

PERANCANGAN PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC PADA MESIN SABLON KAOS DENGAN PULSE WIDTH MODULATION (PWM)

Bagus Catur Wibowo^{1*)}, Aris Triwiyatno² dan Sudjadi³

¹²³Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

^{*)}E-mail: baguscaturwibowo@students.ac.id

Abstrak

Otomasi sablon kaos adalah sebuah perancangan yang mengubah sistem penyablonan kaos menjadi otomatis menggunakan penggerak berupa motor dan silinder aktuator. Otomasi sablon kaos terdiri dari sistem pemindah kaos, sistem pemberian tinta sablon, sistem penyablonan dan sistem pengeringan. Proses memindahkan kaos menggunakan konveyor dengan penggerak motor listrik, pemberian tinta dilakukan dengan pompa tinta, proses penyablonan menggunakan motor listrik yang terhubung dengan *leadscrew* untuk mengubah putaran motor menjadi gerakan linier, proses pengeringan dilakukan dengan lampu halogen sebagai pemanas. Proses penyablonan pada desain ukuran kecil dan besar memiliki perbedaan dalam kecepatan penyablonan, semakin besar ukuran desain semakin pelan kecepatan penyablonan yang dibutuhkan untuk hasil yang terbaik. Pada makalah ini akan dirancang spesifikasi kebutuhan motor penggerak konveyor, spesifikasi pompa tinta, spesifikasi motor penyablonan dan spesifikasi lampu halogen. Perancangan kontrol kecepatan motor penyablonan dilakukan pada motor DC 37GB31ZY yang memiliki torsi 1,098 Nm dengan kecepatan maksimal 140 rpm. Kontrol kecepatan menggunakan *Pulse Width Modulation* yang dibangkitkan dari IC NE555 berdasarkan variasi perubahan resistansi potensiometer sebagai kendali *duty cycle*. Nilai *duty cycle* minimal yang dapat dihasilkan bernilai 3,26% dan nilai maksimal yang dihasilkan mencapai 99,74% pada tegangan masukan 12,75 V. Kecepatan penyablonan maksimal yang dihasilkan dengan kontrol kecepatan mencapai 14,7 mm/s.

Kata kunci: motor DC, *pulse width modulation*, *leadscrew*

Abstract

Screen printing automation changes the t-shirt printing system to be automatic using motor and actuator cylinder. T-shirt screen printing automation consists transfer system, ink system, screen printing system and drying system. The transfer system uses conveyor driven by electric motor, the ink system uses ink pump, the screen printing system uses electric motor and leadscrew to convert rotation motion into linear motion, the drying system uses halogen lamp as heater. The screen printing process for small and large size designs has differences in printing speed, the larger the design size the slower the printing speed is needed. This final project designed specifications for the needs of conveyor motor, ink pump, printing motor and halogen lamp. The design of speed control for the printing motor is carried out on a 37GB31ZY DC motor which has torque up to 1,098 Nm with maximum speed 140 rpm. Speed control uses the Pulse Width Modulation method generated from IC NE555 based on variations in potentiometer resistance. The minimum duty cycle value that can be generated is 3.26% and the maximum value produced is 99.74% at an input voltage of 12.75 V. The maximum printing speed produced with speed control reaches 14.7 mm/s.

Keywords: DC motor, *pulse width modulation*, *leadscrew*

1. Pendahuluan

Pakaian menjadi kebutuhan utama masyarakat untuk menutup dan melindungi tubuh, pakaian juga digunakan untuk memperindah penampilan. Pakaian memiliki banyak jenis model, salah satunya adalah kaos. Kaos digunakan untuk kegiatan sehari-hari karena memiliki bahan yang nyaman dan sederhana. Kaos seringkali ditambahkan tulisan maupun gambar tertentu dengan proses sablon. Sablon merupakan proses menambahkan tinta di atas

permukaan melalui media cetak. Tinta akan membentuk tulisan atau gambar sesuai dengan media cetak yang digunakan [1].

Banyaknya jumlah penduduk berbanding lurus dengan kebutuhan sandang, tingginya kebutuhan masyarakat mendorong industri sablon untuk melakukan inovasi dari sablon konvensional menjadi otomasi mesin sablon. Industri kaos sablon yang memiliki kapasitas produksi yang tinggi, berarti memerlukan bahan baku dan ongkos produksi yang lebih banyak [2].

Produksi kaos sablon meliputi proses pembuatan media cetak, proses sablon dan pengeringan. Setiap proses memiliki peran yang penting dalam menentukan kualitas kaos sablon yang dihasilkan. Hasil sablon terkadang mengalami kegagalan seperti timbulnya bercak tinta, warna yang tidak merata hingga adanya luberan cat di luar desain. Kegagalan sablon disebabkan oleh banyak faktor, salah satunya adalah kecepatan kuas dalam melakukan proses sablon kaos [3].

