuensi sinyal konstan sedangkan *duty cycle* bervariasi dari 0%-100%. Dengan mengatur *duty cycle* akan diperoleh keluaran sinyal PWM yang diinginkan. Ilustrasi sinyal PWM secara umum ditunjukkan dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sinyal PWM secara umum

Diambil pada 4 Agustus 2015, dari www.electronics-scheme.com

$$Duty cycle = \frac{T_{on}}{T} \times 100\% \dots (\%) \tag{2.23}$$

Dengan:

T_{on} = Periode logika tinggi

T = Periode keseluruhan

$$V_{dc} = Duty cycle \times V_{cc} \dots (V) \tag{2.24}$$

Sedangkan frekuensi sinyal dapat ditentukan dengan rumus berikut:

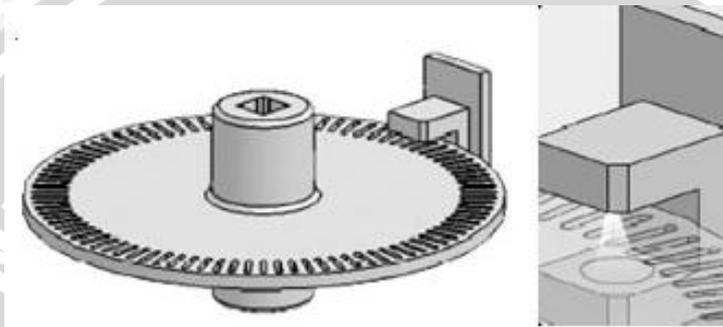
$$f_{on} = \frac{f_{clk} / O}{N.256} \dots (Hz) \tag{2.25}$$

2.5 Rotary Encoder

Rotary encoder adalah sebuah devais yang digunakan untuk mencatat jumlah putaran suatu benda. *Rotary encoder* yang digunakan pada sistem ini adalah sebuah



rangkaian yang tersusun dari *Optocoupler* tipe MOCH25A dan sebuah piringan pencacah dengan 55 lubang. *Rotary encoder* ini menggunakan prinsip *switching* (*on-off*), yang akan berlogika 1 jika mendeteksi lubang, karena cahaya LED pada salah satu sisi *optocoupler* akan diterima oleh *phototransistor* pada sisi lainnya. Dengan jumlah lubang pada piringan sebanyak 55, maka akan terhitung 1 putaran jika *counter* pada program FPGA telah menghitung sebanyak 55 kali. Bentuk dari rangkuman *rotary encoder* ini dapat dilihat dalam gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 *Rotary encoder* menggunakan *optocoupler* dan roda pencacah
Susanto, H. (2007). *Robometricschool*. Diambil pada 5 Agustus 2015 dari
<http://www.robometricschool.com/2013/01/electronic-circuit-of-optical-shaft.html>

Dalam Gambar 2.6 ditunjukkan ilustrasi cara kerja sistem *rotary encoder*, yaitu sinar dari LED dalam *optocoupler* akan sampai pada *phototransistor* saat melewati lubang, dan akan terhalang saat tidak ada lubang.

BAB III

METODOLOGI

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian yang terdapat di bab pendahuluan maka diperlukan metode untuk menyelesaikan masalah tersebut.

3.1 Penentuan Spesifikasi Alat

Spesifikasi alat secara global ditetapkan terlebih dahulu sebagai acuan dalam perancangan selanjutnya. Spesifikasi alat yang direncanakan adalah sebagai berikut:

1. FPGA Digilent Nexys 2 digunakan sebagai *controller* utama sistem.
2. *Driver* motor menggunakan Transistor MOSFET IRFZ 44N.
3. Motor DC menggunakan motor DC tipe MM5475B buatan Nisca Corp.
4. *Rotary encoder* yang digunakan adalah *optocoupler* tipe MOCH25A dengan roda pencacah 55 lubang.
5. Masukan putaran motor yang diberikan adalah antara 2000 RPM hingga 3000 RPM.
6. Program untuk memprogram FPGA menggunakan Xilinx ISE 14.1 dan Digilent Adept rev.2.2.0 untuk *downloader* program.
7. Catudaya motor menggunakan 1 buah *accu* 12V dan catu USB untuk FPGA, dan 3,3V untuk sensor.

3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat

3.2.1 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras (*Hardware*)

1. Pembuatan blok diagram lengkap sistem
2. Pembuatan mekanik alat
3. Pembuatan dan perhitungan komponen yang akan digunakan
4. Merakit perangkat keras masing-masing blok

3.2.2 Perancangan dan Penyusunan Perangkat Lunak

Setelah kita mengetahui seperti apa perangkat keras yang dirancang, maka kita membutuhkan perangkat lunak untuk mengendalikan dan mengatur kerja dari alat ini. Desain dan parameter yang telah dirancang kemudian diterapkan kedalam FPGA

Nexys2 menggunakan bahasa VHDL, dengan menggunakan Xilinx ISE 14.1 sebagai *compiler* program dan Digilent Adept rev. 2.2.0 sebagai *downloader/ writer* program.

3.3 Pengujian Alat

Untuk memastikan bahwa sistem ini berjalan sesuai yang direncanakan maka perlu dilakukan pengujian alat meliputi perangkat keras (*hardware*) yang dilakukan baik per blok maupun keseluruhan sistem.

3.3.1 Pengujian Tiap Blok

Pengujian per blok dilakukan dengan tujuan untuk menyesuaikan nilai masukan dan nilai keluaran tiap-tiap blok sesuai dengan perancangan yang dilakukan sebelumnya.

3.3.2 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui unjuk kerja alat setelah perangkat keras dan perangkat lunak diintegrasikan bersama.

3.4 Pengambilan Kesimpulan

Pengambilan kesimpulan dilakukan setelah didapatkan hasil dari pengujian. Jika hasil yang diperoleh telah sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan maka alat tersebut telah memenuhi harapan dan memerlukan pengembangan untuk penyempurnaannya.

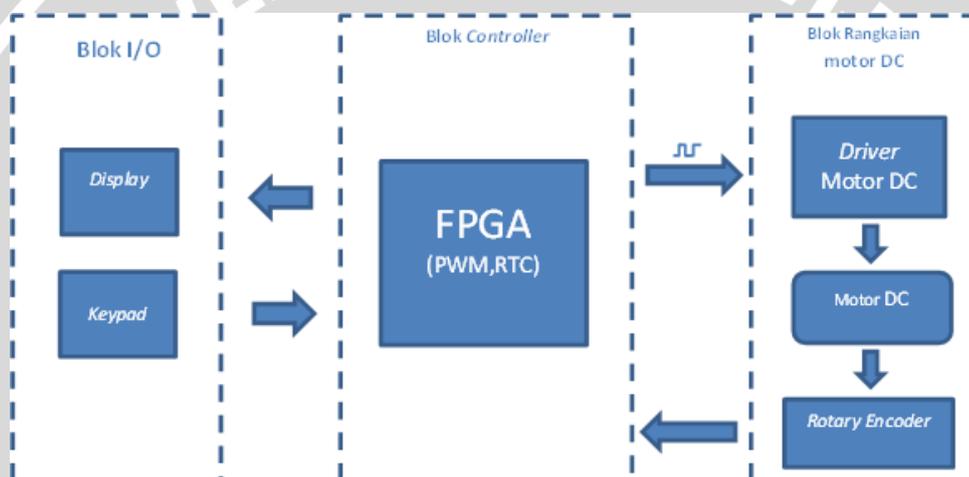
BAB IV

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

Bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah perancangan dan pembuatan sebuah *Spin Coater* mulai dari diagram blok sistem, desain mekanik alat, perancangan rangkaian driver motor DC, dan perancangan perangkat lunak. Perancangan dan pembuatan dilakukan secara bertahap dan sistematis, sehingga nantinya akan memudahkan dalam analisis sistem.

4.1 Perancangan Sistem

Secara garis besar, diagram blok perancangan *hardware* sistem secara keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram blok sistem secara keseluruhan

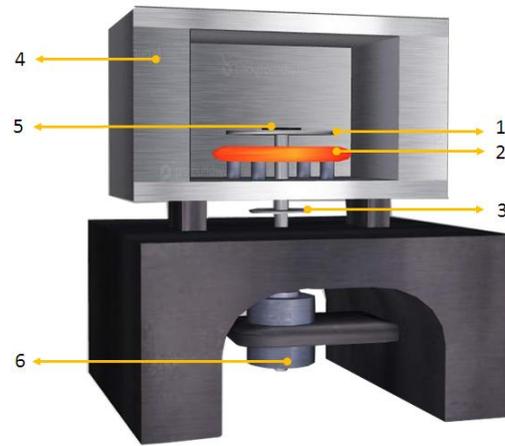
Input sistem ini berasal dari sebuah *Keypad* Matriks 4x4. Ada 2 jenis data yang dimasukkan melalui *Keypad* ini, yaitu data kecepatan putaran motor dalam satuan RPM (*Rotation Per Minute*) dan data lama durasi atau *timer* proses *spin coating* dalam satuan detik. Adapun batasan masukan untuk kecepatan putaran motor adalah 2000 RPM hingga 3000 RPM, sedangkan data durasi dapat dimasukkan hingga 99 menit 59 detik. Data masukan kecepatan putaran motor akan digunakan sebagai data masukan *Main Controller* untuk membangkitkan sinyal PWM guna mengendalikan putaran motor DC, sedangkan data timer akan digunakan untuk memicu RTC (*Real Time Clock*) yang akan menghitung durasi proses *spin coating*. PWM akan memicu rangkaian *driver* motor DC untuk memutar motor DC sesuai dengan data masukan yang diberikan. *Optocoupler*

akan mencacah jumlah putaran motor dan kemudian data putaran motor akan diolah oleh *Main Controller* untuk dibandingkan dengan data *input*. Data putaran akan dikonversi kedalam satuan RPM kemudian akan ditampilkan pada sebuah *display LCD* 16x2.

