

# Alat Electrospinning Untuk Pembuatan Perban Pada Luka Terbuka

## *Electrospinning Device For The Fabrication Of Wound Dressing For Open Wounds*

1<sup>st</sup> Dimas Faudzan  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

imasfaudzan@student.telkomuniversity.ac.id

2<sup>nd</sup> Indra Wahyudin Fathona  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

indrafathonah@telkomuniversity.ac.id

3<sup>rd</sup> Casmika Saputra  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Telkom  
Bandung, Indonesia

casmika@telkomuniversity.ac.id

**Abstrak** — Perkembangan teknologi penanganan luka (wound dressing) menuntut material yang fleksibel, berpori, mampu menjaga kelembapan, serta mendukung proses penyembuhan secara optimal. Serat nanofiber hasil metode electrospinning memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan struktur berpori, sehingga sangat potensial untuk aplikasi wound dressing. Namun, sistem electrospinning konvensional umumnya berukuran besar, mahal, dan kurang praktis untuk penggunaan portabel. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji kinerja perangkat electrospinning portabel berbasis syringe pump dan modul tegangan tinggi. Perangkat dikembangkan menggunakan sumber daya berbasis baterai, pengendalian tegangan tinggi berbasis MOSFET, serta pengaturan flowrate menggunakan motor stepper. Sistem tegangan tinggi memiliki rentang input 0–15 V dengan keluaran 0–28.57 kV dan menunjukkan hubungan linear antara tegangan input dan keluaran. Material uji berupa larutan polyvinyl alcohol (PVA) 15% (b/b) yang disiapkan dari 15 gram PVA dalam 100 mL akuades. Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan dan flowrate untuk mengevaluasi morfologi dan diameter serat. Hasil menunjukkan bahwa pembentukan serat paling optimal diperoleh pada rentang tegangan menengah 9–15 kV dan flowrate 7.25–9.75  $\mu\text{L}/\text{menit}$ , yang menghasilkan serat nanofiber dengan diameter rata-rata sekitar 0.50–0.60  $\mu\text{m}$ , standar deviasi 0.08–0.15  $\mu\text{m}$ , serta rata-rata geometrik 0.48–0.55  $\mu\text{m}$ , yang mengindikasikan pembentukan fine fiber yang seragam. Pada tegangan tinggi  $\geq 18.82$  kV, diameter serat meningkat hingga 1.30–1.50  $\mu\text{m}$  akibat ketidakstabilan jet. Flowrate rendah memicu pembentukan bead, sedangkan flowrate tinggi menghasilkan serat lebih tebal dan kurang seragam. Distribusi diameter serat mengikuti model log-normal. Dengan demikian, perangkat electrospinning portabel yang dikembangkan berpotensi sebagai alternatif sistem produksi wound dressing berbasis nanofiber yang ringkas, fleksibel, dan mudah dioperasikan.

**Kata kunci**— : Electrospinning portabel, Nanofiber, PVA, Wound dressing

### I. PENDAHULUAN

Electrospinning merupakan metode yang efektif dalam menghasilkan serat nanofiber dengan diameter skala nanometer serta karakteristik morfologi unggul, seperti luas permukaan spesifik yang tinggi, porositas besar, dan kemampuan meniru struktur matriks ekstraseluler (extracellular matrix/ECM). Karakteristik tersebut

menjadikan serat nanofiber sangat potensial untuk aplikasi biomedis, khususnya sebagai wound dressing, sistem penghantaran obat, dan rekayasa jaringan, karena mampu mendukung adhesi, proliferasi, dan regenerasi sel sehingga mempercepat proses penyembuhan luka [1,2]. Namun demikian, sistem electrospinning konvensional masih memiliki keterbatasan dari sisi ukuran, biaya, dan kompleksitas operasional. Perangkat komersial umumnya berukuran besar, bergantung pada pasokan listrik AC, serta memiliki harga yang relatif tinggi, sehingga kurang praktis untuk penggunaan di luar lingkungan laboratorium dan sulit diakses oleh fasilitas kesehatan dengan sumber daya terbatas [1,3,4]. Selain itu, kualitas serat yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh parameter proses seperti tegangan listrik, jarak nosel–kolektor, laju aliran, dan konsentrasi larutan, yang harus dikontrol secara tepat untuk menghindari ketidakstabilan jet dan cacat morfologi serat [2,3]. Pemilihan material polimer juga berperan penting dalam menentukan performa serat nanofiber. Kombinasi polyvinyl alcohol (PVA) dan polyvinylpyrrolidone (PVP) banyak digunakan dalam aplikasi wound dressing karena bersifat biokompatibel, hidrofilik, dan mampu menghasilkan serat yang fleksibel serta menyerupai struktur jaringan kulit. Penambahan gliserin sebagai plastisizer dilaporkan dapat meningkatkan elastisitas serat dan mempertahankan kelembapan, yang penting dalam mendukung proses penyembuhan luka [5,6]. Sebagai alternatif terhadap sistem konvensional, pengembangan perangkat electrospinning portabel menjadi fokus penelitian terkini. Perangkat ini dirancang dengan ukuran lebih kecil, mudah dibawa, serta dapat dioperasikan menggunakan sumber daya portabel. Beberapa studi menunjukkan bahwa perangkat electrospinning portabel mampu menghasilkan serat nanofiber dengan kualitas yang sebanding dengan sistem konvensional, sekaligus menawarkan efisiensi energi, biaya yang lebih rendah, dan kemudahan penggunaan di lapangan [5,7]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengembangan prototipe perangkat electrospinning portabel serta analisis pengaruh variasi parameter proses, khususnya tegangan listrik, jarak nosel–kolektor, laju aliran, dan konsentrasi larutan, terhadap morfologi serat nanofiber yang dihasilkan. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan

teknologi electrospinning yang lebih praktis dan aplikatif untuk kebutuhan wound dressing berbasis nanofiber.

