

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait sistem inspeksi visual otomatis pada *Printed Circuit Board* (PCB) menunjukkan bahwa proses inspeksi membutuhkan integrasi yang baik antara sistem mekanikal, elektronik, akuisisi citra, dan mekanisme pergerakan agar proses inspeksi dapat berjalan secara presisi, konsisten, dan berulang. Penelitian yang dilakukan oleh Fonseca dkk. membahas perkembangan sistem *Automatic Optical Inspection* (AOI) pada PCB yang memanfaatkan *machine vision*, *image processing*, dan sistem inspeksi otomatis untuk meningkatkan kualitas inspeksi dibandingkan metode manual. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa sistem inspeksi modern terdiri dari integrasi sistem perpindahan PCB, pencahayaan, kamera, serta pengolahan citra untuk mendeteksi berbagai jenis cacat PCB secara otomatis. Namun, penelitian tersebut lebih berfokus pada metode inspeksi dan pengolahan citra dibandingkan mekanisme pergerakan *linear* pada perpindahan PCB (Foncesa et al., 2024).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Guo dan Wang membahas sistem *Automatic Optical Inspection* (AOI) berbasis *linear array* camera untuk mendeteksi cacat PCB secara otomatis. Sistem yang dirancang menggunakan *motion platform*, *optical system*, serta *image acquisition system* untuk mendukung proses inspeksi visual PCB. Penelitian ini menjelaskan bahwa proses akuisisi citra membutuhkan gerakan *linear* antara kamera dan objek agar proses inspeksi dapat berjalan dengan baik. Selain itu, penelitian juga membahas proses *image preprocessing*, *image alignment*, dan *contour comparison* untuk mendeteksi kerusakan pada PCB. Akan tetapi, sistem yang dikembangkan masih berfokus pada proses inspeksi dan belum membahas mekanisme pergerakan motor *stepper* berbasis mikrokontroler untuk perpindahan *unit mount* PCB secara spesifik (Guo & Wang, 2016).

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. mengembangkan sistem *Automatic Optical Inspection* (AOI) berbasis *machine vision* dengan integrasi *three-axis positioning system*, *CCD camera*, *lighting device*, dan *linear*

motor untuk mendeteksi kualitas lubang PCB secara otomatis. Sistem mampu melakukan image registration, image segmentation, serta defect recognition dengan akurasi yang tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *positioning* dan movement system memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan proses akuisisi citra PCB. Namun, penelitian tersebut masih menggunakan sistem *positioning* berbasis industri dan belum menerapkan kendali gerak linear motor *stepper* berbasis Arduino untuk sistem perpindahan PCB yang lebih sederhana dan ekonomis (Wang et al., 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Nava-Pintor dkk. membahas perancangan sistem aktuator linear yang terintegrasi dengan computer vision untuk melakukan tracking posisi secara real-time. Sistem menggunakan OpenCV, low-pass filter, dan fuzzy logic controller sebagai kontrol closed-loop sehingga menghasilkan performa kontrol yang stabil dengan resolusi gerak yang baik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan tracking posisi aktuator secara presisi. Akan tetapi, penelitian ini belum diterapkan pada sistem inspeksi visual PCB serta belum membahas perpindahan *unit mount* PCB pada proses inspeksi otomatis (Nava-Pintor et al., 2023)

Penelitian lain yang dilakukan oleh Junaidi dkk. mengembangkan sistem kontrol kecepatan motor *stepper* berbasis Arduino pada proses coating otomatis. Sistem menggunakan metode closed-loop control untuk menjaga kestabilan kecepatan motor *stepper* sehingga menghasilkan tingkat akurasi motor sebesar 99.09%. Penelitian ini menunjukkan bahwa Arduino mampu digunakan sebagai pengendali motor *stepper* dengan performa yang stabil. Namun, penelitian tersebut masih berfokus pada pengendalian kecepatan motor dan belum membahas sistem *positioning* maupun perpindahan linear pada sistem inspeksi visual PCB (Junaidi et al., 2023).

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Liu dkk. merancang sistem micro/nano-*positioning* berbasis *stepper* motor untuk menghasilkan sistem *positioning* dengan resolusi tinggi. Sistem menggunakan closed-loop control dan sensor posisi untuk mempertahankan akurasi gerak hingga skala nano. Penelitian ini menunjukkan bahwa motor *stepper* mampu menghasilkan pergerakan presisi tinggi untuk aplikasi *positioning*. Akan tetapi, sistem yang digunakan masih

berbasis kontrol industri yang relatif kompleks dan belum diterapkan pada sistem inspeksi visual PCB berbasis mikrokontroler sederhana seperti Arduino (Liu et al., 2024).

Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem inspeksi visual berbasis image processing, machine vision, dan *positioning system* tanpa integrasi langsung dengan sistem perpindahan *unit mount* PCB berbasis kendali gerak linear motor *stepper*. Selain itu, metode inspeksi yang digunakan umumnya masih bersifat statis sehingga belum mendukung proses pengambilan video secara real-time selama sistem bergerak menuju beberapa titik inspeksi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan mekanisme pergerakan *linear motor stepper* berbasis Arduino untuk memindahkan *unit mount* PCB menuju area inspeksi visual otomatis secara stabil, presisi, dan berulang. Sistem yang dirancang juga diintegrasikan dengan proses *live-stream inspection* sehingga proses inspeksi visual dapat dilakukan secara *real-time* tanpa menghentikan pergerakan sistem pada setiap titik target inspeksi. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu meningkatkan efisiensi, konsistensi, dan kestabilan proses inspeksi visual PCB secara otomatis.

Pada Tabel 2.1 ditunjukkan ringkasan penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Penelitiann Terdahulu		Hasil
1	Judul	<i>Automatic Printed Circuit Board Inspection: A Comprehensive Survey</i>	Penelitian menjelaskan bahwa sistem inspeksi visual PCB modern terdiri dari integrasi sistem mekanik perpindahan PCB, akuisisi citra, pencahayaan, image processing, dan deteksi cacat otomatis untuk meningkatkan kualitas inspeksi dibandingkan metode manual.
	Penulis/Tahun	Foncesa et al. (2024)	

	Metodologi	Algoritma: Automatic Optical Inspection (AOI), machine vision, dan image processing.	
		Deteksi: Kamera digital digunakan untuk mendeteksi cacat PCB seperti missing component, solder defect, short circuit, dan open circuit.	
		Pengujian: Evaluasi sistem dilakukan berdasarkan akurasi deteksi, kecepatan inspeksi, dan efisiensi proses inspeksi otomatis.	
2	Judul	<i>The Introduction of AOI in PCB Defect Detection Based on Linear Array Camera</i>	Penelitian membahas sistem Automatic Optical Inspection (AOI) berbasis machine vision untuk mendeteksi cacat PCB dengan integrasi hardware inspection system, motion platform, dan linear array camera sehingga proses inspeksi dapat dilakukan secara otomatis dan presisi.
	Penulis/Tahun	Guo & Wang, (2016)	
	Metodologi	Algoritma: <i>Contour comparison dan image processing untuk mendeteksi perbedaan antara PCB standar dan PCB uji.</i>	
Deteksi: Menggunakan CMOS linear array camera, optical system, dan X-Y motion platform untuk akuisisi citra PCB secara otomatis.			
Pengujian: Pengujian dilakukan melalui proses image preprocessing, image alignment, dan defect detection untuk mendeteksi short circuit, missing hole, dan kerusakan jalur PCB.			
3	Judul	A Machine Vision Based Automatic Optical Inspection System for	Sistem berhasil mengimplementasikan Automatic Optical Inspection (AOI) berbasis machine vision dengan integrasi

		Measuring Drilling Quality of Printed Circuit Boards	three-axis <i>positioning</i> system, CCD camera, dan linear motor untuk mendeteksi kualitas lubang PCB secara otomatis dengan akurasi tinggi.
	Penulis/Tahun	Wang et al. (2018)	
	Metodologi	Algoritma: Image registration, image segmentation, geometrical transformation, dan defect recognition.	
		Deteksi: Menggunakan CCD camera, lighting device, dan machine vision untuk mendeteksi missing hole, multi-hole, dan posisi lubang PCB yang tidak sesuai.	
		Pengujian: Pengujian dilakukan dengan analisis akurasi posisi, pengolahan citra, serta evaluasi performa sistem AOI berbasis <i>positioning</i> system.	
4	Judul	Design, Implementation, and Control of a Linear Electric Actuator for Educational Mechatronics	Sistem mampu melakukan tracking posisi aktuator secara real-time menggunakan computer vision dengan akurasi ± 2.5 mm, presisi tinggi, serta resolusi sekitar 0.298 mm dan performa kontrol yang stabil.
	Penulis/Tahun	(Nava-Pintor et al., 2023)	
	Metodologi	Algoritma: Menggunakan OpenCV, low-pass filter, dan fuzzy logic controller sebagai kontrol closed-loop sistem.	
		Deteksi: Menggunakan kamera dan metode ArUco marker untuk estimasi pose dan tracking posisi aktuator secara real-time.	
		Pengujian: Evaluasi akurasi, presisi, resolusi sistem, dan performa kontrol aktuator linear.	