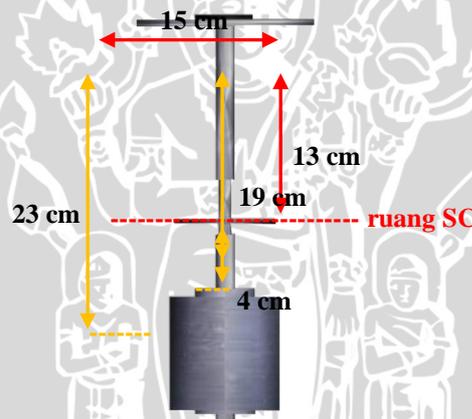
4.2 Perancangan Mekanik Alat

Pada perancangan mekanik alat penelitian ini akan ditunjukkan beberapa komponen penyusun utama penyusun alat *Spin Coater*. Gambar 4.2 merupakan desain tiga dimensi alat *spin coater* dengan penunjukan beberapa komponen alat menggunakan label angka. Yang ditunjukkan dengan nomor 1 adalah piringan pemutar berbentuk lingkaran dengan diameter 15 cm. Piringan ini digunakan sebagai tempat peletakan substrat yang akan digunakan pada proses *spin coating*. Nomor 2 menunjukkan sebuah elemen pemanas (*heater*) yang akan digunakan pada proses penguapan *solvent*. Nomor 3 adalah piringan pencacah dengan 55 lubang, yang bersama dengan *optocoupler* berfungsi untuk menghitung jumlah putaran motor DC. Pada nomor selanjutnya (Nomor 4) ditunjukkan ruang *spin coating*. Ruang ini memiliki panjang 39 cm, lebar 28 cm, dan tinggi 35 cm. Sebuah substrat ditunjukkan dengan nomor 5. Yang terakhir adalah motor DC yang digunakan untuk memutar substrat saat proses pelapisan substrat.

Gambar 4.3 menunjukkan struktur dari bagian pemutar substrat. Terdiri dari beberapa komponen, yaitu motor DC, lengan motor, dan piringan pemutar. Panjang lengan pemutar jika dihitung dari permukaan atas tubuh motor DC hingga bagian bawah piringan pemutar adalah 23 cm, dengan keadaan 13 cm dari panjang keseluruhan lengan berada di dalam ruang *spin coating*. Piringan pemutar memiliki diameter 15 cm dengan penahan substrat tiap 5 cm dari tepi piringan sebanyak 4 penahan.



Gambar 4.2. Rancangan Alat Tampak Perspektif



Gambar 4.3 Rancangan Struktur Pemutar Substrat pada Spin Coater

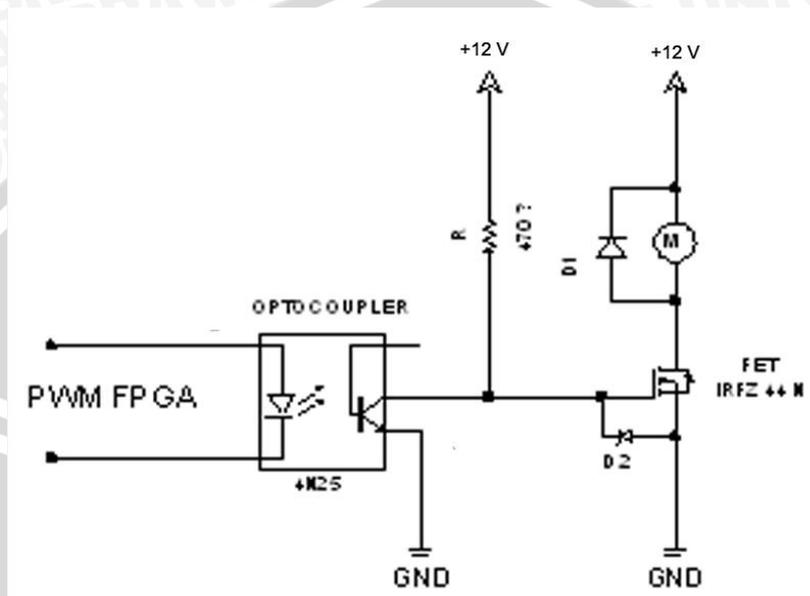
Piringan *spin coater* memiliki berat kurang lebih 0,5 kilogram. Piringan ini digunakan untuk tempat meletakkan substrat yang akan di deposisi.



Gambar 4.4 Bentuk fisik piringan *spin coater*

4.3 Perancangan Rangkaian *Driver* Motor DC

Rangkaian *driver* motor digunakan untuk mengatur arah maupun kecepatan putaran motor. Salah satu jenis *driver* motor adalah *driver* yang menggunakan MOSFET sebagai komponen utama. Berikut ini adalah skematik rangkaian *driver* motor DC menggunakan MOSFET jenis IRFZ44N.



Gambar 4.5 Rangkaian *driver* motor E-MOSFET

Pada perancangan penelitian ini digunakan komponen E-MOSFET kanal N dengan masukan berupa sinyal PWM FPGA. Gambar 4.4 menunjukkan rangkaian pengontrol kecepatan motor.

Jenis FET yang digunakan adalah IRFZ44N dengan spesifikasi

- $V_{DS\ max} = 55V$
- $I_{D\ max} = 49A$
- $R_{DS\ on\ max} = 22\ \Omega$
- $V_{GS\ max} = 20V$
- $V_{GS\ threshold} = 3V$

IRFZ44N digunakan karena IRFZ44N memiliki $I_{D\ max}$ yang cukup besar dan $R_{DS\ on\ max}$ lebih kecil dibandingkan beberapa jenis E-MOSFET kanal N yang lain. Hal ini mengakibatkan IRFZ44N tidak cepat menjadi panas ketika dilewati arus yang besar.

Fungsi dioda daya D1 pada gambar rangkaian elektrik *driver* motor berfungsi sebagai pengamanan komponen MOSFET IRFZ44N pada saat sistem berputar kemudian tiba-tiba berhenti, sehingga terjadi arus sisa pada lilitan motor DC.

Untuk aplikasi pengontrol kecepatan motor, FET selalu dikondisikan dalam keadaan saturasi atau *cut off*-nya. Hal ini dimaksudkan agar tidak terlalu banyak daya yang terbuang dalam FET itu sendiri.

Untuk E-MOSFET kanal N syarat agar komponen dalam kondisi *cut off* adalah ketika $V_{GS} < V_{threshold}$. Dengan $V_{threshold}$ IRFZ44N = 3V, maka V_{GS} *cut off* yang digunakan kurang dari 3V. V_{GS} yang digunakan adalah 0V.

Syarat agar E-MOSFET kanal N dalam kondisi aktif saturasi adalah ketika $V_{GS} > V_{threshold}$, dan $V_{DS} > (V_{GS} - V_{threshold})$. Menggunakan V_{DS} sebesar 12V, maka $V_{GS} < 15V$. Karena $V_{GS\ max} = 20V$, maka $3V < V_{GS} < 20V$. V_{GS} saturasi yang digunakan sebesar 10V. Untuk membatasi V_{GS} saturasi ini digunakan dioda zener (D2) 10V.

Perhitungan nilai resistor untuk tegangan masukan E-MOSFET sebagai berikut

$$\begin{aligned} R &= \frac{12V - V_{CE\ sat}}{I_C} \\ &= \frac{12V - 0,3V}{100 \times 10^{-3}} \\ &= 117 \Omega. \end{aligned}$$

Nilai R yang digunakan sebesar 120Ω.

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{12V - V_{CE\ sat}}{R} \\ &= \frac{12V - 0,3V}{120\Omega} \\ &= 97,5 \text{ mA} \end{aligned}$$

Optocoupler yang digunakan adalah tipe 4N25 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Turn off time 4,5 μ s
- Turn on time 2,8 μ s
- $V_F = 1,5$ V
- $I_{F\ max} = 60$ mA
- $I_{C\ max} = 100$ mA
- $V_{CE(sat)} = 0,5$ V
- $CTR_{typ} = 500\%$

Alasan digunakan komponen *optocoupler* 4N25 adalah karena 4N25 memiliki *turn on time* yang cukup kecil yaitu 2,8 μ s dan *turn off time* 4,5 μ s. Dengan *turn on time* dan

turn off time yang kecil memungkinkan *optocoupler* mampu meneruskan sinyal dengan frekuensi tinggi.