## II. KAJIAN TEORI

### A. Wound Care

Perawatan luka merupakan bagian penting dalam bidang medis yang bertujuan untuk mempercepat proses regenerasi jaringan, mencegah infeksi, serta meningkatkan kenyamanan pasien. Luka yang disebabkan oleh trauma, prosedur bedah, maupun luka bakar memerlukan penanganan yang tepat agar proses penyembuhan berlangsung optimal. Salah satu pendekatan modern dalam wound care adalah penggunaan pembalut luka berbasis nanofiber yang dihasilkan melalui metode electrospinning. Nanofiber memiliki struktur yang menyerupai matriks ekstraseluler (extracellular matrix/ECM), yaitu kerangka alami tempat sel beradhesi, bermigrasi, dan berproliferasi. Struktur ini memberikan dukungan mekanik dan biologis yang diperlukan untuk pembentukan jaringan baru. Selain itu, nanofiber memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas besar, sehingga memungkinkan pertukaran gas, penyerapan eksudat luka, serta difusi zat aktif secara efisien [8]. Metode electrospinning memungkinkan produksi nanofiber dengan ukuran dan morfologi yang terkontrol melalui pengaturan parameter proses, seperti tegangan listrik, jarak nosel-kolektor, dan laju aliran larutan. Keunggulan lainnya adalah kemampuan nanofiber untuk dikombinasikan dengan berbagai agen bioaktif, seperti antibiotik dan antiinflamasi, yang dapat dilepaskan secara bertahap (controlled release) di area luka. Hal ini meningkatkan efektivitas terapi, mengurangi frekuensi penggantian perban, serta menurunkan risiko infeksi [9,10]. Oleh karena itu, nanofiber hasil electrospinning dinilai sangat potensial sebagai material wound dressing generasi lanjut.

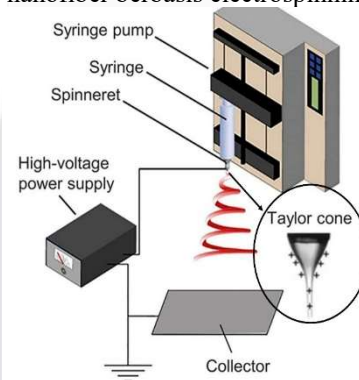
### B. Prinsip Electrospinning

Electrospinning merupakan teknik pembentukan serat yang memanfaatkan gaya elektrostatis untuk menarik larutan polimer menjadi serat dengan diameter nano hingga mikro. Prinsip dasar electrospinning melibatkan penerapan tegangan listrik tinggi antara nosel yang terhubung dengan larutan polimer dan kolektor konduktif. Ketika gaya elektrostatis melebihi tegangan permukaan larutan, terbentuk struktur kerucut yang dikenal sebagai Taylor cone, diikuti oleh keluarnya jet larutan yang meregang dan mengeras akibat penguapan pelarut di udara [11,1]. Proses electrospinning sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara gaya elektrostatis, viskositas larutan, dan tegangan permukaan. Serat yang terbentuk akan terakumulasi pada kolektor dalam bentuk jalinan acak atau terorientasi, tergantung pada konfigurasi alat. Keunggulan utama electrospinning adalah kemampuannya menghasilkan serat berdiameter sangat kecil, berstruktur berpori, serta memiliki luas permukaan tinggi. Morfologi serat dapat dikontrol melalui pengaturan parameter proses seperti tegangan listrik, jarak nosel-kolektor, laju aliran, konsentrasi dan viskositas larutan, serta kondisi lingkungan [12]. Secara umum, proses electrospinning terdiri dari tiga tahap utama, yaitu pembentukan tetesan, pembentukan jet, dan pembentukan serat. Ketiga tahap tersebut dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara sifat larutan dan medan listrik yang diterapkan. Oleh karena itu, pemahaman prinsip

electrospinning menjadi dasar penting dalam optimasi kondisi proses untuk menghasilkan serat dengan karakteristik yang diinginkan [13].