5	Judul	Design and Realization of Temperature and Speed Control System of Meyer Rod Coating Based on Arduino for Silver Nanowires Thin Film Applications	Sistem mampu mengontrol kecepatan motor <i>stepper</i> dan suhu pemanas secara otomatis dengan akurasi motor mencapai 99.09% dan performa kontrol yang stabil.
	Penulis/Tahun	(Junaidi et al., 2023)	
	Metodologi	Algoritma: Closed-loop <i>setpoint</i> control berbasis Arduino untuk pengendalian kecepatan motor <i>stepper</i> .	
		Pengujian: Kalibrasi <i>tachometer</i> dan pengujian respon waktu sistem untuk mengetahui kestabilan kecepatan motor.	
6	Judul	<i>Research on Micro-/Nano-Positioning System Driven by a Stepper Motor</i>	Sistem mampu menghasilkan resolusi hingga 100 nm dengan pergerakan presisi tinggi menggunakan mekanisme flexible hinge dan <i>stepper</i> motor, serta menunjukkan stabilitas dan performa yang baik pada pengujian eksperimen.
	Penulis/Tahun	Liu et al., (2024)	
	Metodologi	Algoritma: Pemodelan sistem menggunakan pendekatan mekanika (Hooke's Law dan Lagrange) serta kontrol <i>stepper</i> motor berbasis pulse dengan closed-loop current <i>feedback</i> (PID control).	
		Deteksi: Menggunakan sensor perpindahan kapasitif (capacitive displacement sensor) dan encoder untuk	

		membaca posisi, kecepatan, serta umpan balik sistem.
		Pengujian: Pengujian dilakukan melalui simulasi (Finite Element Analysis/ANSYS) dan eksperimen meliputi kalibrasi displacement, analisis scaling ratio, uji stabilitas, serta round-trip testing.

2.2 Landasan Teori

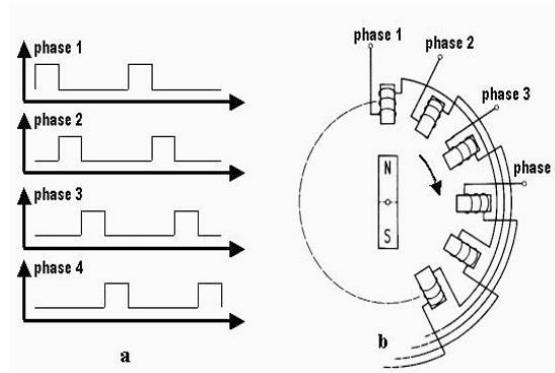
2.2.1 Motor Stepper

Motor *stepper* adalah motor listrik yang mengubah pulsa digital menjadi gerakan sudut diskrit. Setiap pulsa menghasilkan perpindahan sudut tertentu (*step angle*). Motor *stepper* juga sebuah aktuator elektomekanis yang mengubah sinyal pulsa menjadi perpindahan sudut diskrit sehingga sesuai digunakan pada aplikasi *positioning* dan otomatis.

Motor *stepper* bergerak dengan langkah-langkah yang sangat jelas terlihat dari pergerakan rotasi dalam mengubah pulsa menjadi gerakan mekanis. Dalam setiap langkah motor *stepper* didefinisikan sebagai *step*. Karakteristik ini memungkinkan motor *stepper* menghasilkan kontrol posisi yang presisi tanpa memerlukan umpan balik kontinu (Patonra et al., n.d., 2020).

Secara konstruksi, motor *stepper* terdiri dari beberapa bagian, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian diam yang tersusun atas beberapa kumparan (*coil*) yang berfungsi menghasilkan medan elektromagnetik ketika dialiri arus listrik. Sementara rotor merupakan bagian yang bergerak merespon perubahan medan magnet dari stator.

Prinsip kerja motor *stepper* didasarkan pada aktivasi kumparan secara berurutan (*sequence activation*). Ketika salah satu coil pada stator dialiri arus, akan terbentuk medan magnet yang menarik rotor menuju posisi keseimbangan tertentu. Selanjutnya, arus dialihkan ke coil berikutnya sesuai urutan aktivasi yang telah ditentukan oleh pengendali. Perpindahan medan magnet ini menyebabkan rotor bergerak mengikuti posisi medan magnet baru sehingga menghasilkan perpindahan sudut diskrit yang disebut *step*. Semakin tinggi frekuensi pulsa yang diberikan, maka semakin cepat rotor bergerak dari satu *step* ke *step* berikutnya (PURBAYA, n.d., 2017).