Nilai I_c yang dihasilkan adalah sebesar 97,5 mA, nilai ini masih dibawah nilai arus maksimal (I_{cmax}) *optocoupler* sebesar 100 mA. Dengan nilai CTR (*Current Transfer Ratio*) sebesar 500%, arus masukan I_F *optocoupler* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$CTR = \frac{I_c}{I_F} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$I_F = \frac{I_c}{CTR} \times 100\%$$

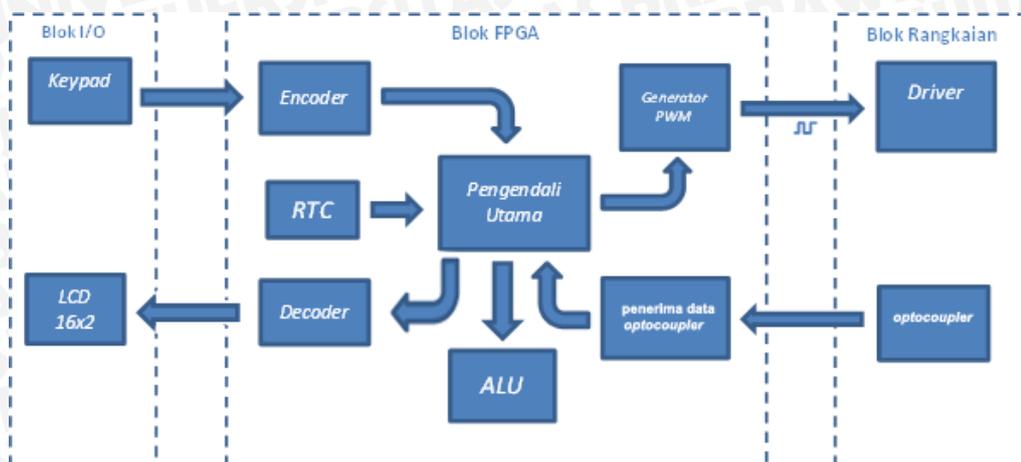
$$I_F = \frac{97,5 \text{ mA}}{500} \times 100\%$$

$$I_F = 19,5 \text{ mA}$$

Jadi dengan menggunakan R sebesar 120 Ω , arus yang mengalir dalam LED *optocoupler* sebesar 19,5 mA. Masih lebih kecil arus maksimal output FPGA sebesar 50 mA dan I_{Fmax} *optocoupler* sebesar 60 mA.

4.4 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Lunak

Perancangan dan pembuatan perangkat lunak diperlukan untuk mendeskripsikan dan mengimplementasikan algoritme proses pada sistem *spin coating* yang diinginkan ke dalam FPGA. Perancangan perangkat lunak ini dilakukan dengan membuat program untuk bagian-bagian sistem kemudian diintegrasikan menjadi sebuah perangkat lunak yang mengkomunikasikan bagian-bagian sistem untuk bekerja menjadi satu sistem *spin coating* yang utuh. Adapun bagian-bagian sistem yang perlu dirancang adalah *encoder* untuk *Keypad* 4x4, pengendali utama sistem (*Main Controller*), pembangkit sinyal PWM, *timer* (*Real Time Clock*), penerima data *optocoupler*, dan *decoder* untuk LCD 16x2. Sebelum memulai pembuatan perangkat lunak, ada baiknya jika dibuat blok diagram perancangan perangkat lunak sistem agar proses perancangan dan pembuatan lebih sistematis. Diagram blok dari perancangan perangkat lunak untuk sistem ini dijelaskan dalam Gambar 4.6 berikut ini.



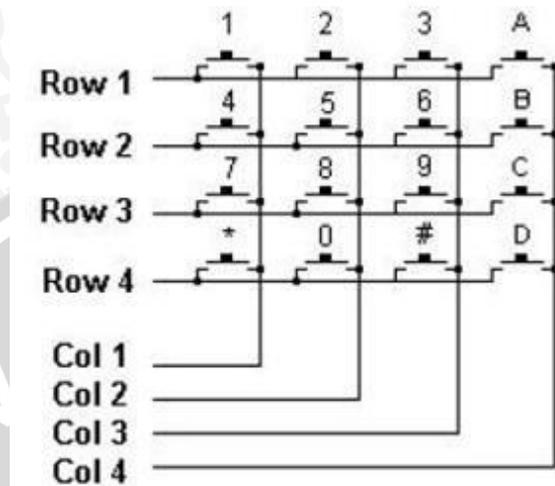
Gambar 4.6 Perancangan perangkat lunak sistem dalam FPGA

4.4.1 Perancangan *encoder keypad* matriks 4x4

Perangkat yang digunakan sebagai unit masukan sistem adalah sebuah *keypad* matriks 4x4. Sebuah *keypad* matriks memiliki jalur baris dan jalur kolom, maka pada *keypad* matriks 4x4 akan ditemukan 4 buah jalur baris (Baris1, Baris2, Baris3, Baris4) dan 4 buah jalur kolom (Kolom1, Kolom2, Kolom3, Kolom4). Pada sistem ini jalur baris akan berfungsi sebagai *input* untuk *keypad* dan jalur kolom akan digunakan sebagai *output* dari *keypad* atau *input* untuk FPGA.

Pembuatan *encoder keypad* dilakukan agar FPGA (*main controller*) dapat mengetahui tombol mana yang sedang ditekan saat *user* memasukkan data *input*. *Encoder keypad* 4x4 ini dapat dibuat dengan cara melakukan pemetaan terhadap tombol-tombol *keypad* melalui proses pengecekan jalur baris dan jalur kolom, sehingga data keluaran *keypad* membentuk barisan data diskrit. Pemetaan baris dilakukan dengan cara memberi logika 0 pada jalur baris yang dipilih dan logika 1 pada jalur baris lainnya. Misalnya Baris1-Baris4 berlogika 1011, maka yang sedang terpilih adalah Baris2. Sedangkan jalur kolom yang terhubung langsung dengan sumber memiliki logika awal 1. Ketika tombol ditekan maka jalur kolom akan mendapatkan logika yang sama dengan jalur baris tempat tombol berada. Misalnya Baris1-Baris4 berlogika 1101, kemudian tombol '8' ditekan maka akan membuat jalur Kolom2 berlogika sama dengan jalur Baris3, sehingga logika dari Kolom1-Kolom4 adalah 1011. Data untuk *encoder* didapatkan dengan cara mengkombinasikan data baris dan data kolom. Jadi data masukan *encoder* untuk angka '8' adalah 1101 1011. Kemudian data 1101 1011 akan dinyatakan oleh *encoder* sebagai data biner dari '8' yaitu 1000 sebagai data keluaran

encoder yang menjadi masukan untuk bagian *controller*. Berikut ini adalah skematik *keypad* matriks 4x4.

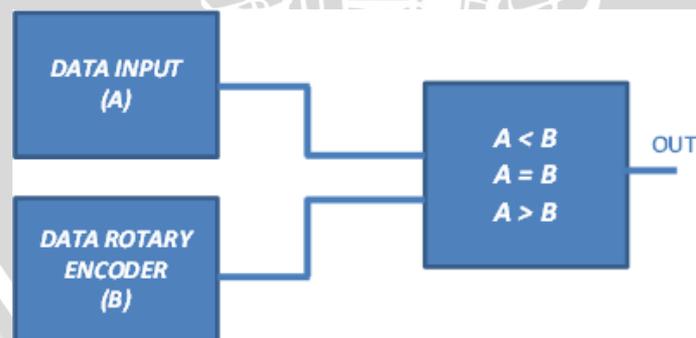


Gambar 4.7 Skema *Keypad* Matriks 4x4

Diambil pada 5 Agustus 2015, dari <https://fahmizaleeits.files.wordpress.com/2010/10.html>

4.4.2 Perancangan rangkaian *feedback controller*

Main Controller berfungsi sebagai pengatur kinerja sistem secara keseluruhan. Tugas utama dari bagian ini adalah membandingkan data *input* dari *keypad* dengan data pencacahan putaran motor DC oleh *rotary encoder*. Data hasil komparasi tersebut akan menjadi masukan dari pembangkit sinyal PWM.

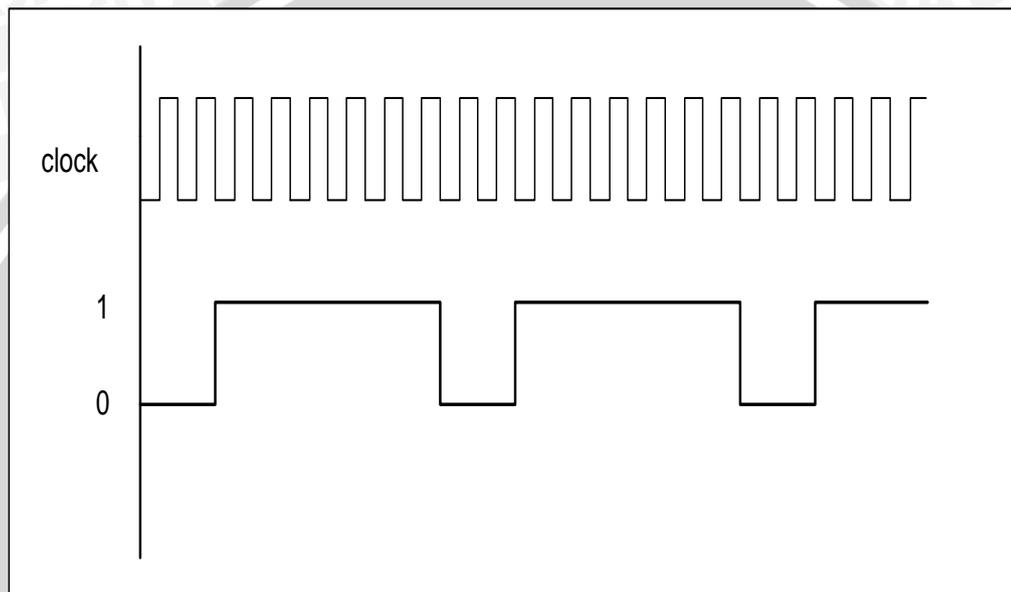


Gambar 4.8 Diagram blok rangkaian *main controller*

Adapun perbandingan data *input* dan data sensor tersebut adalah jika data sensor lebih besar dari data masukan, maka kecepatan motor harus diturunkan. Jika data sensor lebih kecil dari data masukan, maka kecepatan motor harus dinaikkan. Dan jika data sensor sama dengan data masukan, maka kecepatan motor dipertahankan.