Proses sablon memiliki kecepatan dan tekanan tertentu untuk mendapatkan hasil sablon yang baik. Rata-rata kecepatan sablon antara 10-300 mm/s dengan tekanan berkisar antara 10 hingga 200 N [4]. Penentuan kecepatan sablon dipengaruhi juga oleh resolusi dari desain tulisan atau gambar, semakin besar desain yang akan dicetak maka akan semakin rendah kecepatan yang dibutuhkan untuk mendapatkan hasil sablon yang baik [1].

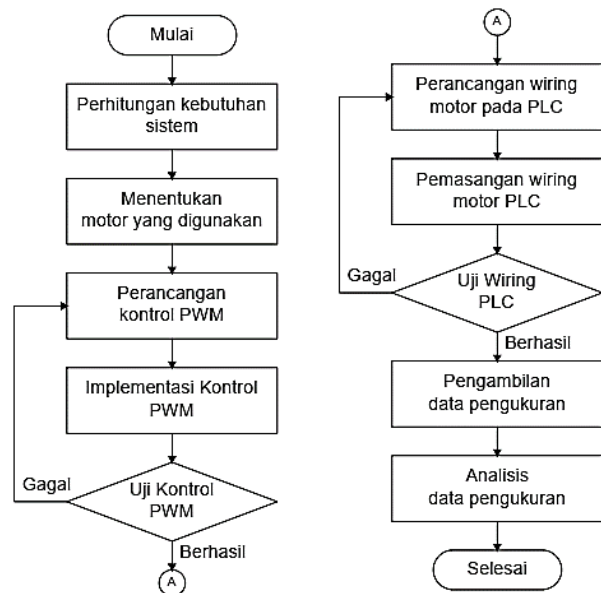
Pengaturan kecepatan sablon konvensional dapat dilakukan dengan memperkirakan kecepatan kuas sablon menggunakan tangan secara manual, pengaturan kecepatan pada mesin sablon diatur pada penggerak yang terhubung dengan kuas sablon. Penggerak yang dapat digunakan adalah motor listrik. Motor Arus Searah/Motor DC banyak digunakan dalam industri yang membutuhkan kecepatan variatif, torsi besar yang dihasilkan pada kecepatan rendah dengan pengaturan kecepatan yang sebanding dengan tegangan masukan membuat motor DC banyak dimanfaatkan [5].

Pengendalian kecepatan putar motor DC dapat dilakukan dengan mengatur tegangan masukannya, pengaturan tegangan tersebut dapat dilakukan dengan *Pulse Width Modulation* (PWM). Pengaturan tegangan dengan PWM memiliki nilai keluaran yang variatif sesuai dengan prosentase dari tegangan masukan. Kelebihan kontrol PWM adalah memiliki biaya yang terjangkau, nilai efisiensi tinggi dan dapat dengan mudah mengatur tegangan yang dibutuhkan sesuai dengan beban [6].

Dalam penelitian ini dirancang sistem kuas sablon yang digerakkan oleh motor DC dengan pengaturan kecepatan putar menggunakan metode PWM. Kuas sablon memiliki kecepatan yang berbeda tergantung dengan ukuran desain yang dicetak, nilai kecepatan kuas sablon ditentukan dengan cara perhitungan, kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran kecepatan aktual. Perhitungan dan pengukuran akan dianalisis dan ditarik sebuah kesimpulan.

2. Metode

Tahap pelaksanaan perancangan alat mengacu pada bagan alir yang ditampilkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir perencanaan alat

Gambar 1. merupakan diagram alir perencanaan perangkat keras pengendalian kecepatan kuas sablon. Perencanaan dimulai dengan merancang desain mekanis alat sablon, desain mekanis digunakan untuk menentukan berat dan gaya yang akan bekerja pada saat mesin melakukan proses sablon. Perhitungan gaya kemudian dikonversikan untuk menentukan torsi dan daya yang dibutuhkan pada Motor DC. Motor DC yang dipilih memiliki spesifikasi daya, tegangan dan arus nominal. Penentuan komponen pada kontrol PWM mengacu pada spesifikasi Motor DC terkait. Kontrol PWM yang dibuat kemudian diuji untuk mengetahui apakah hasil tegangan keluaran telah sesuai dengan perancangan.

2.1 Perancangan Desain Alat Sablon

Parameter alat sablon dibutuhkan untuk menghitung dan menentukan kapasitas dan spesifikasi komponen yang sesuai dengan perancangan. Alat sablon yang akan dirancang memiliki parameter yang ditampilkan pada Tabel 1

Tabel 1. Parameter dalam alat sablon	
Parameter	Value
Massa silinder kuas	1,1 kg
Massa lengan printing	7,2 kg
Massa roller konveyor	2,4 kg
Massa papan kaos	1 kg
Massa jenis cat	1 gr/ml
Massa sabuk konveyor	1,2 kg
Volume cat	250 ml
Percepatan gravitasi	9,81 m/s ²
Dimensi media cetak	30× 40 cm ²
Panjang lintasan kuas	30 cm
Diameter roda gigi	60 mm
Panjang konveyor	120 cm