### C. Apparatus dan Material *Electrospinning*

Perangkat electrospinning pada umumnya terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi. Komponen tersebut meliputi sumber tegangan tinggi (high voltage power supply) yang berfungsi menghasilkan medan listrik elektrostatis, syringe pump untuk mengontrol laju aliran larutan secara stabil, nosel (spinneret) sebagai media keluarnya larutan, serta kolektor konduktif untuk menangkap dan mengendapkan serat. Tegangan tinggi yang diterapkan, umumnya hingga 30 kV DC, berperan penting dalam pembentukan Taylor cone dan kestabilan jet serat [12]. Selain perangkat, material polimer yang digunakan juga sangat menentukan keberhasilan proses electrospinning. Pemilihan material didasarkan pada sifat kohesi dan adhesi larutan. Kohesi yang memadai diperlukan untuk menjaga kontinuitas jet, sedangkan adhesi yang baik memungkinkan serat menempel secara efektif pada permukaan kolektor atau substrat aplikasi. Polyvinyl alcohol (PVA) merupakan salah satu polimer sintetik yang banyak digunakan dalam electrospinning karena memiliki ikatan hidrogen yang kuat antar rantai polimer, sehingga mendukung pembentukan serat yang kontinu dan stabil. PVA dengan berat molekul menengah hingga tinggi (sekitar 85.000–124.000 g/mol) dilaporkan paling sesuai untuk proses electrospinning karena menghasilkan viskositas larutan yang optimal. Selain mudah larut dalam air, PVA bersifat hidrofilik dan biokompatibel, sehingga sangat relevan untuk aplikasi medis, khususnya wound dressing. Karakteristik tersebut menjadikan PVA sebagai material yang banyak direkomendasikan dalam literatur untuk produksi nanofiber berbasis electrospinning [14].

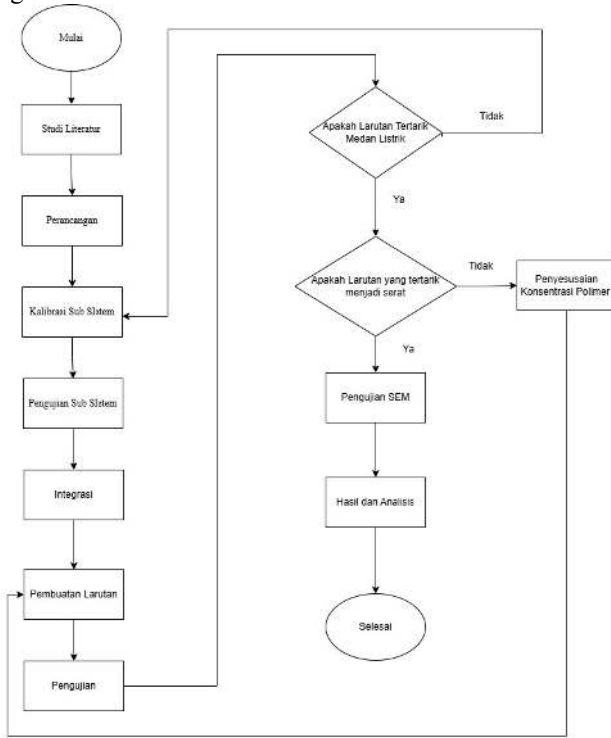


GAMBAR 1  
Apparatus Electrospinning

## III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur, kemudian dilakukan karakterisasi modul serta polimer untuk mengetahui kinerja dan karakteristik modul tegangan tinggi, lalu dilakukan perancangan alat dan kalibrasi, sebelum dilakukan proses electrospinning maka kita harus bisa

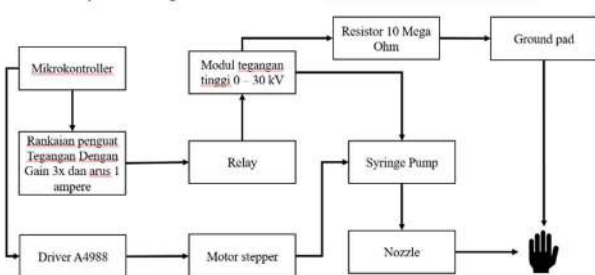
mengatur dan menyesuaikan tegangan tinggi serta akurasi dari modul tegangan tinggi agar proses electrospinning bisa mengeluarkan serat yang seragam, dan tidak ada beads, setelah serat terbentuk maka dilakukan uji *microscope*. Tahap penelitian yang akan dilakukan bisa dilihat pada gambar sebagai berikut :



GAMBAR 2 Diagram Alir Penelitian

A. Diagram Blok Sistem

Spesifikasi alat dan komponen yang akan digunakan dibagi menjadi 4 sub sistem yang akan ditampilkan disetiap sub bab nya sebagai berikut :

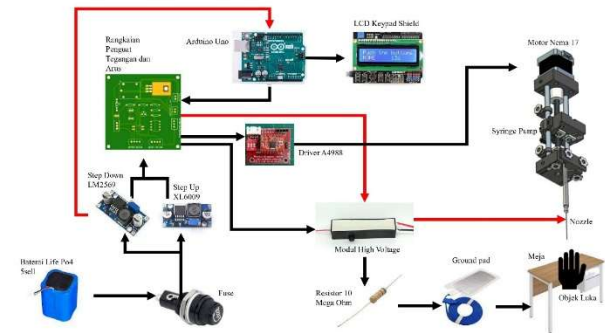


GAMBAR 3 Diagram Blok

B. Desain Sistem

Desain sistem *electrospinning* untuk memproduksi serat nanofiber sebagai penutup luka, sistem ini menyatukakan kontrol elektronik yang menggunakan arduino uno, modul *high voltage*, pompa *syringe*, dan layar tampilan untuk memasukan set point parameter kinerja alat seperti tegangan, *flowrate*, waktu, dan volume. Secara umum, sistem ini berfungsi dengan cara mengatur kecepatan aliran (*flowrate*) dari polimer melalui *syringe*, selanjutnya diberi tegangan tinggi (*high voltage*) antara ujung jarum dengan kolektor

yang menghasilkan serat nano fiber. Seluruh prosedur dikendalikan secara terpusat oleh mikrokontroler.