4.4.3 Perancangan pembangkit sinyal PWM

Perancangan rangkaian PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah dengan mengatur nilai *duty cycle* pada pulsa sinyal PWM. *Duty cycle* merupakan perbandingan antara lamanya pulsa *high* (logika 1) dengan nilai 1 kali periode pulsa dikalikan 100%. Dari pernyataan tersebut, maka pulsa PWM dapat diimplementasikan ke dalam sebuah *timing diagram* yang ditunjukkan dalam Gambar 4.8.



Gambar 4.9 *Timing diagram* sinyal PWM

Gambar 4.8 menunjukkan *timing diagram* sinyal PWM yang besarnya periode dan pulsa *high* dapat diketahui dari besarnya jumlah *clock*. Untuk mengetahui besarnya jumlah dari *clock* dibutuhkan rangkaian counter. Besarnya bit output counter ditentukan jumlah dari jumlah *clock* dalam 1 periode dan frekuensi sinyal PWM yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$m = 2^n \quad (4.2)$$

$$f = \frac{z}{m} \quad (4.3)$$

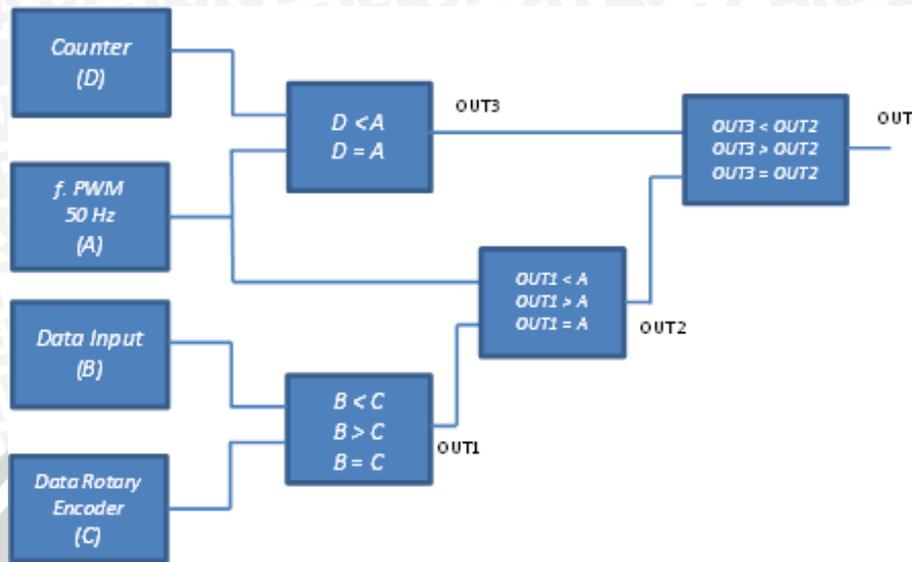
keterangan:

m : jumlah *clock* dalam 1 periode

n : jumlah bit *output counter*

z : frekuensi *clock* (Hz)

f : frekuensi PWM (Hz)



Gambar 4.10 Diagram blok rangkaian pembangkit sinyal PWM pada FPGA

Nilai *duty cycle* didapatkan dengan membandingkan nilai data sensor dan data masukan. Apabila data dari sensor lebih kecil dari data kecepatan putaran yang dimasukkan *user*, maka batas berakhirnya *duty cycle* akan terus ditambah. Dan saat nilai *counter* lebih kecil dari nilai batas *duty cycle* maka rangkaian pembangkit sinyal PWM akan menghasilkan sinyal PWM berlogika 1 (*High*), dan berlogika 0 (*Low*) jika nilai *counter* lebih besar dari batas *duty cycle*.

4.4.4 Perancangan penerima pulsa *rotary encoder*

Dalam perancangan rangkaian penerima pulsa *rotary encoder*, data input rangkaian didapat dari pulsa *high* dan *low* sensor *rotary encoder*. Sensor *rotary encoder* yang digunakan adalah rangkaian *optocoupler* MOCH25A dengan roda pencacah 55 lubang. Proses penghitungan putaran dilakukan tiap 50 ms. Hasil dari proses sampling didapatkan kecepatan sampling (*V*) yang ditunjukkan dalam Persamaan 4.4. Proses sampling pulsa *rotary* ditunjukkan dalam Gambar 4.12.

$$V = \frac{n}{time} \tag{4.4}$$

Misal untuk 60 RPM, berarti selama 1 menit atau 60 sekon terdapat 60 putaran. 1 sekon berarti 1 putaran. Dari Persamaan 4.4 dapat dicari persamaan untuk mencari RPM dari alat yang akan dirancang, yaitu ditunjukkan pada persamaan:

$$RPS = \frac{n}{m} \times \frac{1}{\text{time}} \quad (4.5)$$

$$RPM = \frac{n}{m} \times \frac{1}{\text{time}} \times 60 \quad (4.6)$$

Keterangan:

V = kecepatan sampling (n/s)

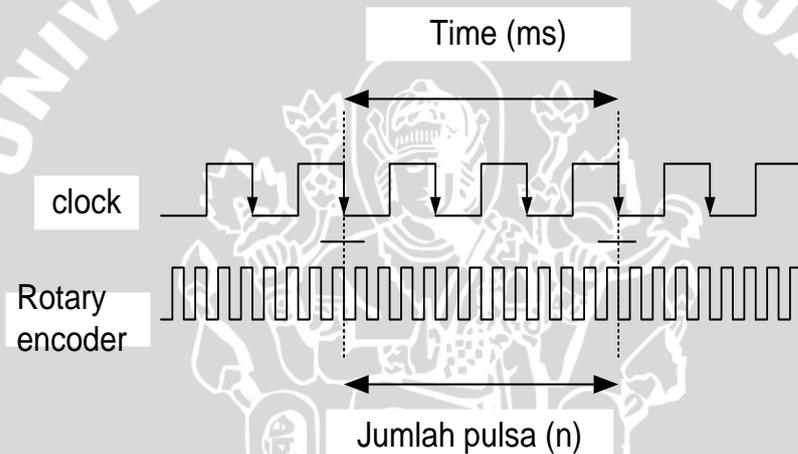
RPM = *Revolutions Per Minute*

RPS = *Revolutions Per Second*

n = jumlah pulsa *rotary encoder*

m = jumlah pulsa *rotary encoder* MOCH25A tiap 1 putaran

time = waktu sampling (s)



Gambar 4.11 timing diagram proses sampling pulsa *rotary encoder*

Time/waktu *sampling* yang digunakan dalam perancangan alat ini adalah 50 ms, sehingga:

$$\begin{aligned} RPM &= \frac{n}{55} \times \frac{1}{50 \times 10^{-3}} \times 60 \\ &= \frac{n}{55} \times \frac{6000}{5} \\ &= \frac{1200}{55} n \end{aligned}$$

4.4.5 Perancangan pengondisi data output

Pengondisi data output diperlukan untuk mengubah format data dari input (*keypad*), sensor, maupun ALU agar dapat ditampilkan pada *display* LCD 16x2. LCD 16x2

membutuhkan data masukan dalam kode ASCII yang dapat diperoleh dengan melakukan konversi data BCD (*Binary Code Decimal*), sedangkan sensor dan ALU memiliki keluaran berupa data biner. Maka untuk menampilkan data biner keluaran dari sensor maupun ALU diperlukan pengkonversi bilangan biner menjadi bilangan BCD (*Binary to BCD*).

Konversi bilangan biner ke bilangan BCD adalah dengan cara menggunakan algoritme *double dabble*, dimana prinsip kerja dari algoritme ini adalah ‘geser dan tambah 3’. Misalnya data biner 8 bit adalah “11111111”, maka algoritme untuk nilai bilangan biner tersebut menjadi bilangan BCD adalah ditunjukkan dalam Tabel 4.1.

