

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian Elza Chignier dan Rosy Eloy pada tahun 1985 yang berjudul “*Long-term behavior of bovine collagen membrane used as vascular substitute in rats.*” Penelitian tersebut tentang evaluasi membran kolagen yang digunakan sebagai pengganti vaskular pada tikus [10]. Penelitian Allison M. Ost diek pada tahun 2015 yang berjudul “*Feasibility of a nanomaterial-tissue patch for vascular and cardiac reconstruction.*” Penelitian tersebut tentang rekonstruksi vaskular dan jantung yang melibatkan penggunaan tambalan biologis untuk mengobati trauma dan cacat. Sebuah studi *in vivo* dilakukan untuk menentukan *remodelling* dan efek biologis *patch* vaskular berstruktur nano baru dengan dan tanpa nanopartikel emas [11].

Penelitian Jun Zhang pada tahun 2017 yang berjudul “*A PC-PU nanoparticle/PU/decellularized scaffold composite vascular patch: Synergistically optimized overall performance promotes endothelialization.*” Penelitian tersebut tentang *patch* vaskular fosfatidilkolin poliuretan/poliuretan/deselularisasi (PCVP) yang sangat biokompatibel. Produksi dilakukan dengan metode sederhana-mentasi basah. Kompatibilitas sel darah *in vitro*, termasuk hemolisis, waktu rekalsifikasi plasma, waktu pembekuan, adhesi platelet dan sitotoksisitas dievaluasi. Permukaan yang dimodifikasi dengan nanopartikel fosfatidilkolin poliuretan (PC-PU) menunjukkan peningkatan aktivitas antikoagulan. Aktivitas *in vivo* PCVP dipelajari dalam model tikus [12].

Penelitian Yajuan Li pada tahun 2019 yang berjudul “*Sodium triphosphate-capped silver nanoparticles on a decellularized scaffold-based polyurethane vascular patch for bacterial infection inhibition and rapid endothelialization.*” Penelitian tersebut tentang tambalan vaskular yang dapat meningkatkan endotelisasi dan melawan infeksi bakteri dengan cara mengimobilisasi nanopartikel perak yang dilapisi natrium trifosfat pada membran

poliuretan untuk mendapatkan membran komposit dan mengevaluasi biokompatibilitasnya secara *in vitro*. *Vascular patch* yang sudah jadi memiliki biokompatibilitas yang sangat baik dan antimikroba yang memiliki efek kuat terhadap bakteri *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* [5].

Penelitian oleh Isabel Mayoral pada tahun 2022 yang berjudul “*Tissue engineered in-vitro vascular patch fabrication using hybrid 3D printing and electrospinning.*” Penelitian tersebut membahas tentang jaringan kardiovaskular yang direkayasa tiga dimensi (3D). Cangkok vaskular yang direkayasa jaringan (TEVG) dapat menggantikan cangkok biologis dan sintesis. Tujuannya adalah untuk merancang tambalan khusus pasien *in vitro* berdasarkan pencetakan 3D hibrida yang dikombinasikan dengan diferensiasi sel otot polos vaskular (VSMC) menggunakan pemodelan komputasi. Geometri tambalan 3D yang dirancang telah digunakan, pemodelan deposisi fusi hibrid (FDM) dan teknik *electrospinning* adalah teknik yang digunakan untuk mencetak perancah. Perancah diunggulkan dengan sel punca *mesenchymal multipoten* (MSC) untuk pematangan selanjutnya menjadi VSMC turunan (dVSMC). Hasilnya adalah cangkok menunjukkan resistensi yang memadai terhadap tekanan aorta fisiologis [13].

Tabel 2.1 Kajian Pustaka

No	Peneliti	Material	Metode	Temuan
1.	A.M. Ostdiek, 2015 [11].	PTFE dan Dacron	In vivo	Tambalan pembuluh darah memiliki respon penyembuhan yang normal dan PTFE sebagai bahan pembuatan yang diperluas dengan Dacron (polietilen tereftalat) memiliki sifat mekanik yang baik.