GAMBAR 4 Desain Sistem

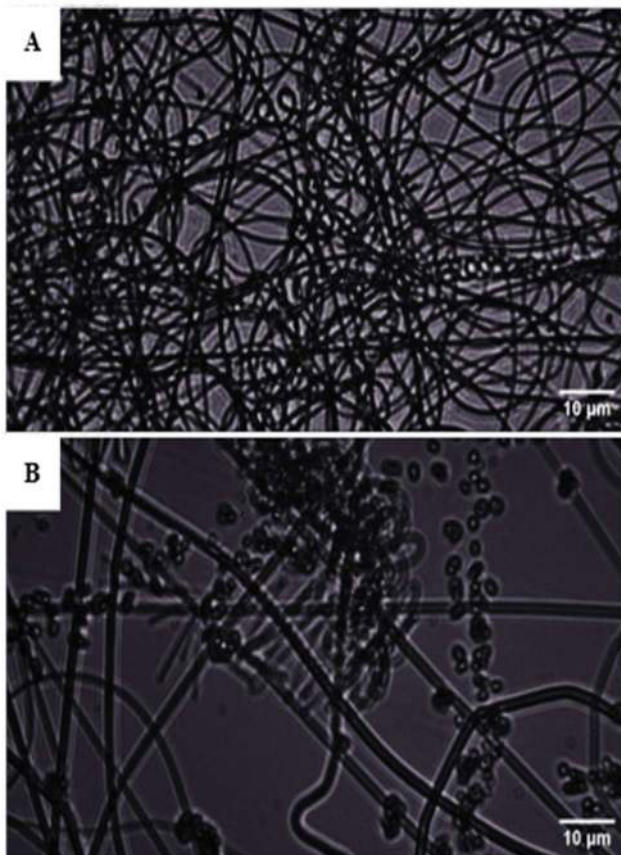
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, akan disajikan semua hasil eksperimen yang telah dilaksanakan pada perangkat electrospinning portabel yang telah dikembangkan. Pengujian ini dimaksudkan untuk memberikan pemahaman lengkap tentang kinerja alat, yang mencakup sistem kontrol, sistem pembangkit tegangan tinggi, serta ciri-ciri serat yang dihasilkan. Melalui serangkaian uji coba tersebut, diharapkan akan dipahami cara-cara setiap komponen berfungsi secara terpadu dalam mendukung proses electrospinning. Pengujian melibatkan penilaian sistem pengaturan tegangan tinggi, pengujian mekanisme pengeluaran larutan polimer melalui pompa syringe, serta pengamatan pembentukan Taylor cone selama proses berlangsung. Selain itu, dilakukan pengumpulan data untuk menganalisis korelasi antara tegangan masukan dan tegangan keluaran, variasi laju aliran, serta dampak kedua parameter tersebut terhadap kestabilan jet dan bentuk serat yang dihasilkan. Hasil eksperimen yang diperoleh dalam bagian ini digunakan sebagai landasan untuk mengevaluasi kemampuan alat dalam beroperasi secara konsisten, menjaga stabilitas proses electrospinning, serta menghasilkan serat dengan karakteristik yang tepat. Penilaian ini sangat penting karena kualitas serat yang dihasilkan akan memengaruhi kecocokan perangkat electrospinning portabel untuk penggunaan lebih lanjut, terutama sebagai media untuk menghasilkan serat nano yang dapat dimanfaatkan sebagai penutup luka.

A. Pengaruh Tegangan Keluaran terhadap Morfologi Serat (*Flowrate* Tetap 8.250µl/min)

Berdasarkan analisis sebelumnya, variasi tegangan diklasifikasikan menjadi tiga kondisi utama, yaitu tegangan rendah ( $\leq 7.31$  kV) sebagai fase awal pembentukan serat, tegangan menengah (8.46–15.36 kV) sebagai kondisi optimal, dan tegangan tinggi ( $\geq 18.82$  kV) sebagai kondisi tidak stabil. Oleh karena itu, tegangan 15.36 kV ditampilkan sebagai representasi kondisi optimal, sedangkan 24.57 kV mewakili kondisi tidak

stabil. Pada 15.36 kV, serat terbentuk secara kontinu dengan distribusi relatif merata, diameter lebih seragam, dan jumlah bead minimal, yang menunjukkan kestabilan jet akibat keseimbangan gaya elektrostatik dan sifat reologi larutan. Sebaliknya, pada 24.57 kV, morfologi serat menunjukkan variasi diameter yang lebih besar dan peningkatan pembentukan bead akibat ketidakstabilan jet yang dipicu oleh medan listrik berlebih. Hasil ini menegaskan bahwa tegangan menengah, khususnya 15.36 kV, merupakan kondisi kerja yang paling sesuai untuk menghasilkan fine fiber dengan morfologi yang homogen dan terkendali.