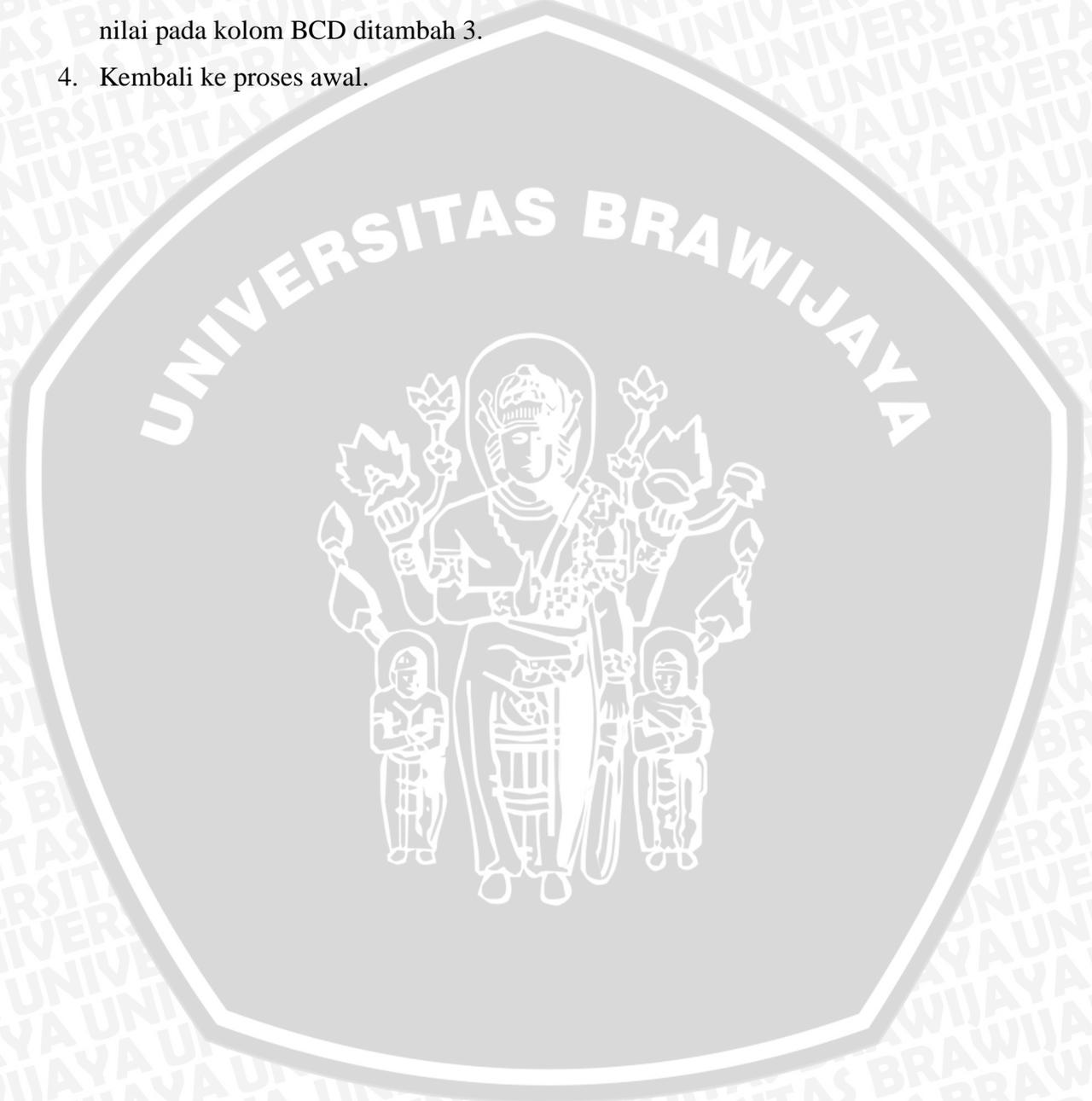
Tabel 4.1 Algoritme *double dabble* bilangan biner 8 bit ke bilangan BCD

Operasi	Ratusan	Puluhan	Satuan	Data Biner	
INPUT				7 - 4	3 - 0
HEX				F	F
Start				1 1 1 1	1 1 1 1
Shift 1			1	1 1 1 1	1 1 1
Shift 2			1 1	1 1 1 1	1 1
Shift 3			1 1 1	1 1 1 1	1
Add 3			1 0 1 0	1 1 1 1	1
Shift 4		1	0 1 0 1	1 1 1 1	
Add 3		1	1 0 0 0	1 1 1 1	
Shift 5		1 1	0 0 0 1	1 1 1	
Shift 6		1 1 0	0 0 1 1	1 1	
Add 3		1 0 0 1	0 0 1 1	1 1	
Shift 7	1	0 0 1 0	0 1 1 1	1	
Add 3	1	0 0 1 0	1 0 1 0	1	
Shift 8	1 0	0 1 0 1	0 1 0 1		
BCD	2	5	5		

Tabel 4.1 menunjukkan tahapan algoritme *double dabble* adalah sebagai berikut:

1. Menggeser bilangan biner ke kiri sebanyak 1 bit.

2. Jumlah n -shift adalah sama dengan n -bit input bilangan biner. Hasil dari tabel diatas untuk bilangan BCD adalah pada *shift* ke-8 untuk 8 bit input bilangan biner, yaitu ratusan, puluhan, dan satuan.
3. Jika nilai nilai dari kolom BCD adalah sama dengan 5 atau lebih besar, maka nilai pada kolom BCD ditambah 3.
4. Kembali ke proses awal.



BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian dan analisis dilakukan untuk mengetahui apakah sistem telah bekerja sesuai perancangan. Pengujian dilakukan perblok kemudian secara keseluruhan. Adapun pengujian yang perlu dilakukan sebagai berikut:

1. Pengujian Catu Daya
2. Pengujian I/O (*Input/Output*)
3. Pengujian *rotary encoder*
4. Pengujian *PWM*
5. Pengujian *Main controller*
6. Pengujian ALU
7. Pengujian sistem secara keseluruhan

Instrumen penunjang yang digunakan dalam melakukan pengujian-pengujian di atas antara lain multimeter dan Tachometer digital.

5.1 Pengujian Catu Daya

Catu daya merupakan salah satu bagian dari sistem elektronika yang besar pengaruhnya terhadap kinerja sistem. Perbedaan nilai suatu catu daya sistem dapat mengakibatkan kesalahan pengukuran, ketidaksesuaian *output* sistem dengan keinginan, hingga rusaknya komponen-komponen sistem. Oleh karena itu pengujian nilai catu daya perlu dilakukan sebelum menggunakannya pada sistem.

Pengujian ini akan mencari tahu apakah nilai catu daya yang dipergunakan telah sesuai dengan spesifikasi alat pada rancangan atau tidak. Catu daya yang akan dipergunakan pada sistem spin coating ini adalah sebuah *accumulator* 12VDC sebagai suplai daya motor DC, dan daya USB (5VDC) sebagai penyuplai daya untuk *board* FPGA dan rangkaian lainnya. Instrumen pengukuran yang digunakan pada pengujian ini adalah sebuah multimeter/multitester

Dari hasil pengujian maka diperoleh bahwa nilai tegangan catu daya motor DC, yaitu *accumulator*, memiliki tegangan output sebesar 12,07 V. Nilai tersebut merupakan nilai tegangan keluaran maksimal (tanpa beban) yang mampu dihasilkan oleh catu daya *accumulator*. Nilai tegangan tersebut dapat digunakan sebagai catu daya bagi motor DC. Sedangkan catu daya USB diukur dengan cara menyuplai FPGA

dengan catu daya USB. Kemudian menggunakan multimeter untuk mengukur nilai tegangan output pada kaki ke-6 pada PIN JA hingga JD pada *board* FPGA . Gambar 5.1 menunjukkan pengukuran nilai tegangan dari catu daya 5V menggunakan multimeter.



Gambar 5.1 Pengujian tegangan masukan dan keluaran pada rangkaian catu daya 5V dengan menggunakan multimeter

5.2 Pengujian Input/Output

Pengujian input/output terdapat dalam modul FPGA. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah proses dan kerja unit I/O FPGA berjalan dengan baik? Pada pengujian input dilaksanakan pengujian 1 buah *keypad* 4x4, dan 8 buah LED yang terdapat dalam modul FPGA. Sedangkan pengujian *output* akan menguji respon tampilan sebuah LCD 16x2 ketika dimasukkan data dari *keypad*.

Pengujian *input* menggunakan *keypad* 4x4 dan LED pada FPGA sebagai indikator dilakukan dengan memprogram dan menetapkan PIN *input* dalam file UCF (*User Constrain File*) sesuai dengan *reference manual* dari FPGA Nexys 2 Spartan 3E , yaitu:

#LEDs

NET "led<0>" LOC = "J14" ;

NET "led<1>" LOC = "J15" ;

NET "led<2>" LOC = "K15" ;

NET "led<3>" LOC = "K14" ;

NET "led<4>" LOC = "E17" ;

```
NET "led<5>" LOC = "P15" ;
```

```
NET "led<6>" LOC = "F4" ;
```

```
NET "led<7>" LOC = "R4" ;
```

```
#KEYPAD
```

```
NET "row_keypad<3>" LOC = "L15" ;#JA1
```

```
NET "row_keypad<2>" LOC = "K12" ;#JA2
```

```
NET "row_keypad<1>" LOC = "L17" ;#JA3
```

```
NET "row_keypad<0>" LOC = "M15" ;#JA4
```

```
NET "col_keypad<3>" LOC = "K13" ;#JA7
```

```
NET "col_keypad<2>" LOC = "L16" ;#JA8
```

```
NET "col_keypad<1>" LOC = "M14" ;#JA9
```

```
NET "col_keypad<0>" LOC = "M16" ;#JA10
```

Pengujian *output* dilakukan dengan memberikan masukan data pada jalur data LCD. Pengujian dapat dilakukan dengan langsung memberikan data masukan melalui *keypad* 4x4, sehingga pengujian *input* dan *output* dapat dilakukan secara bersamaan. Sebelumnya perlu ditetapkan penempatan PIN I/O dalam file UCF sesuai dengan *reference manual* FPGA Nexys 2 Spartan 3E, yaitu:

```
# LCD
```

```
NET "db_lcd<0>" LOC = "M13" ;#JB1
```

```
NET "db_lcd<1>" LOC = "R18" ;#JB2
```

```
NET "db_lcd<2>" LOC = "R15" ;#JB3
```

```
NET "db_lcd<3>" LOC = "T17" ;#JB4
```

```
NET "db_lcd<4>" LOC = "P17" ;#JB7
```

NET "db_lcd<5>" LOC = "R16" ;#JB8

NET "db_lcd<6>" LOC = "T18" ;#JB9

NET "db_lcd<7>" LOC = "U18" ;#JB10

NET "rs_lcd" LOC = "H15" ;#JC7

NET "ena_lcd" LOC = "G15" ;#JC1

Pada pengujian I/O FPGA, data input *keypad* 4x4 diproses dan dikeluarkan pada led dan ditampilkan pada LCD 16x2. Hasil dari pengujian I/O ditunjukkan dalam Tabel 5.1 dan Gambar 5.3.