2.2 Perancangan Perangkat Keras

2.2.1 Perancangan Motor Penyablonan

Berat yang akan dibebankan pada motor penyablonan meliputi berat lengan kuas, penahan, berat silinder dan kuas pada Tabel 1. Massa total yang akan ditanggung motor DC mencapai 8,55 kg. Dengan nilai kecepatan gravitasi 9,81 m/s² dan koefisien gesekan antara karet dengan permukaan padat mencapai 1,4. Gaya berat yang dibebankan pada motor DC dihitung dengan persamaan 1.

$$F_{total} = W_{total} + F_g \quad (1)$$

Keterangan:

- F_{total} = Gaya total (N)
- W_{total} = Massa yang digerakkan (N)
- F_g = Gaya gesek (N)

Torsi adalah besar kekuatan untuk menggerakkan beban dari suatu poros. Sistem penyablonan yang digunakan pada perancangan mesin sablon otomatis menggunakan sistem *leadscrew*. *Leadscrew* merupakan sebuah poros yang memiliki ulir yang dapat dipasangkan dengan poros motor menggunakan penyambung (*coupler*), *leadscrew* dapat mengubah gerakan angular dari motor menjadi gerakan linier dengan menempatkan ulir pengunci (*screw nut*) yang memiliki alur yang sama dengan *leadscrew* [7]. Parameter *leadscrew* yang akan digunakan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *leadscrew*

Parameter	Value
Diameter (d)	8 mm
Jarak <i>Pitch</i> (p)	2 mm
Panjang <i>Lead</i> (L)	8 mm/rotasi
Besar sudut <i>pitch</i> (α)	14,5°
Koefisien gesek besi (f)	0,15

Total yang akan ditanggung oleh motor selama proses penyablonan dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2.

$$T_r = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{p + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f p \sec \alpha} \right) \quad (2)$$

Keterangan:

- d_m = Diameter dalam (mm)
- d = Diameter *leadscrew* (mm)
- F = Gaya pada sistem *leadscrew* (N)
- T_r = Torsi motor penggerak (N.mm)
- p = Lebar *pitch* (mm)
- f = Koefisien gesek antar besi
- α = Besar sudut ulir (*deg*)

Dari persamaan perhitungan gaya berat yang akan ditanggung dalam sistem dapat dihitung sebagai berikut:

$$F_{total} = (m \times g) + \mu(m \times g)$$

$$F_{total} = (8,55 \times 9,81) + 1,4(8,55 \times 9,81)$$

$$F_{total} = 83,8755 + 117,4257$$

$$F_{total} = 201,3012 \text{ N}$$

Dari persamaan perhitungan torsi, dengan beban mencapai 201,3 N, torsi minimal yang dibutuhkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_r = \frac{201,3 \times 7}{2} \left(\frac{2 + \pi \times 0,15 \times 7 \sec 14,5^\circ}{\pi \times 7 - 0,15 \times 2 \sec 14,5^\circ} \right)$$

$$T_r = 175,71 \text{ Nmm}$$

$$T_r = 0,175 \text{ Nm}$$

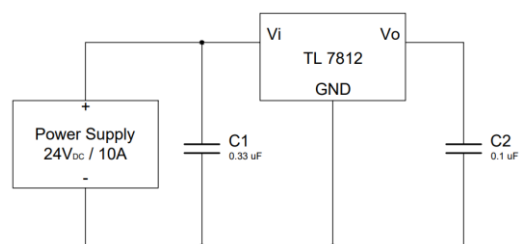
Torsi minimal sistem penyablonan adalah 0,175 Nm. Motor yang dipilih memiliki torsi yang lebih tinggi dari perhitungan dengan tujuan untuk memberi toleransi kegagalan system. Torsi yang dihasilkan pada motor DC permanen magnet memiliki batasan berdasarkan dengan besaran medan magnet dari permanen magnet yang digunakan Sehingga seringkali hanya digunakan pada beban yang rendah, namun motor DC permanen magnet menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan dengan motor DC kumparan bantu [8]. Spesifikasi Motor yang akan digunakan dalam sistem penyablonan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi motor penyablonan

Parameter	Value
Tipe Manufaktur	37GB31ZY
Rasio Gearbox	1:56
Tegangan	12 V
Arus Tanpa Beban	≤ 0,28 A
Arus Maksimal	≤ 4,4 A
Kecepatan Poros	140 rpm
Torsi	1,098 Nm

2.2.2 Perancangan Kontrol PWM

Tegangan nominal motor penyablonan yang tertera pada Tabel 3 adalah 12 V_{DC} sedangkan tegangan catu daya yang digunakan adalah 24 V_{DC} sehingga diperlukan regulator penurun tegangan untuk menghasilkan tegangan yang sesuai. IC TL7812 adalah regulator dengan nilai tetap yang memiliki spesifikasi untuk menurunkan tegangan *input* 14,5-27 V_{DC} menjadi 11,75-12,25 V_{DC}. IC TL7812 dapat mengalirkan arus mencapai 2,4 Ampere. Diagram perancangan rangkaian penurun tegangan DC ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram penurun tegangan tetap 12 V

Penggunaan kapasitor pada rangkaian TL7812 bertujuan untuk mengurangi osilasi pada sumber tegangan masukan dan keluaran dari TL7812. Nilai kapasitor minimal ditentukan dengan persamaan 3.