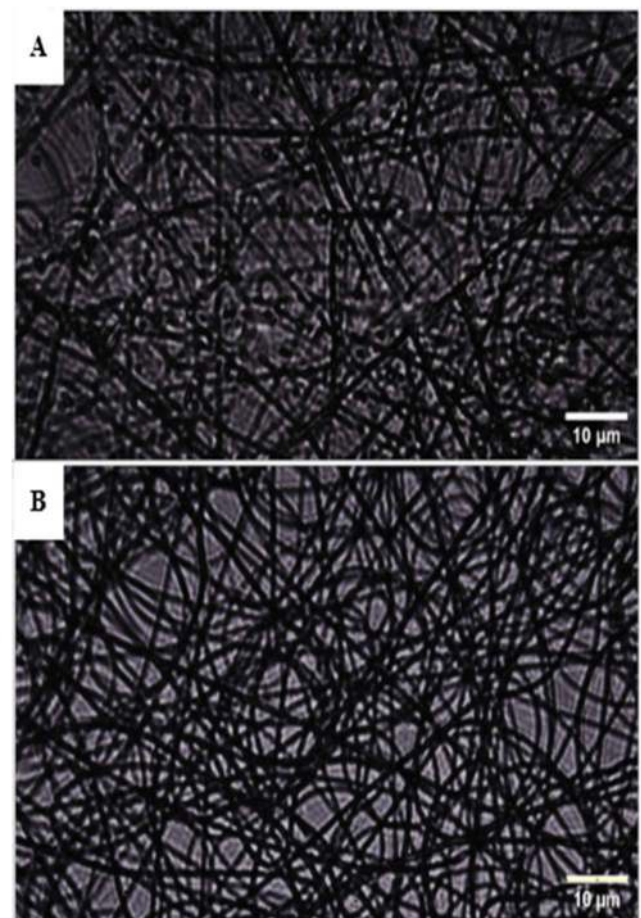
GAMBAR 5

. Tegangan (A). 15.36 kV, (B). 24,57 kV

#### B. Pengaruh *flowrate* terhadap Morfologi Serat (Tegangan Tetap 15.36 kV)

Meskipun pengujian pengaruh laju aliran dilakukan pada beberapa nilai *flowrate*, tidak seluruh hasil morfologi serat ditampilkan secara visual. Hal ini dilakukan untuk menjaga fokus analisis dan menghindari pengulangan informasi visual yang memiliki karakteristik morfologi serupa. Oleh karena itu, hanya dua nilai *flowrate*, yaitu 2.250 µL/min dan 11.250 µL/min, ditampilkan sebagai representasi kondisi ekstrem laju aliran. *Flowrate* 2.250 µL/min dipilih sebagai representasi kondisi pasokan larutan terendah. Pada laju aliran ini, hasil pengamatan menunjukkan bahwa serat yang terbentuk masih didominasi oleh bead dan ketidakstabilan jet, meskipun tegangan telah berada pada kondisi optimal. Karakter morfologi yang serupa juga diamati pada *flowrate* 3.250 µL/min, baik dari citra serat maupun dari distribusi diameter, sehingga penampilan satu nilai *flowrate* terendah

dianggap cukup untuk merepresentasikan perilaku morfologi pada kondisi pasokan rendah. Sebaliknya, *flowrate* 11.250 µL/min dipilih sebagai representasi kondisi pasokan larutan tinggi. Pada laju aliran ini, serat terbentuk secara kontinu dengan jumlah bead yang minimal, namun diameter serat cenderung membesar akibat peningkatan volume larutan yang ditarik oleh medan listrik. Tren morfologi dan pembesaran diameter yang sejenis juga ditemukan pada *flowrate* 7.250, 8.250, 9.750, dan 11.750 µL/min. Oleh karena itu, penampilan *flowrate* 11.250 µL/min dinilai telah mewakili karakteristik morfologi serat pada kondisi laju aliran tinggi. Sementara itu, pada *flowrate* 4.250, 5.250, dan 6.250 µL/min, morfologi serat menunjukkan perubahan bertahap dari dominasi bead menuju pembentukan fine fiber, dengan kestabilan jet yang sangat sensitif terhadap perubahan kecil laju aliran. Karena karakter morfologi pada rentang ini bersifat transisional dan tidak menunjukkan perbedaan visual yang kontras, analisis pada *flowrate* tersebut disajikan secara kuantitatif melalui distribusi diameter serat dan parameter statistik pada subbagian sebelumnya, tanpa menampilkan seluruh citra morfologi secara visual. Dengan demikian, pemilihan *flowrate* 2.250 µL/min dan 11.250 µL/min sebagai citra representatif bertujuan untuk memperjelas batas morfologi serat akibat variasi laju aliran, sementara pemahaman menyeluruh terhadap pengaruh *flowrate* tetap diperoleh melalui kombinasi analisis visual dan kuantitatif pada seluruh nilai *flowrate* yang diuji.



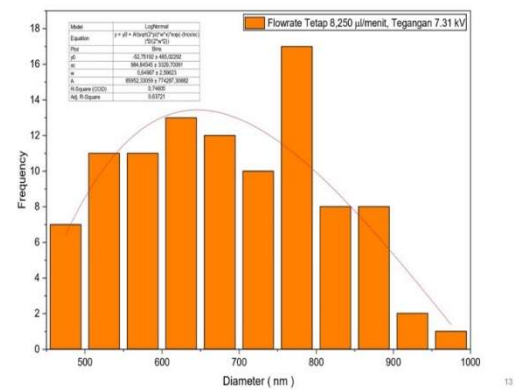
GAMBAR 6

. *Flowrate* (A). 2.250 µL/menit, (B). 11.250 µL/menit.