Gambar 2. 1 Prinsip kerja motor *stepper*
(diadaptasi dari (Patonra et al., n.d., 2020).¹

Berdasarkan prinsip kerja motor *stepper* pada Gambar 2.1, pergerakan rotor terjadi secara diskrit mengikuti urutan aktivasi kumparan. Besar perpindahan sudut pada setiap langkah dinyatakan sebagai *step angle* yang dapat dihitung menggunakan persamaan:

Rumus:

$$\theta = \frac{360^\circ}{N}$$

Keterangan:

- θ = *step angle*
- N = jumlah *step* per revolusi

Sehingga setiap *step* pada motor *stepper* berperan sebagai aktuator utama yang menggerakkan *unit mount* PCB secara linear ke setiap titik inspeksi. Arduino mengendalikan motor melalui sinyal pulsa dan arah sehingga setiap pergerakan dapat diatur secara terukur. Setiap pulsa merepresentasikan satu langkah sehingga posisi dapat dikontrol dengan presisi dan konsisten.

2.2.2 *Lead screw*

Lead screw merupakan salah satu komponen mekanis yang digunakan untuk mengubah gerak rotasi menjadi gerak translasi ;melalui mekanisme ulir. Pada sistem *positioning* linear, *lead screw* dihubungkan dengan motor *stepper* sehingga putaran poros motor dapat diterjemahkan menjadi perpindahan linear yang terkontrol. Mekanisme ini umum digunakan pada sistem otomasi, CNC,

¹ A. H. Patonra, S. Masita, N. R. Wibowo, dan A. Fitriati, "Rancang Bangun Media Pembelajaran Praktik Motor *Stepper*," *MAPLE*, vol. 2, no. 1, hlm. 7-11, Juni 2020.

printer 3D, dan aktuator linear karena memiliki akurasi *positioning* yang baik serta struktur mekanis yang sederhana.

Prinsip kerja *lead screw* didasarkan pada interaksi antara poros ulir dan nut. Ketika poros *lead screw* berputar akibat putaran motor *stepper*, nut yang terhubung pada carriage akan bergerak sepanjang ulir sehingga menghasilkan perpindahan linear. Besar perpindahan linear yang dihasilkan bergantung pada parameter *lead screw*, khususnya nilai *lead*.

Pada sistem ini, motor *stepper* menghasilkan gerak rotasi diskrit berdasarkan jumlah *step* yang diberikan. Gerak rotasi tersebut diteruskan ke *lead screw* untuk menghasilkan perpindahan linear. Oleh karena itu, kombinasi *step angle* motor, *microstepping*, dan *lead screw* menentukan resolusi linear sistem. Sehingga jumlah *step* dalam satu putaran dengan jenis *lead* yang digunakan yaitu T8 dengan jumlah *lead*-nya adalah 8 mm dapat dihitung:

Rumus:

$$Step/mm = \frac{N \times microstep}{lead}$$

Keterangan:

- $N = step/rev$
- *microstep* = pembagian *driver*
- *lead* = mm/rev



Gambar 2. 2 Motor *Stepper* + Linear Rail/*Lead screw*²

² “X Slide With Lead Screw, For Industrial”, diakses 28 February 2026 <https://www.indiamart.com/proddetail/x-slide-with-lead-screw-20136080262.html>

2.2.3 Driver Motor TB6600

Driver motor merupakan perangkat elektronika yang berfungsi sebagai penghubung antara mikrokontroler dan motor *stepper*. *Driver* berfungsi sebagai pengatur arus, arah putaran, serta urutan aktivitas kumparan pada motor *stepper* berdasarkan sinyal kontrol yang diberikan oleh mikrokontroler.

TB6600 merupakan *driver* motor *stepper* berbasis IC Toshiba yang dirancang untuk mengendalikan motor *stepper*. *Driver* ini mendukung pengaturan arah putaran, pengendalian langkah motor, serta fitur *microstepping* untuk meningkatkan resolusi pergerakan motor.