$$C = \frac{V_{out} (V_{in} - V_{out})}{8\Delta V_C (f_{switch})^2 V_{in}} \quad (3)$$

Keterangan:

- C = Kapasitansi kapasitor (Farad)
- V_{out} = Tegangan keluaran (volt)
- V_{in} = Tegangan masukan (volt)
- f_{switch} = Frekuensi *switching* (hz)
- ΔV_C = Selisih tegangan ripple (volt)

Dari persamaan 3 dapat diperoleh nilai kapasitansi kapasitor minimum yang digunakan sebagai berikut:

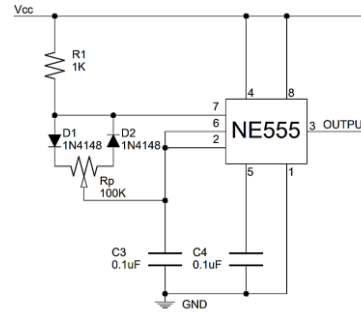
$$C = \frac{12 (24 - 12)}{8 \times 0.12 \times (22000)^2 \times 12}$$

$$C = 1,291 \times 10^{-8}$$

$$C = 129,1 \mu F$$

Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai kapasitor minimum adalah sebesar 129,1 μF . Kapasitor yang akan digunakan pada perancangan kontrol PWM adalah 1000 μF . Nilai kapasitansi yang lebih besar bertujuan untuk menghasilkan osilasi tegangan yang lebih rendah. Pengaturan tegangan dilakukan menggunakan Potensiometer dengan mengubah nilai resistansinya. Potensiometer memiliki rentang tahanan hingga 100 k Ω dengan kapasitas daya 0,5 Watt. Daya potensiometer tidak mencukupi kebutuhan daya motor DC penyablonan pada Tabel 3 yang mencapai 52,8 Watt. Potensiometer dimanfaatkan untuk mengatur nilai tahanan untuk mengalirkan arus sebagai kendali sinyal pada *input* IC NE555.

Potensiometer mengatur besar arus *charging* dan *discharging* pada kapasitor antara Pin 2, Pin 6 dengan Pin 5. Perubahan besar arus yang mengalir pada kapasitor akan menentukan keluaran dari IC NE555 pada Pin 3. Pengaturan nilai resistansi pada potensiometer membuat sinyal *input* pada IC NE555 berubah dan akan menyebabkan perubahan *duty cycle* dengan frekuensi tertentu pada terminal *output*-nya. Perubahan *duty cycle* tersebut yang disebut dengan modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*). Dioda digunakan untuk mengatur laju arus *charging* dan *discharging* antara NE555 dengan kapasitor. Terminal COM pada potensiometer dihubungkan dengan kapasitor dan Pin 6 dan Pin 2. Kapasitor yang digunakan memiliki kapasitansi sebesar 0,1 μF . Kapasitor yang kecil dipilih untuk dapat melakukan proses *charging* dan *discharging* yang lebih cepat. Rangkaian pembangkit sinyal PWM ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram pembangkit sinyal PWM

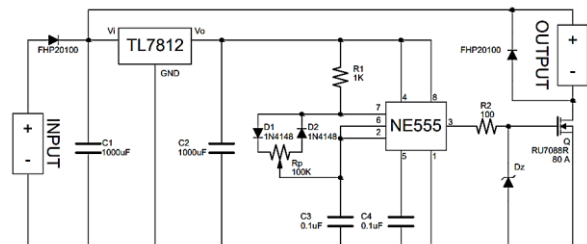
Kontrol PWM digunakan untuk menyesuaikan tegangan pada Motor DC untuk mengatur kecepatan pada proses penyablonan. *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) digunakan sebagai saklar elektrik yang dapat memutus dan menghubungkan rangkaian. MOSFET memiliki kondisi aktif dan non-aktif yang bervariasi berdasarkan frekuensi *switching*. Terminal *Source* pada MOSFET berfungsi sebagai tegangan masuk yang kemudian akan dikeluarkan melalui terminal *Drain*. Nilai tegangan keluaran yang melalui *Drain* ditentukan oleh tegangan yang masuk pada terminal *Gate*, dengan menghubungkan pin 3 pada IC NE555 menuju *Gate* MOSFET, dapat mengatur *switching* pada rangkaian yang akan menuju motor. Tegangan yang diteruskan adalah nilai rata-rata berdasarkan *duty cycle* pada IC NE555.