Tabel 5.1 Pengujian *Input/ Output* Pada FPGA

<i>Data Input</i> <i>Keypad</i>	<i>Data Output</i> Tampilan LCD	<i>Data Output</i> Tampilan led
Tombol '0'	0	0000 0000
Tombol '1'	1	0000 0001
Tombol '2'	2	0000 0010
Tombol '3'	3	0000 0011
Tombol '4'	4	0000 0100
Tombol '5'	5	0000 0101
Tombol '6'	6	0000 0110
Tombol '7'	7	0000 0111
Tombol '8'	8	0000 1000
Tombol '9'	9	0000 1001



Gambar 5.2 Pengujian *input/output* pada modul FPGA

5.3 Pengujian Rotary Encoder

Pengujian *rotary encoder* berfungsi untuk mengetahui jumlah putaran motor yang tercatat oleh *rotary encoder*. Roda pencacah yang digunakan memiliki 55 lubang, maka setiap *rotary encoder* telah mencacah 55 lubang maka nilai data putaran akan ditambah 1. Langkah pengujian adalah dengan mengaktifkan rangkaian *rotary encoder* dan FPGA, kemudian memutar poros motor DC secara manual selama beberapa putaran sehingga dapat terjadi pencatatan putaran oleh *rotary encoder*. Output pencatatan putaran motor akan ditampilkan berupa nyala led yang akan bertambah 1 nyala led setiap tercatat 1 putaran penuh.

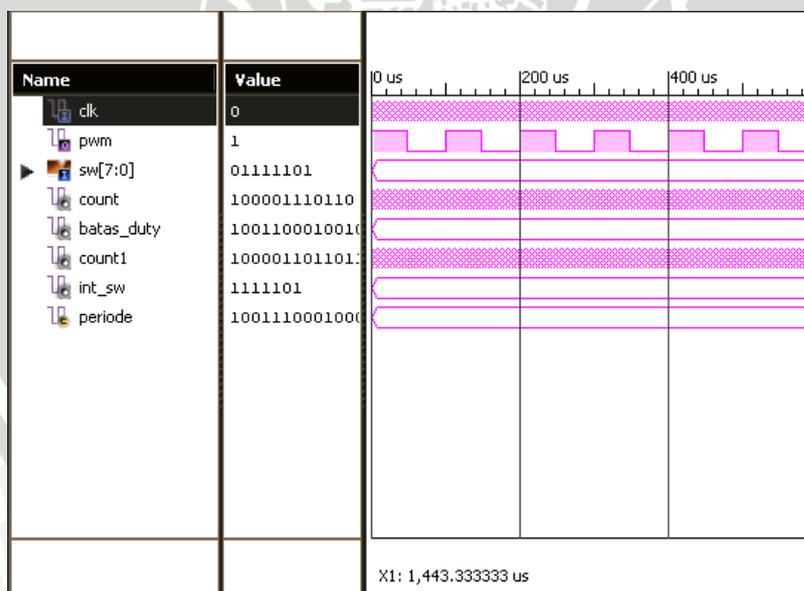
Tabel 5.2 Pengujian *Rotary Encoder* Pada FPGA

Jumlah Putaran (<i>rotary encoder</i>)	Data Output Tampilan led
0	0000 0000
1	0000 0001
1,5	0000 0001
2	0000 0011

3	0000 0111
4	0000 1111
5	0001 1111
6	0011 1111
7	0111 1111
8	1111 1111

5.4 Pengujian PWM

Pengujian PWM dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian pembangkit sinyal bekerja sesuai dengan ketentuan perancangan, mengetahui bentuk dari pulsa yang dihasilkan pembangkit sinyal PWM, dan mengetahui *unit-unit* yang ada dalam sinyal PWM. Bentuk dari sinyal PWM ditampilkan pada program ISim ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 *timing diagram* sinyal PWM dengan *input* 01111101 menggunakan ISim

Pengujian sinyal PWM dilakukan dengan cara memberikan masukan data biner 8-bit menggunakan switch yang ada pada modul FPGA Nexys2, dan alat ukur tegangan yang digunakan adalah Multimeter. Data hasil pengujian PWM dalam satuan volt ditunjukkan oleh Tabel 5.3



Tabel 5.3 Pengujian sinyal PWM FPGA dalam volt

Data biner INPUT	Duty cycle (dalam %)	Sinyal PWM pada Pengujian (dalam volt)	Sinyal PWM Teori (dalam volt)	Kesalahan (dalam%)
11111111	100,0	4,932	5,000	1,360
11010011	82,7	4,056	4,135	1,910
10110111	71,7	3,563	3,585	0,613
10010010	62,7	3,212	3,135	2,456
01101001	57,2	2,881	2,860	0,734
01001000	41,1	2,100	2,055	2,189
00111011	28,2	1,138	1,410	1,560
01101011	23,1	1,121	1,155	2,943
00011011	10,6	0,547	0,530	3,207
00000000	0	0	0	0
Kesalahan Rata-Rata				1,930

Berdasarkan pada Tabel 1, diperoleh perhitungan sinyal PWM dalam *volt* yang diinginkan dan data hasil percobaan. Kesalahan rata-rata dapat diperoleh hingga 1,93%.

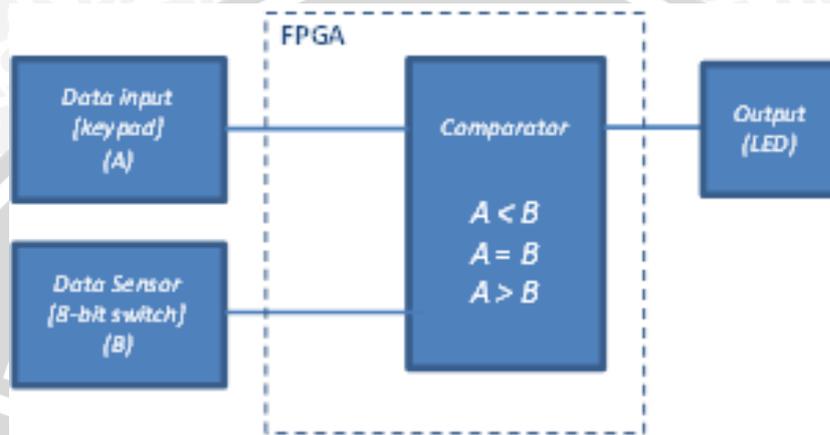
5.5 Pengujian Main Controller

Rangkaian pengendali utama sistem bertujuan untuk mengetahui kinerja dari rangkaian pada saat memproses data masukan *user* dan membandingkannya dengan data RPM dari *rotary encoder*, serta untuk mengetahui respon rangkaian terhadap *timer* proses pemutaran motor yang telah diatur oleh *user*.

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan data masukan berupa kecepatan dalam satuan RPM dan data penacahan dari *rotary encoder*, serta mengatur durasi proses dengan memberikan data waktu pada masukan. Untuk memudahkan proses

pengujian, data *rotary encoder* akan diganti dengan memasukkan data 8 bit dari *switch* pada modul FPGA. *Output* yang digunakan adalah LED sebagai representasi dari sinyal kontrol yang digunakan untuk memicu pembangkit sinyal PWM.

Blok diagram pengujian rangkaian pengendali utama sistem ditunjukkan pada Gambar 5.4 berikut ini.



Gambar 5.4 Diagram Blok Pengujian *Main Controller*

Berikut ini adalah sebuah tabel berisi data hasil pengujian komparasi data input dengan data sensor pada *Main Controller*.