Prinsip kerja TB6600 didasarkan pada penerimaan sinyal digital dari mikrokontroler berupa sinyal *STEP* dan *DIR*. Sinyal *STEP* digunakan untuk menentukan jumlah langkah motor, sedangkan sinyal *DIR* menentukan arah perputaran motor. Setiap pulsa yang diberikan pada pin *STEP* akan diterjemahkan *driver* menjadi aktivasi kumparan motor sesuai urutan tertentu sehingga rotor bergerak satu langkah atau lebih kecil sesuai konfigurasi *microstepping*.

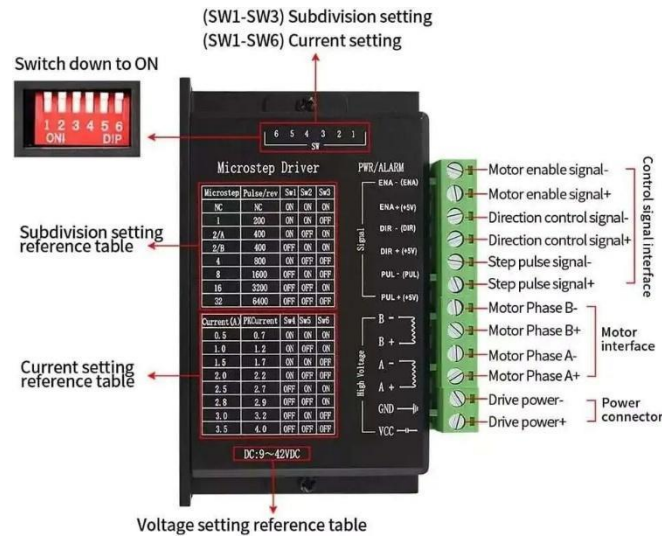
Driver mendukung fitur *microstepping* seperti *full-step*, *half-step*, 1/8, dan 1/16 *step*, tergantung konfigurasi DIP switch sehingga gerakan linear menjadi lebih halus dan presisi. Sehingga dapat dirumuskan secara sistematis dengan:

Rumus:

$$Total\ Step = N \times Microstep$$

Keterangan:

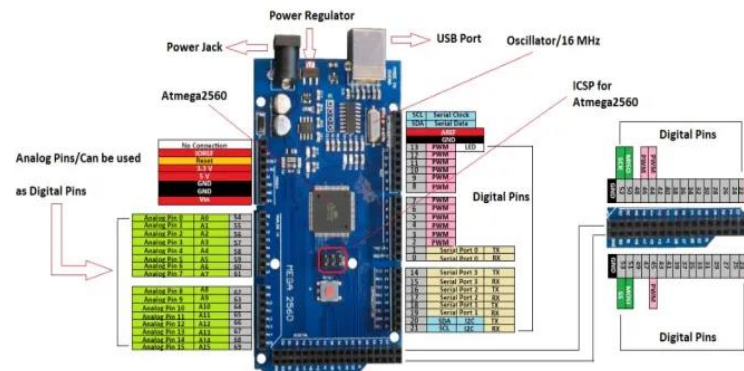
- $N = step/rev$
- *Microstep* = pembagian *driver*



Gambar 2. 3 Driver Motor TB6600³

2.2.4 Arduino Uno

Arduino Uno merupakan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang berperan sebagai pusat kendali dari sistem inspeksi visual otomatis. Mikrokontroler ini menghasilkan sinyal *step* dan *DIRECTION* untuk mengendalikan motor *stepper*. Selain itu, mikrokontroler mengatur jumlah langkah, arah gerak linear, serta kecepatan motor agar proses pemindaian PCB berjalan stabil dan konsisten.



Gambar 2. 4 Arduino Uno ATmega2560⁴

³ "TB6600 Stepper Motor Driver Controller 4A 9~42V TTL 16 Micro-Step CNC 1 Axis" diakses 06 Juni 2026 <https://www.amazon.in/Invento-8944638611325-TB6600-Controller-Stepper/dp/B06XR5VHRP>

⁴ "Panduan Lengkap Pin Arduino Mega 2560: Fungsi dan Penjelasan Berdasarkan Diagram Pinout" diakses 26 February 2026 <https://bisaioti.com/pin-arduino-mega-2560/>

2.2.5 Limit switch

Limit switch adalah saklar mekanik yang bekerja saat tuasnya ditekan. Komponen ini digunakan untuk mendeteksi batas atau posisi suatu mekanisme. Ketika tuas tertekan kontak listrik di dalamnya berubah kondisi sehingga menghasilkan sinyal listrik sebagai indikator posisi. *Limit switch* umum digunakan pada sistem otomasi karena konstruksinya sederhana dan responsnya cepat.