MOSFET yang digunakan memiliki nilai tahanan dalam (R_{DS}) kecil, kapasitas tegangan dan arus yang lebih besar dari spesifikasi motor pada Tabel 3. Spesifikasi MOSFET yang akan digunakan ditampilkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi MOSFET kontrol PWM

Parameter	Value
Manufaktur	RU7088R
Frekuensi Kerja	22 KHz
Tegangan Maksimal	70 V
Arus Maksimal	80 A
Tahanan Dalam	6,5 m Ω

Rangkaian kontrol PWM dilengkapi proteksi untuk pemasangan polaritas yang terbalik menggunakan dioda pengaman pada sisi masukan dan keluaran. Rangkaian sistem kontrol PWM dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian *schematic* kontrol PWM

Pada tegangan 12 V motor akan menghasilkan kecepatan putar 140 rpm ($2,33 \text{ rps} = 0,37 \text{ rad/s}$) pada poros motor. Kecepatan putar kemudian diteruskan pada *leadscrew* memiliki panjang *lead* 8 mm. Kecepatan penyablolan yang dihasilkan sebagaimana pada persamaan 4.

$$v = n \times L \quad (4)$$

Keterangan:

- v = Kecepatan kuas sablon (mm/s)
- n = Kecepatan putaran motor sablon (rps)
- L = Panjang *lead* dalam satu putaran (mm/rotasi)

Kecepatan maksimal motor penyablolan dapat dihitung berdasarkan persamaan 4 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} v &= n \times L \\ v &= 2,33 \text{ rps} \times 8 \text{ mm} \\ v &= 18,66 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

Kecepatan penyablolan maksimal yang dapat dihasilkan oleh motor penyablolan adalah 18,66 mm/s. Kecepatan tersebut masih berada dalam rentang kecepatan untuk proses penyablolan yaitu 10-300 mm/s [4]. Proses kerja motor DC pada proses sablon dikendalikan oleh *Programmable Logic Controller* (PLC). Kontrol PWM dapat dioperasikan menggunakan dua pin *output* pada PLC, tegangan yang diatur dari PWM dilanjutkan menuju kontak utama pada kontaktor untuk mengatur arah putaran motor. PLC menentukan kapan motor akan berputar searah jarum jam (*forward*) atau berlawanan arah jarum jam (*reverse*). Motor pada mesin sablon otomatis bekerja sesuai dengan urutan yang telah ditentukan pada penelitian lain [9].

2.3 Perancangan Pengkabelan Motor DC

Kuat Hantar Arus (KHA) adalah kemampuan sebuah komponen atau alat untuk dapat mengalirkan arus secara berkala tanpa mengalami kendala. Terdapat toleransi sebesar 125% dari arus yang akan melewati suatu komponen atau terminal [10]. Arus maksimal yang mengalir pada Motor Penyablolan berdasarkan pada Tabel 3 adalah 4,4 A. KHA kontaktor minimal yang dipilih sebagaimana pada persamaan 5.

$$KHA = I_{nominal} \times 125\% \quad (5)$$

Keterangan:

- KHA = Kuat Hantar Arus (Ampere)
- $I_{nominal}$ = Arus yang mengalir (Ampere)

Berdasarkan persamaan 5 Kuat Hantar Arus kontaktor yang dibutuhkan untuk mengalirkan arus pada setiap komponen adalah

$$KHA = I_{nominal} \times 125\%$$

$$KHA = 4,4 \times 125\%$$

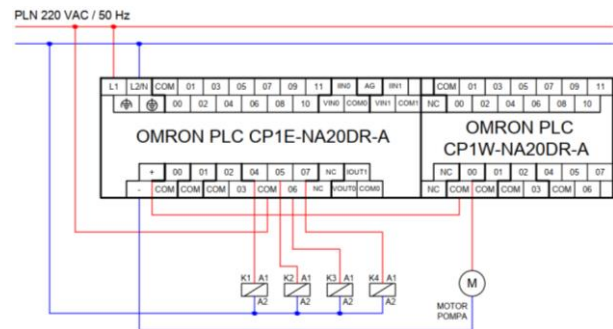
$$KHA = 5,5 \text{ A}$$

Kontaktor yang digunakan memiliki spesifikasi yang ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi kontaktor

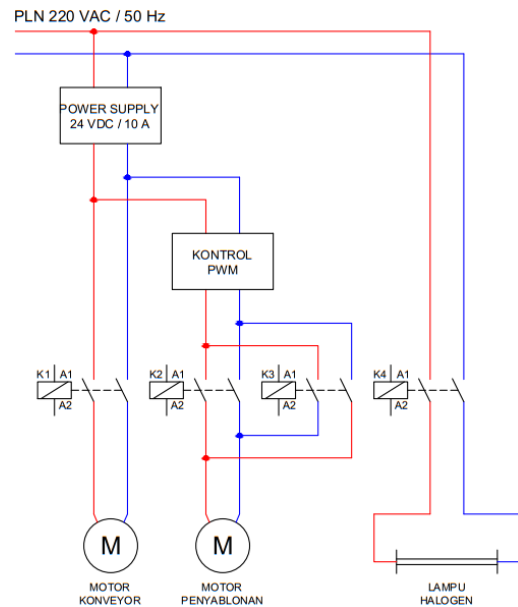
Parameters	Value
Brand	Himel
Tipe Manufaktur	HDC3-1211M7
Tegangan Koil	220 V _{AC}
Kuat hantar arus	12 A

Kontaktor yang dibutuhkan dalam sistem adalah sebanyak 4 buah. Rangkaian kendali motor merujuk pada penelitian lain yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian PLC untuk kendali motor