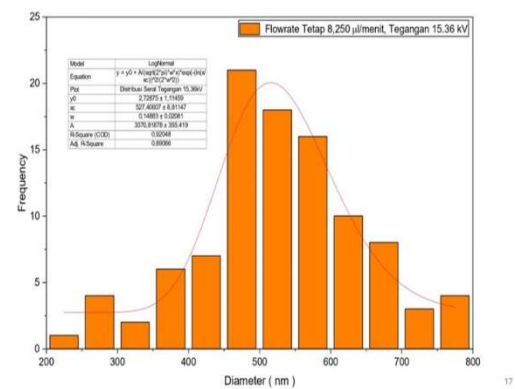
C. Analisis Distribusi Normal di Tegangan Variasi dan Flowrate Tetap 8.25  $\mu\text{L}/\text{min}$  terhadap Karakteristik Serat

Pengaruh variasi tegangan keluaran high voltage terhadap karakteristik serat electrospinning dianalisis dengan menjaga laju alir larutan tetap sebesar 8.250  $\mu\text{L}/\text{min}$ , sementara tegangan divariasikan dari 5.01 kV hingga 24.57 kV. Pendekatan ini bertujuan untuk mengisolasi peran medan listrik terhadap pembentukan jet, kestabilan proses electrospinning, serta distribusi diameter serat yang dihasilkan. Evaluasi dilakukan berdasarkan pengamatan morfologi, citra mikroskop, dan analisis distribusi diameter serat menggunakan model log-normal. Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan tegangan menyebabkan perubahan signifikan pada diameter dan keseragaman serat, yang dapat dipahami sebagai transisi dari kondisi awal pembentukan serat, menuju kondisi optimal, hingga kondisi ketidakstabilan pada tegangan tinggi. Pada tegangan rendah (5.01–7.31 kV), serat telah mulai terbentuk, namun masih memiliki diameter relatif besar dan distribusi yang kurang homogen. Nilai diameter pusat berada pada kisaran 903.65–845.58 nm, disertai penurunan nilai koefisien determinasi dan pelebaran distribusi pada tegangan 7.31 kV. Kondisi ini menunjukkan bahwa gaya elektrostatis belum sepenuhnya mampu mengatasi pengaruh viskositas dan tegangan permukaan larutan, sehingga jet yang terbentuk belum stabil secara morfologis. Peningkatan tegangan ke rentang menengah (8.46–15.36 kV) menghasilkan perbaikan signifikan pada karakteristik serat.

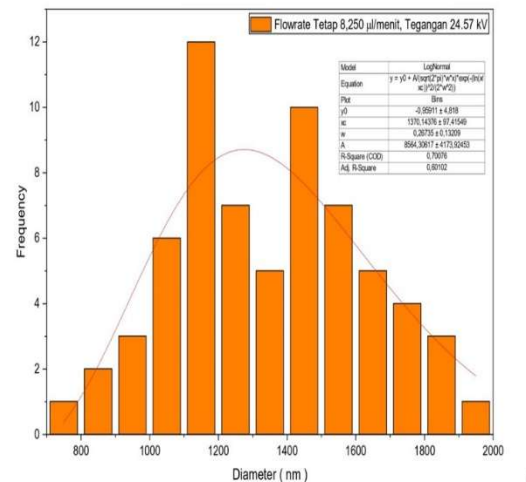
A



B



C



GAMBAR 7

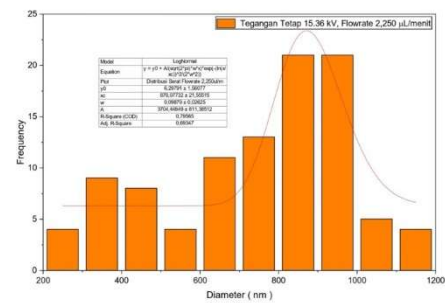
Distribusi Normal untuk Flowrate (15.36 kV) Tetap, Tegangan Variasi (A) 7.31 kV, (B) 15.36 kV, (C) 24.57 kV, (A) Kondisi Awal, (B) Kondisi Optimal, (C) Kondisi Perbesaran Serat

Diameter pusat serat menurun secara konsisten hingga mencapai sekitar 527.41 nm pada tegangan 15.36 kV, dengan lebar distribusi yang relatif sempit dan nilai kecocokan model log-normal yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang tegangan ini, medan listrik cukup kuat untuk menghasilkan jet yang stabil dan proses pemanjangan larutan berlangsung secara efektif tanpa memicu ketidakstabilan berlebih. Kondisi ini merepresentasikan performa sistem electrospinning yang paling optimal dalam menghasilkan serat halus dengan morfologi homogen. Namun, pada tegangan tinggi (18.82–24.57 kV), kualitas serat mulai menurun meskipun proses electrospinning masih berlangsung. Diameter pusat serat kembali meningkat dan distribusi diameter menjadi lebih lebar, terutama pada tegangan 24.57 kV, di mana diameter pusat mencapai sekitar 1.370 nm dengan nilai  $R^2$  yang menurun signifikan. Fenomena ini mengindikasikan dominasi ketidakstabilan jet, seperti whipping instability, akibat medan listrik yang terlalu kuat. Kondisi tersebut mengganggu proses penipisan jet secara merata dan menghasilkan serat yang lebih tebal serta kurang homogen. Berdasarkan keseluruhan hasil analisis distribusi diameter dan pengamatan morfologi, hanya tiga tegangan, yaitu tegangan rendah, tegangan menengah, dan tegangan tinggi, ditampilkan sebagai representasi visual. Pemilihan ini dilakukan karena ketiga kondisi tersebut telah mewakili karakteristik utama perubahan morfologi serat akibat variasi tegangan, sementara nilai tegangan lain menunjukkan tren yang serupa dan telah dianalisis secara kuantitatif. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada flowrate tetap 8.250  $\mu\text{L}/\text{min}$ , tegangan menengah—khususnya 15.36 kV—merupakan kondisi paling ideal untuk menghasilkan serat halus dengan distribusi diameter yang homogen dan stabil.