Gambar 2. 5 *Limit switch*⁵

2.2.6 Power Supply 24V DC

Power Supply berperan sebagai sumber daya utama yang stabil untuk seluruh sistem inspeksi visual otomatis pada PCB. Arduino memerlukan tegangan 5V–12V untuk beroperasi, sementara motor *stepper* dan *driver* TB6600 membutuhkan tegangan lebih tinggi, yaitu 10V–35V DC, sesuai spesifikasi. Power Supply memastikan motor *stepper* memperoleh torsi yang konstan, menjaga Arduino dan *driver* tetap berfungsi tanpa mengalami reset atau gangguan, serta mencegah penurunan performa akibat fluktuasi tegangan. Pemilihan tegangan power Supply disesuaikan dengan kebutuhan arus dan karakteristik motor *stepper*, sehingga sistem dapat berjalan stabil dan akurat selama proses pemindaian PCB.

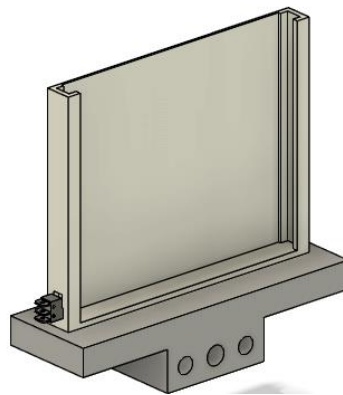
⁵ “Micro Limit Switch Saklar Kecil 3Pin Gagang 5A 250V Bisa No Nc Pcmelbik54” diakses 26 February 2026
<https://shopee.co.id/Micro-Limit-Switch-Saklar-Kecil-3Pin-Gagang-5A-250V-Bisa-No-Nc-Pcmelbik54-i.235468923.3661391767>



Gambar 2. 6 Power Supply 12V / 24V DC⁶

2.2.7 Unit mount PCB

Pada proyek sistem inspeksi visual otomatis PCB ini *unit mount* berperan sebagai tempat peletakan PCB yang akan diinspeksi. PCB ditempatkan pada *unit mount* sebelum proses dimulai sehingga posisinya tetap dan tidak bergeser saat mekanisme linear bergerak. *Unit mount* memastikan bidang PCB sejajar terhadap kamera sehingga pengambilan citra dapat dilakukan secara konsisten pada setiap titik inspeksi. Selain itu *unit mount* menjadi titik interaksi dengan *limit switch* yang akan aktif ketika PCB diletakkan sehingga sistem dapat mulai bekerja. Dengan desain yang stabil, *unit mount* mendukung akurasi pemindaian serta meningkatkan keandalan proses inspeksi visual secara keseluruhan.



Gambar 2. 7 Unit mount PCB

2.2.8 Ringlight

Ringlight adalah sumber cahaya berbentuk lingkaran yang dipasang mengelilingi kamera. Desain melingkar membuat cahaya tersebar merata ke objek sehingga bayangan dan pantulan tidak merata dapat dikurangi. Komponen ini

⁶ “MEAN WELL Switching Power Supply, RS-150-12 12V dc, 12.5A, 150 W, Input 88V ac to”
 diakses 26 February 2026
[MEAN WELL Switching Power Supply, RS-150-12 12V dc, 12.5A, 150 W, Input 88V ac to | RS](#)

banyak digunakan pada sistem pengolahan citra karena mampu meningkatkan detail dan konsistensi hasil gambar.

Pada proyek inspeksi visual PCB ini *ringlight* berfungsi sebagai sumber penerangan utama saat proses inspeksi berlangsung. Cahaya yang stabil dan merata membantu kamera menangkap detail komponen dan jalur PCB dengan jelas sehingga proses *image processing* dapat bekerja lebih akurat dan konsisten pada setiap titik inspeksi.



Gambar 2. 8 Ringlight⁷

⁷ “Usb Mini 4 Inch LED Ring Light” diakses 26 February 2026 [Usb Mini 4 Inch LED Ring Light Clip-on Laptop Video Conference Lighting 3 Lighting Modes 3200K-6500K Dimmable USB Powered For Live Streaming Online Education Meeting - Walmart.com](https://www.walmart.com/ip/Usb-Mini-4-Inch-LED-Ring-Light-Clip-on-Laptop-Video-Conference-Lighting-3-Lighting-Modes-3200K-6500K-Dimmable-USB-Powered-For-Live-Streaming-Online-Education-Meeting-/1234567890)