Tabel 5.4 Data hasil pengujian *main controller*

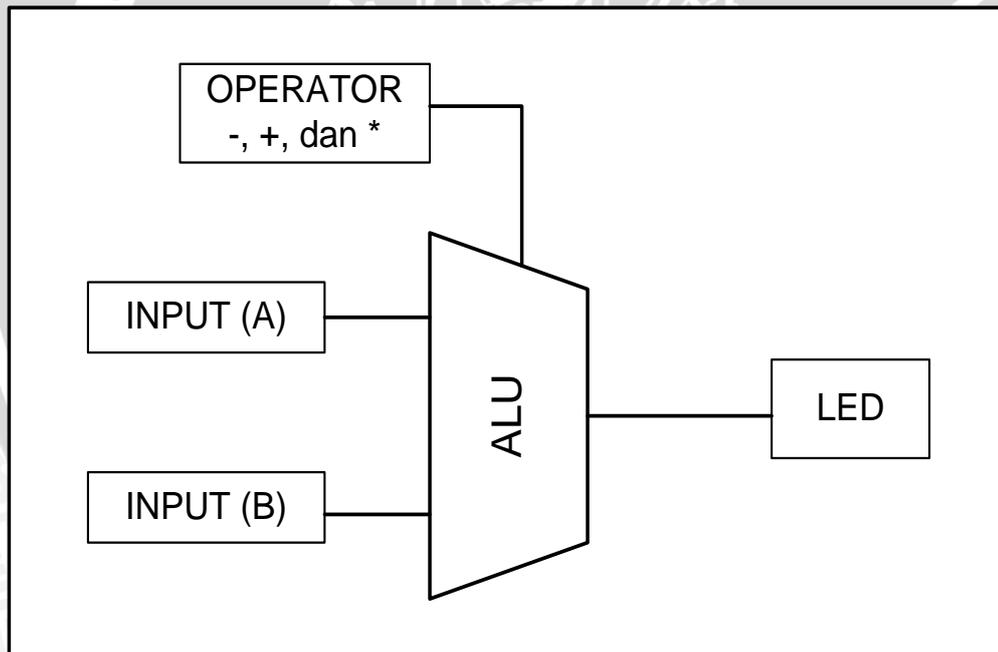
<i>Rotary Encoder</i> /Switch (A)	<i>INPUT</i> /Keypad(B)	Komparasi Kondisi Logika <i>input</i>	<i>Output</i> LED
00000111	00001111	$A < B$	Kanan
00001111	00001111	$A = B$	Tengah
00011111	00001111	$A > B$	Kiri

Tabel 5.4 menunjukkan bahwa dengan memberikan nilai tetap pada data *INPUT* (B) sebesar “00001111” dan dengan mengubah-ubah data masukan dari *switch* (A) yang merepresentasikan data *rotary encoder*, maka diperoleh tiga keadaan pada komparasi kedua data masukan. Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut, jika data *rotary encoder*/Switch (A) lebih besar nilainya dari data *INPUT*/Keypad (B) maka 2 LED paling kanan akan menyala, menandakan bahwa *duty cycle* sinyal PWM harus

dikurangi. Jika data *rotary encoder/Switch* (A) sama nilainya dengan data *INPUT/Keypad* (B) maka 2 LED tengah akan menyala, menandakan bahwa *duty cycle* sinyal PWM harus dipertahankan nilainya karena telah sesuai dengan masukan dari *user*. Dan jika data *Sensor rotary encoder/Switch* (A) lebih kecil nilainya dari data *INPUT/Keypad* (B) maka 2 LED paling kiri akan menyala, menunjukkan bahwa *duty cycle* sinyal PWM harus ditambah untuk meningkatkan kecepatan putaran motor.

5.6 Pengujian ALU

Pengujian ALU (*Arithmetic Logic Unit*) pada FPGA bertujuan untuk mengetahui hasil penggunaan operator kurang (-), tambah (+) dan kali (*). Pada pengujian ini prosedur yang dilakukan adalah menyiapkan program pada FPGA dan menggunakan *switch* dan LED sebagai indikator hasil dalam modul FPGA. Gambar 5.10 menunjukkan rangkaian Pengujian ALU pada FPGA.



Gambar 5.5 Rangkaian Pengujian ALU pada FPGA

Tabel 5.5 Pengujian ALU pada FPGA dengan operator Tambah (+)

INPUT (A)	INPUT (B)	A+B	Dalam bentuk desimal
0000	0000	0000	0+0=0

0001	0000	0001	1+0=1
0001	0001	0010	1+1=2
0011	0011	0100	3+3=6
0011	0111	1010	3+7=10
0111	0111	1110	7+7=14
1111	1111	10000	15+15=30

Tabel 5.6 Pengujian ALU pada FPGA dengan operator Kurang (-)

INPUT (A)	INPUT (B)	A-B	Dalam bentuk desimal
0000	0000	0000	0-0=0
0001	0000	0001	1-0=1
0001	0001	0000	1-1=0
0100	0011	0001	4-3=1
1010	0111	0011	10-7=3
1100	0111	0101	12-7=5
1111	1110	0001	15-14=1

Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 menunjukkan proses aritmatika 2 input 4 bit biner dengan operator tambah (+) dan kurang (-). Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa hasil dari ALU yang digunakan dalam FPGA bekerja dengan baik dan sesuai dengan data yang diinginkan.

5.7 Pengujian Keseluruhan Alat

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan data kecepatan putaran motor DC yang telah diproses dan ditampilkan oleh FPGA dengan data yang diperoleh dari



pencatatan alat ukur kecepatan putaran lainnya yang akan dijadikan sebagai referensi penentuan tingkat kesalahan pengukuran sistem, yaitu *Tachometer*. Pengujian akan dilakukan dalam dua keadaan, yaitu motor dalam keadaan tanpa beban dan motor dalam keadaan berbeban.

Prosedur yang dilakukan pada pengujian ini adalah menyiapkan alat-alat yang digunakan untuk menjalankan program FPGA dan *Tachometer*. Kemudian dimasukkan beberapa nilai kecepatan yang berbeda melalui *keypad*. Setelah sistem aktif maka dilakukan pengukuran kecepatan putaran motor dengan *Tachometer*. Dengan membandingkan hasil keluaran dari FPGA dan hasil pencatatan *Tachometer*, maka dapat diketahui besarnya *error* atau kesalahan pencatatan sistem. Tabel 5.7 menunjukkan perbandingan data hasil pengujian nilai kecepatan putaran motor DC oleh FPGA dan oleh *Tachometer*, serta persentase kesalahan (*error*) dari sistem dalam keadaan motor DC tanpa beban.

Tabel 5.7 Data hasil pengujian kecepatan putaran motor alat ukur *tachometer* dalam kondisi tanpa beban

DATA INPUT KEYPAD (RPM)	Duty Cycle (%)	PEMBACAAN KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC (RPM)		Error (%)
		LCD	Tachometer	
2800	93	2794	2798,3	0,153
2500	83	2492	2489,6	0,096
2000	67	2004	2000,6	0,169
1500	50	1496	1499,1	0,206
1200	41	1206	1203,4	0,216
1000	34	1001	998,1	0,290
750	25	745	749,5	0,600
500	17	504	501,2	0,558
300	10	301	298,8	0,736

0	0	0	0	0
RATA-RATA KESALAHAN				0,302

Dari pengujian di atas didapatkan tingkat kesalahan pengukuran sebesar 0,302%. Pengujian selanjutnya dilakukan saat motor dalam keadaan berbeban. Dengan beban berupa piringan *spin coater* dengan berat 0,5kg

Tabel 5.8 Data hasil pengujian kecepatan putaran motor alat ukur tachometer dalam kondisi berbeban 0,5kg

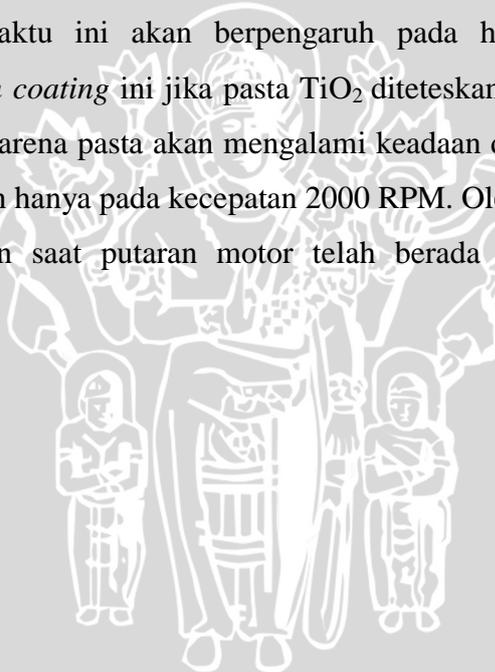
DATA INPUT KEYPAD (RPM)	Duty Cycle (%)	PEMBACAAN KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC (RPM)		Error (%)
		LCD	Tachometer	
2800	95	2799	2801,3	0,082
2500	86	2496	2499,6	0,144
2000	68	2002	2001,4	0,029
1500	52	1501	1498,0	0,200
1200	43	1196	1198,9	0,241
1000	36	997	999,5	0,250
750	27	753	748,7	0,574
500	19	497	500,3	0,659
300	12	299	301,1	0,697
0	0	0	0	0
RATA-RATA KESALAHAN				0,287

Tabel 5.8 menunjukkan hasil pengujian pengukuran RPM dengan menggunakan *Tachometer* digital saat motor DC mendapatkan beban 0,5kg, dimana dapat diamati bahwa dengan penambahan beban maka sistem perlu menaikkan batas *duty cycle* untuk

mencapai kecepatan putaran motor yang diinginkan. Pengujian ini memiliki tingkat kesalahan sebesar 0,287%.