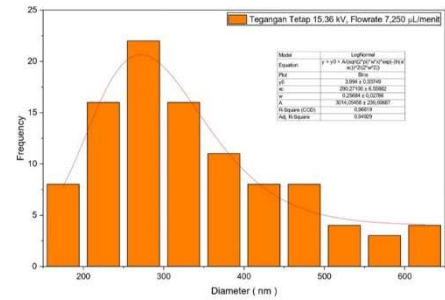
#### D. Analisis Distribusi Normal di Flowrate Variasi dan Tegangan Tetap 15.36 kV terhadap Karakteristik Serat

Pada pengujian ini, tegangan keluaran sistem electrospinning dijaga konstan pada 15.36 kV, sementara laju aliran larutan (flowrate) divariasikan untuk mengevaluasi pengaruh pasokan larutan terhadap kestabilan jet, morfologi serat, dan distribusi diameter serat yang dihasilkan. Analisis dilakukan berdasarkan pengamatan morfologi serat, citra mikroskop, serta distribusi diameter menggunakan pendekatan statistik log-normal. Secara umum, variasi flowrate menghasilkan perubahan karakteristik serat yang dapat dipahami sebagai transisi dari kondisi dominasi bead, menuju pembentukan fine fiber yang stabil, hingga kondisi over-feeding pada laju aliran tinggi. Pada flowrate rendah (2.250–3.250  $\mu\text{L}/\text{menit}$ ), pasokan larutan relatif kecil dibandingkan gaya elektrostatis yang bekerja. Kondisi ini menyebabkan jet tidak terbentuk secara kontinu dan serat yang dihasilkan masih didominasi oleh bead dengan ketidakseragaman diameter yang tinggi

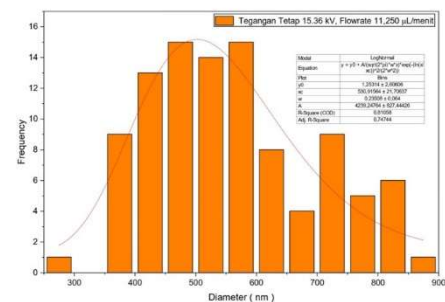
A



B



C



GAMBAR 8

. Distribusi Normal untuk Tegangan (15.36 kV) Tetap Flowrate Variasi (A) 2.250, (B) 7.250, (C) 11.250  $\mu\text{L}/\text{min}$ , (A) Kondisi Awal, (B) Kondisi Optimal, (C) Kondisi Perbesaran Serat

. Diameter rata-rata geometri berada pada kisaran 880–982 nm, yang mengindikasikan bahwa proses pemanjangan jet belum berlangsung secara stabil meskipun tegangan telah berada pada kondisi optimal. Peningkatan flowrate ke rentang menengah (4.250–6.250  $\mu\text{L}/\text{menit}$ ) menunjukkan perbaikan bertahap pada morfologi serat. Bead masih muncul, namun jumlahnya berkurang dan struktur serat memanjang mulai mendominasi. Diameter rata-rata cenderung menurun hingga mencapai nilai minimum, yang menandakan bahwa pasokan larutan mulai seimbang dengan gaya elektrostatis. Namun, pada batas atas rentang ini, distribusi diameter menjadi sangat lebar dan kestabilan jet menurun, menunjukkan bahwa sistem berada pada zona transisi yang sensitif terhadap perubahan kecil laju aliran. Pada flowrate tinggi ( $\geq 7.250$   $\mu\text{L}/\text{menit}$ ), morfologi serat didominasi oleh fine fiber yang kontinu dengan jumlah bead yang minimal. Taylor cone terbentuk secara stabil dan jet