Kontaktor digunakan untuk menghubungkan dan memutus sumber tegangan pada motor. Rangkaian daya pada mesin sablon otomatis ditampilkan pada Gambar 6



Gambar 6. Rangkaian daya motor mesin sablon otomatis

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Motor Penyablonan

Pengujian motor penyablonan dilakukan dengan memvariasikan tegangan masukan pada motor penyablonan menggunakan *Digital Power Supply*. Tegangan dihubungkan secara langsung dengan terminal motor, besaran yang diamati adalah tegangan, arus dan kecepatan pada motor. Tegangan divariasikan dari awal mula motor tidak bergerak hingga motor mencapai tegangan nominal. Pengujian dilakukan secara parsial, yaitu ketika motor penyablonan belum dihubungkan dengan sistem penyablonan atau bisa disebut tanpa beban. Hasil pengukuran pada motor penyablonan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengujian motor penyablonan

Tegangan (V _{DC})	Arus (A)	Kecepatan (rpm)
1,31	0,13	9,2
2,62	0,15	22,6
3,93	0,16	35,7
5,25	0,16	48,9
6,55	0,17	62,2
7,87	0,18	74,7
9,16	0,18	92,3
10,50	0,2	102,8
11,80	0,22	113,4
13,11	0,23	125,2

Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa motor penyablonan mulai berputar pada tegangan 1,31 V dengan arus 0,13 A dan kecepatan putar 9,2 rpm. Kecepatan motor penyablonan semakin bertambah setiap bertambahnya tegangan diikuti dengan bertambahnya arus.

Pertambahan arus tidak sebesar kenaikan kecepatan dikarenakan belum ada beban yang terpasang pada poros motor penyablonan. Spesifikasi motor penyablonan pada Tabel 3 memiliki arus nominal tanpa beban sebesar 0,28 A dengan kecepatan maksimal hingga 140 rpm pada tegangan 12 V, arus dan putaran maksimal pada Tabel 6 adalah 0,23 A dan 125,2 rpm, terjadi perbedaan arus senilai 0,05 A dan perbedaan kecepatan sebesar 14,8 rpm. Perbedaan kecepatan ini dikarenakan adanya penambahan beban berupa sambungan poros yang digunakan untuk mempermudah proses pengukuran kecepatan saat melakukan pengambilan data.

3.2 Pengujian Kontrol PWM

Kontrol PWM pada sistem sablon otomatis dipasang pada pintu boks panel kontrol dengan tuas potensiometer pada

bagian luar boks. Pemasangan kontrol PWM dalam sistem sablon otomatis dapat dilihat pada Gambar 7



Gambar 7. Pemasangan kontrol PWM

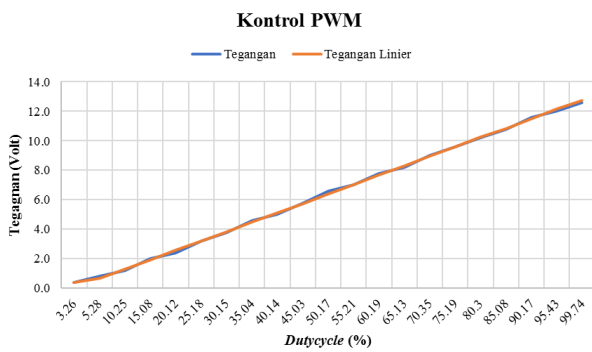
Pengujian kontrol PWM dilakukan dengan menggunakan Oscilloscop untuk melihat nilai *duty cycle* dari kontrol PWM dan tegangan pada sisi keluaran PWM. Pengujian kontrol PWM dilakukan dengan memberikan tegangan masukan sebesar 12,75 V_{DC} kemudian memvariasikan *duty cycle* melalui putaran potensiometer. Hasil pengukuran pada kontrol PWM ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengujian kontrol PWM

Duty cycle (%)	Tegangan Keluaran (V _{DC})
3,26	0,4
5,28	0,8
10,25	1,2
15,08	2
20,12	2,4
25,18	3,2
30,15	3,8
35,04	4,6
40,14	5
45,03	5,8
50,17	6,6
55,21	7
60,19	7,8
65,13	8,2
70,35	9
75,19	9,6
80,30	10,2
85,08	10,8
90,17	11,6
95,43	12
99,74	12,6

Kontrol PWM menghasilkan *duty cycle* maksimal sebesar 99,74% dengan tegangan 12,6 V. Perbedaan tahanan sisa antara kaki potensiometer akan menyebabkan terjadinya proses *charging* dan *discharging* pada kapasitor NE555 sehingga *duty cycle* yang dihasilkan tidak dapat mencapai 0% atau 100%.