Dengan membandingkan tabel 5.7 dan tabel 5.8 dapat diketahui bahwa nilai *duty cycle* yang dibutuhkan motor untuk mencapai nilai kecepatan putaran yang sama dalam kondisi berbeban lebih tinggi dibandingkan dengan saat dalam kondisi tanpa beban. Hal ini dikarenakan motor membutuhkan torsi yang lebih besar untuk memutar beban. Untuk meningkatkan torsi motor maka *duty cycle* dinaikkan beberapa persen.

Dari pengujian kinerja keseluruhan ini ditemukan pula kelemahan sistem saat proses menaikkan putaran motor menuju nilai RPM yang diinginkan. Untuk mencapai nilai 2000 RPM dari keadaan 0 RPM dalam keadaan tanpa beban, dibutuhkan waktu kurang lebih 3 detik. Sedangkan dalam keadaan berbeban akan dibutuhkan waktu 5 hingga 6 detik. Jeda waktu ini akan berpengaruh pada hasil deposisi substrat menggunakan metode *spin coating* ini jika pasta TiO₂ diteteskan pada substrat terlebih dahulu sebelum diputar. Karena pasta akan mengalami keadaan diputar pada kecepatan 0 hingga 2000 RPM, bukan hanya pada kecepatan 2000 RPM. Oleh karena itu peletakan pasta sebaiknya dilakukan saat putaran motor telah berada pada kecepatan yang diinginkan.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari Hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Hasil pengujian dari pengujian rangkaian pembangkit sinyal PWM secara praktek dan teori memiliki kesalahan rata-rata 1,93%. Kinerja pembangkit sinyal PWM telah sesuai dengan yang diharapkan. Sistem RTC/timer beroperasi tanpa masalah.
2. *Driver* motor berhasil merespon masukan sinyal PWM dengan *output* berupa kendali putaran motor DC. Dengan tingkat kesalahan 0,302% pada pengujian keseluruhan sistem dalam keadaan tanpa beban, dan pada keadaan berbeban 0,5kg pengukuran memiliki kesalahan sebesar 0,287%, maka dapat disimpulkan *driver* motor bekerja dengan baik.
3. *Keypad* 4x4 dapat digunakan untuk memberikan data masukan dengan baik. LCD 16x2 dapat menampilkan data yang diharapkan tanpa masalah. Maka disimpulkan bahwa unit I/O bekerja dengan baik. Sedangkan antarmuka *rotary encoder* dengan FPGA mencatat beberapa hasil putaran sedikit berbeda dengan pencatatan alat ukur lain dengan tingkat kesalahan 0,302% dalam keadaan tanpa beban dan 0,287% dalam keadaan berbeban. Kesalahan ini tidak mempengaruhi kinerja sistem.

6.2 Saran

Beberapa hal yang direkomendasikan untuk pengembangan alat *spin coater* lebih lanjut adalah:

1. Disarankan untuk membuat desain mekanik alat yang lebih presisi agar kerja motor DC lebih optimal dan sesuai dengan yang diinginkan.
2. Menggunakan sensor kecepatan putaran motor dan alat ukur referensi yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Digilent. (2011). *Digilent nexys2 Board Reference Manual*.

<http://www.digilentinc.com/Products>

<https://mfrlive.wordpress.com/2011/10/12/apa-itu-fpga/>. Diakses tanggal 09 Juli 2015

Haskell, Richard E. dan Darrin M. Hanna. (2012). *Digital Design Using Digilent FPGA Boards*. LBE Books. LLC. US

<http://trikueni-desain-sistem.blogspot.com/2014/03/Pengertian-Solid-State-Relay.html>

Diakses tanggal: 09 Juli 2015.

<http://www.geyosoft.com/2014/merancang-driver-motor-dc> Diakses tanggal: 2 Agustus 2015.

Hellstrom, S. (2007). *Basic Models of Spin Coating*

Meyer, U and Baese. (2007). *Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Array*. Springer Berlin Heidelberg. New York.

Smith, R.S. (2010). *FPGAs 101-Everything you need to know to get started*. Elseive Inc. USA.

Hidayat, A. S. (2011). Pengaruh Suhu dan Kecepatan Putar *Spin Coating* terhadap Kinerja Sel Surya Organik Berbahan Dasar TiO₂. *jurnal_eproc*, 1-10.

Rumi, Jalaludin (2010). *Tenaga Surya Sebagai Peluang Energi Terbarukan Indonesia*. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluhnoember.

LAMPIRAN



LAMPIRAN 1

FOTO ALAT



Gambar 1. Mekanik Alat Tampak Depan



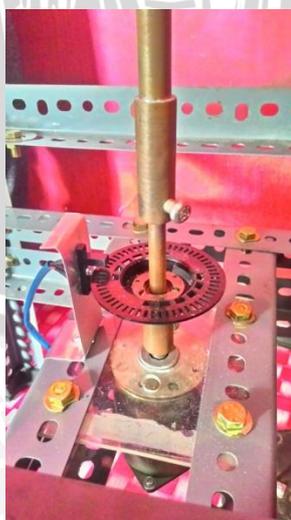
Gambar 2. Bagian dalam ruang *Spin Coating*



Gambar 3. Sistem Elektrik Pengendali *Spin Coater*



Gambar 4. Penampilan LCD 16x2 saat terjadi proses *spin coating*



Gambar 5. Sistem *rotary encoder* dan motor DC

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 Satrja Hidayat^[1], Mamat Rokhmat, M.Si^[2], Ahmad Qurthobi, MT.^[3]
^[1,2,3]Program Studi S1 Teknik Fisika, Universitas Telkom, Bandung
aldy.satrjahidayat@gmail.com, mamat.rokhmat76@gmail.com, qurthobi@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° celsius

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 thickness 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 ° Celsius

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 diamgerahi 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

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 sentrifugal 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 berisi 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

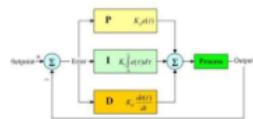
2.12 Electric Thermostat

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 pengendalian motor. Beberapa contoh aplikasi PWM adalah pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengendalian 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 mengkonvergensi ke *steady state*. Sedangkan *steady state error* adalah perbedaan antara *steady state output* dengan *set point* yang diinginkan. *Kp* pada sistem berguna untuk mengurangi *rise time*, sedangkan *Ki* untuk menghilangkan *steady state error*.

Tabel 2.1 Pengaruh *Kp* dan *Ki*

Respon	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State Error
<i>Kp</i>	Turun	Naik	-	Turun
<i>Ki</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.

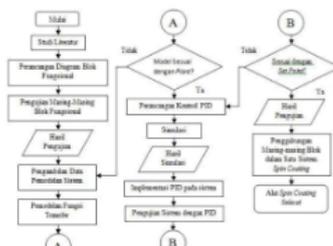
1. Menentukan blok sistem dan spesifikasi komponen yang akan digunakan;
2. Perancangan blok *driver* motor;
3. Melakukan pemodelan kontrol PI pada motor;
4. Pengimplementasian kontrol PI pada motor;
5. Melakukan pengukuran dan pengambilan data berdasarkan *set point* yang diberikan;
6. Perancangan blok 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

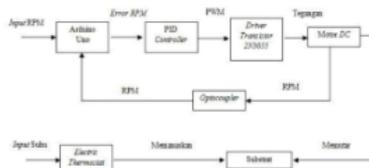
Alat	Bahan
Neraca Digital	Papan PCB (<i>Printed Circuit Board</i>)
Gelas Kimia	Plat besi
Ultrasonic Bath	Motor DC <i>brushless</i> (<i>fan</i>)
Magnetic Stirrer	Kabel Jumper
Card Data DC	Arduino UNO (<i>ATmega328P</i>)
Multimeter Digital	Kompor listrik
Solder	Electric Thermostat (HOPE, Cina)
Termis	Sensor Optocoupler
Parasetor Termis	Fluorine-doped Tin Oxide / FTO (Solaronk, Swis)
Pipet	TiO ₂ Anatas (Brahacem, Indonesia)
Lap Kaino	Alkohol 70%
Gelas Ukur	Aquadest
Okuloskop	Polyvinyl alcohol / PVA (Brahacem, Indonesia)
Botol Isotans	LiOH (Brahacem, Indonesia)

3.3 Perancangan Sistem Putaran *Spin Coating*



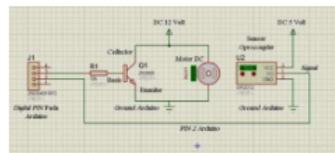
Gambar 3.6 Diagram Alir Sistem Putaran

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 diintegrasikan 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

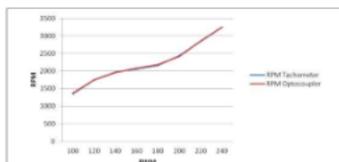


Set Point (°Celsius)	Suhu Awal (°Celsius)	Over Shoot Suhu (°Celsius)	Waktu Menuju Stabil (Detik)
40	31	47	673
60	32	65	282
80	31	85	275
100	30	104	261
120	30	123	263
140	28	143	301
160	30	161	336
180	30	191	388
200	30	200	419

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*.



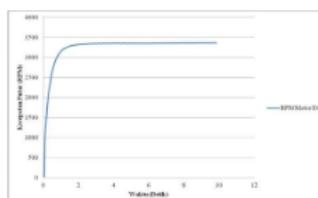
Gambar 4.2 Hasil Perbandingan

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 3365 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.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Sehingga didapatkan rumus fungsi transfer sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{280.4167}{0.25 s + 1}$$

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