dapat dipertahankan selama proses electrospinning. Diameter rata-rata serat mencapai nilai minimum sekitar 290 nm pada flowrate 7.250  $\mu\text{L}/\text{menit}$ , yang dapat dianggap sebagai kondisi optimal untuk pembentukan fine fiber. Namun, peningkatan flowrate lebih lanjut menyebabkan diameter serat kembali meningkat hingga mencapai sekitar 859 nm pada 11.750  $\mu\text{L}/\text{menit}$ . Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun kestabilan jet tetap terjaga, pasokan larutan yang berlebihan menyebabkan proses penipisan jet menjadi kurang efektif dan menghasilkan serat dengan diameter yang lebih besar. Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, distribusi diameter serat ditampilkan secara representatif pada flowrate 2.250  $\mu\text{L}/\text{menit}$  sebagai kondisi dominasi bead, 7.250  $\mu\text{L}/\text{menit}$  sebagai kondisi optimal pembentukan fine fiber, dan 11.250  $\mu\text{L}/\text{menit}$  sebagai representasi kondisi laju aliran tinggi dengan kecenderungan pembesaran diameter. Pemilihan ini dinilai telah mewakili perubahan utama karakteristik serat akibat variasi flowrate, sementara nilai flowrate lainnya menunjukkan tren yang serupa dan telah dianalisis secara kuantitatif.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem elektrospinning portabel untuk aplikasi perban luka berbasis nanofiber berhasil dikembangkan dan berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem ini mengintegrasikan modul tegangan tinggi, pompa jarum suntik, dan mikrokontroler Arduino sebagai pengendali utama dalam satu perangkat yang ringkas dan mudah dioperasikan, sehingga mampu mengatasi keterbatasan ukuran dan mobilitas pada sistem elektrospinning konvensional. Pompa jarum suntik yang digunakan, berbasis motor stepper NEMA 17 dengan driver A4988 dan pengaturan microstepping 1/16 serta lead screw berpitch 2 mm, mampu menghasilkan pergerakan plunger yang halus dan presisi. Hasil kalibrasi menunjukkan hubungan linier antara jumlah langkah motor dan volume larutan yang dikeluarkan, sehingga flowrate dapat dikendalikan secara akurat dan konsisten melalui parameter perangkat lunak tanpa memerlukan pengukuran manual berulang. Pengaturan flowrate dilakukan dengan mengendalikan frekuensi pulsa langkah dari Arduino, yang memungkinkan penyesuaian laju aliran secara fleksibel sesuai kebutuhan proses electrospinning. Pengendalian flowrate dan tegangan yang stabil terbukti berperan penting dalam menghasilkan serat nanofiber dengan karakteristik morfologi yang terkontrol. Secara keseluruhan, alat elektrospinning portabel yang dirancang telah memenuhi kriteria fungsional dan performa yang diharapkan, serta mampu menghasilkan serat nanofiber yang berpotensi diaplikasikan sebagai perban luka. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem elektrospinning yang lebih ringkas, terkontrol, dan portabel dapat dikembangkan sebagai alternatif yang efektif terhadap sistem elektrospinning konvensional.

## REFERENSI

- [1] N. Bhardwaj and S. C. Kundu, "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique," *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 3, pp. 325–347, May 2010, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2010.01.004.
- [2] S. Agarwal, J. H. Wendorff, and A. Greiner, "Use of electrospinning technique for biomedical applications," *Polymer (Guildf.)*, vol. 49, no. 26, pp. 5603–5621, Dec. 2008, doi: 10.1016/J.POLYMER.2008.09.014.
- [3] D. Pembimbing, D. Anggoro, M. Si, and I. Fatimah, "Optimasi Nanofiber Hasil Electrospinning Tri Ilma Sari NRP 0111144000007," 2018.
- [4] Ltd. Linyi Ame Energy co., "Laboratory Nanofiber Spinning Machine Electrospinning Yarn Equipment," Alibaba.com.
- [5] G. S. Liu *et al.*, "In Situ Electrospinning Iodine-Based Fibrous Meshes for Antibacterial Wound Dressing," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 13, 2018, doi: 10.1186/s11671-018-2733-9.
- [6] A. Nur Islamiyah, E. Cahyono Jurusan Kimia, and F. Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, "Preparation of PVA/ME/ $\beta$ -CD and PVA/ME Nanofibers by Electrospinning and Their Activity as a *Drosophila melanogaster* Attractant," 2021. [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- [7] J. Haik, R. Kornhaber, B. Blal, and M. Harats, "The Feasibility of a Handheld Electrospinning Device for the Application of Nanofibrous Wound Dressings," *Adv. Wound Care (New Rochelle)*, vol. 6, no. 5, pp. 166–174, May 2017, doi: 10.1089/wound.2016.0722.
- [8] X. Liu, H. Xu, M. Zhang, and D. G. Yu, "Electrospun medicated nanofibers for wound healing: Review," Oct. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/membranes11100770.
- [9] J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, "Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications," Apr. 24, 2019, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00593.
- [10] E. J. Torres-Martínez *et al.*, "Preparation and characterization of electrospun fibrous scaffolds of either PVA or PVP for fast release of sildenafil citrate," *E-Polymers*, vol. 20, no. 1, pp. 746–758, Jan. 2020, doi: 10.1515/epoly-2020-0070.
- [11] Z. M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna, "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 15, pp. 2223–2253, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00178-7.
- [12] A. Greiner and J. H. Wendorff, "Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers," 2007. doi: 10.1002/anie.200604646.
- [13] D. H. Reneker and A. L. Yarin, "Electrospinning jets and polymer nanofibers," May 13, 2008, *Elsevier BV*. doi: 10.1016/j.polymer.2008.02.002.
- [14] F. G. Mondalek *et al.*, "The incorporation of poly(lactic-co-glycolic) acid nanoparticles into porcine small intestinal submucosa biomaterials," *Biomaterials*, vol. 29, no. 9, pp. 1159–1166, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.11.020.