Nilai *duty cycle* memiliki sisa nilai pada pengaturan minimal dan maksimal. Nilai ini dihasilkan dari tahanan di dalam potensiometer yang masih memiliki tahanan sisa meskipun diatur pada nilai maksimal atau minimal. Tahanan sisa ini yang menjadi penyebab pengaturan *duty cycle* tidak dapat bernilai 0% atau 100%. Grafik kontrol PWM terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik kontrol PWM

Perubahan tegangan pada kontrol PWM pada Gambar 9 bersifat linier karena nilai tegangan dan *duty cycle* mendekati persamaan 6

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

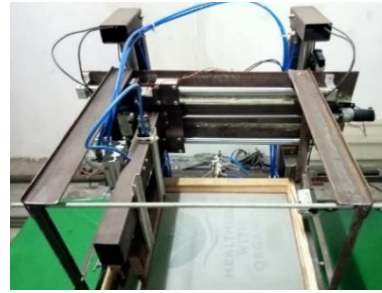
Keterangan:

- D = Nilai *duty cycle* (%)
- V_{out} = Tegangan keluaran (Volt)
- V_{in} = Tegangan masukan (Volt)

Terdapat selisih antara perhitungan dengan hasil pengukuran kontrol PWM sebesar 0,2 V. Data pada Tabel 7 yang menunjukkan *duty cycle* 99,74% hanya memiliki tegangan sebesar 12,6 V dari tegangan masukan yang nilainya sebesar 12,75 V. Selisih tegangan sebesar 0,15 V antara tegangan masukan dan keluaran dapat diakibatkan karena rugi-rugi tegangan pada komponen elektronika daya penyusun rangkaian kontrol PWM dengan potensiometer.

3.3 Pengujian Sistem Penyablonan

Poros motor penyablonan dihubungkan dengan *leadscrew* menggunakan *coupler*. *Leadscrew* mengubah putaran motor menjadi gerakan linier horizontal yang terhubung dengan kuas sablon. Pemasangan motor pada *leadscrew* menjadi sebuah sistem penyablonan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Sistem penyablonan

Pengujian sistem penyablonan dilakukan ketika motor belum diaplikasikan pada sistem, dengan menghubungkan motor ke sistem tanpa tinta dan dengan tinta sablon. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan nilai PWM dari minimum hingga maksimum. Data hasil pengujian motor penyablonan yang dikendalikan oleh kontrol PWM ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Pengujian sistem penyablonan tanpa beban

Tegangan (V _{DC})	Arus (A)	Kecepatan (rpm)
0,045	0,03	0
3,2	0,1	24,7
5,8	0,12	49,4
7,8	0,12	69,2
8,2	0,12	75,8
9,6	0,12	88,5
10,2	0,12	95,3
11,6	0,13	107,2
12,6	0,16	119,9

Data pengujian pada Tabel 8 menunjukkan bahwa perubahan kecepatan sebanding dengan tegangan kontrol PWM. Tegangan keluaran maksimal mencapai 12,6 V dengan kecepatan 119,9 rpm. Data pengukuran setelah motor diaplikasikan pada sistem ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Pengujian sistem penyablonan tanpa beban

Tegangan (V _{DC})	Arus (A)	Kecepatan (rpm)	Kecepatan (mm/s)
0,056	0,03	0	0
3,2	0,69	23,5	3,13
5,74	0,69	45,4	6,05
7,98	0,72	67,4	8,99
8,59	0,72	73,4	9,79
9,33	0,76	83,4	11,12
10,24	0,77	92,5	12,33
11,38	0,82	105,2	14,03
12,12	0,87	110,6	14,75

Pengujian pada Tabel 9 menunjukkan bahwa motor penyablonan mulai bergerak pada tegangan 3,2 V dengan kecepatan penyablonan 3,13 mm/s. Tegangan mula yang dibutuhkan untuk menggerakkan motor bertambah karena beban bertambah. Kecepatan yang dihasilkan pada tegangan 12,12 V mencapai 14,75 mm/s. Pengujian sistem penyablonan juga dilakukan dengan memberikan tinta sablon sebagai simulasi untuk proses penyablonan. Hasil pengukuran pada sistem sablon ketika berbeban ditampilkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Pengujian sistem penyablonan berbeban

Tegangan (V _{DC})	Arus (A)	Kecepatan (rpm)	Kecepatan (mm/s)
0,054	0,03	0	0,00
3,34	0,69	23,6	3,15
5,82	0,69	45,7	6,09
7,66	0,72	66,9	8,92
8,68	0,73	73,7	9,83
9,53	0,76	83,2	11,09
10,44	0,78	92,3	12,31
11,34	0,82	105,1	14,15
12,12	0,86	110,8	14,77

Kecepatan maksimal saat sistem penyablonan berbeban pada Tabel 10 berada pada tegangan 12,12 V dengan kecepatan 14,77 mm/s. Perubahan pada sistem penyablonan dapat diamati dengan mengambil data pengukuran saat *duty cycle* kontrol PWM mencapai batas maksimal pada setiap tabel pengujian. Data pengukuran yang didapatkan pada sistem penyablonan untuk setiap kondisi dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Pengujian sistem penyablonan

Kondisi	Tegangan (V _{DC})	Arus (A)	Kecepatan (rpm)
Motor Penyablonan	12,6	0,16	119,9
Sistem tanpa beban	12,12	0,87	110,6
Sistem berbeban	12,12	0,86	110,8

Pada Tabel 11 kecepatan putar motor sebelum diaplikasikan pada sistem adalah 119,9 rpm pada nilai maksimum. Kecepatan mengalami penurunan ketika motor penyablonan diaplikasikan, kecepatan sistem tanpa tinta sablon bernilai 110,6 rpm. Kecepatan sistem mengalami penurunan sebesar 7,75%. Penurunan kecepatan disebabkan oleh bertambahnya beban pada poros motor. Kecepatan putar motor menjadi 110,8 rpm ketika motor diberi beban berupa tinta sablon. Kenaikan kecepatan motor disebabkan oleh tinta sablon yang memperkecil gesekan antara karet dengan media cetak, sehingga beban pada sistem berkurang.

Arus yang mengalir pada motor pada Tabel 11 sebelum masuk sistem adalah 0,16 A. Arus yang mengalir setelah masuk sistem menjadi 0,87 A. Arus meningkat sebesar 543,75%, kenaikan terjadi karena kebutuhan torsi yang meningkat untuk menggerakkan sistem. Tegangan masukan pada kontrol PWM adalah 12,75 V pada setiap pengujian. Tegangan keluaran PWM maksimum sebelum masuk sistem adalah 12,6 V, tegangan setelah masuk sistem menjadi 12,12 V. Penurunan tegangan setelah masuk sistem mencapai 4,94%. Penurunan tegangan disebabkan konsumsi daya dari motor yang meningkat karena beban dan kebutuhan torsi motor meningkat, sehingga arus pada motor meningkat dan menyebabkan rugi-rugi tegangan meningkat.

4. Kesimpulan

1. Pengaturan kecepatan motor dilakukan dengan *Pulse Width Modulation* menggunakan rangkaian potensiometer, IC NE555 dan MOSFET, perubahan resistansi antara kaki potensiometer mengubah nilai arus *charging* dan *discharging* pada kapasitor pengisian yang mengubah *duty cycle* pada keluaran pin keluaran IC NE555 yang mengendalikan pensaklaran MOSFET. Nilai *duty cycle* yang dihasilkan bernilai 3,26-99,74% dengan rentang tegangan 0,4-12,6 V. Hasil kecepatan penyablonan setelah diaplikasikan pada sistem mesin sablon kaos memiliki rentang 3,15-14,77 mm/s.
2. Perancangan motor konveyor menghasilkan kecepatan 211,2 rpm atau 66,3cm/s yang telah memenuhi kebutuhan sistem untuk kecepatan minimal 40 cm/s. Perancangan motor pompa tinta menghasilkan debit sebesar 152,3 ml/s yang kurang dari kebutuhan sistem yaitu 180 ml/s, debit pada motor pompa tinta tidak sesuai dengan perancangan dapat disebabkan karena pengaruh dari kekentalan tinta atau dari kapasitas pompa yang tidak sesuai spesifikasi. Perancangan lampu halogen menghasilkan daya sebesar 428,3 Watt sedangkan pada spesifikasi lampu menyatakan 600 Watt, perbedaan ini terjadi karena lampu halogen belum mencapai daya maksimalnya.

Referensi

- [1] D. Novaković, "Screen Printing," dalam *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*, Novi Sad, Serbia: Elsevier Inc., 2015, hal. 247-261.
- [2] Demus K, "Perkembangan Industri Kaos Sablon Di Kecamatan Cibeunying Kaler Kota Bandung Tahun 1995-2008 Kajian Sosial-Ekonomi," Laporan Tugas Akhir, Fakultas Sosial Ekonomi, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, 2013.
- [3] D. A. Prastyo, "Upaya Minimalisasi Kecacatan Sablon Kaos Dengan Metode Statistical Quality Chart dan FMEA di UKM Gondrong Studio

- Sablon,” Laporan Tugas Akhir, Program Studi Teknik Industri, Universitas 17 Agustus 1945, Surabaya, 2021.
- [4] D. Kuscer, “Screen printing,” dalam *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, vol. 1–3, Ljubljana, Solvenia: Elsevier Inc., 2021, hal. 227–232.
- [5] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, vol. 5, New York, USA: McGraw-Hill Companies Inc., 2012. hal. 464-564.
- [6] K. Priyanka dan A. Mariyammal, “DC Motor Speed Control Using PWM,” *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 3, no. 2, Feb 2018.
- [7] E. A. Avallone dkk., *Marks’ Standard Handbook For Mechanical Engineers*, vol. 10, New York, USA: McGraw-Hill Companies Inc., 1996. hal. 10-4.
- [8] F. D. Petruzella, “*Electric Motors Control SyStemS Electric Motors and Control Systems, First Edition*,” 2010.
- [9] S. N. Wachidah, A. Triwiyatno, dan Sudjadi, “Perancangan Sistem Otomatisasi Berbasis Programmable Logic Controller (PLC) Dengan Human Machine Interface (HMI) Pada Mesin Sablon,” Laporan Tugas Akhir, Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, 2023.
- [10] A. Sufiyanto, Sayogo B, dan Rusiadi A, “Keselamatan dan Pemasangan Instalasi Listrik Voltase Rendah untuk Rumah Tangga,” Jakarta, Indonesia: ESDM, 2016. hal. 34.