Tabel 2.1 Kajian Pustaka (lanjutan)

No	Peneliti	Material	Metode	Temuan
2.	J. Zhang, 2017 [12].	fosfatidilkolin-poliuretan (PCVP)	Sederhana- sementasi basah	PCVP sebagai bahan <i>patch</i> vaskular sangat kompatibel dengan darah. Namun, metode <i>patch</i> vaskular ikatan silang ini rentan terhadap kegagalan endotelisasi karena sitotoksitas pengikat silang.
3.	Y. Li, 2019 [5].	Polyurethane (PU) nanoparticles (NP)	In vivo	Nanopartikel poliuretan (PU) (NP) pada <i>patch</i> vaskular dapat mempercepat proses endotelisasi. Namun dapat menyebabkan infeksi kronis dan keberadaan AgNPS sebagai pelapis dapat menjadi racun bagi sel.
4.	R. Babu, 2021 [4].	asam poli-L-laktat (PLLA) dan poli(kaprolakton)/kolagen (PCL/Col)	Teknik <i>electrospinning</i> dan tenun	Pola unik serat nano dalam nanotekstil menghasilkan perilaku mekanis anisotropik, sesuai untuk bahan tambalan <i>vascular</i> , matriks menunjukkan hidrofilisitas dan hemokompatibilitas yang baik.

Tabel 2.1 Kajian Pustaka (lanjutan)

No	Peneliti	Material	Metode	Temuan
5.	Mayoral, 2022 [13].	sel punca mesenchymal multipoten (MSC)	Pemodelan deposisi fusi hybrid (FDM) dan teknik <i>electrospinning</i>	Pemodelan deposisi leburan memberikan sifat mekanik yang kuat dan biokompatibel. Namun, penelitian pra-klinis pada hewan diperlukan untuk memvalidasi degradasi <i>scaffold</i> , kompatibilitas mekanis dan imunologik jangka panjang.

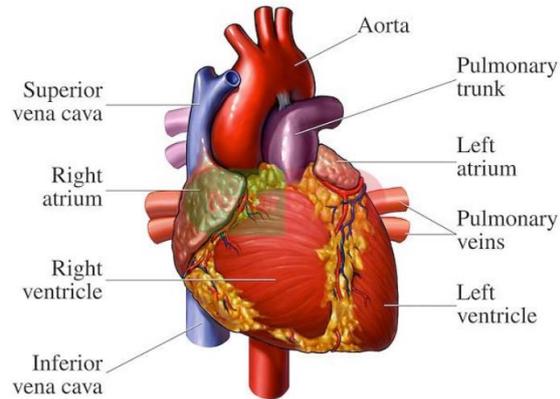
Penelitian sebelumnya yang menjadi acuan utama yaitu penelitian oleh Rosebin Babu pada tahun 2021 yang berjudul “*Design, Development, and Evaluation of an Interwoven Electrospun Nanotextile Vascular Patch.*” Penelitian tersebut meneliti tentang bagaimana mendesain dan melakukan fabrikasi tambalan nanotekstil elektrospun anyaman untuk aplikasi vaskular yang memenuhi persyaratan mekanis dan biologis. Tambalan vaskular nanotekstil berdasarkan polimer yang dapat terbiodegradasi seperti asam Poli-L-laktat (PLLA) dan Poli(kaprolakton)/Kolagen (PCL/Col) diproduksi dengan mengintegrasikan teknik *electrospinning* dan tenun. Benang nano polimer berserat yang diperoleh dengan *electrospinning* diperkuat dengan teknik pasca-pemrosesan yang berbeda dari teknik peregangan termal dan teknik bengkok, menghasilkan nanotekstil yang padat, kuat secara mekanis, namun fleksibel. Penataan *nanofiber* yang unik dalam nanotekstil menghasilkan perilaku mekanik anisotropik yang sangat baik yang cocok untuk bahan pengisi pembuluh darah. Selain itu, matriks ini menunjukkan hidrofilitas, adsorpsi protein, dan hemokompatibilitas yang baik dibandingkan dengan kontrol komersial seperti *polytetrafluoroethylene* yang diperluas (ePTFE) dan *polyethylene tereftalat* (PET) [4].

Dengan mengacu pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk memfabrikasi membran *vascular patch* yang dapat digunakan dalam pengobatan jantung koroner dengan tujuan untuk mengurangi risiko infeksi. Membran tersebut dibuat menggunakan material *Polylactic Acid* (PLA) dan kolagen. PLA dipilih karena merupakan polimer sintetis yang *biodegradable* dan memiliki sifat biokompatibilitas yang baik, sehingga minim risiko reaksi negatif dalam tubuh. Sementara itu, kolagen dipilih karena sifat regenerasi jaringannya yang baik. Dalam penelitian ini, juga digunakan *guest polymer* yaitu *polyvinyl alcohol* (PVA) sebagai material tambahan yang bersifat *electrospinnable*, yang dapat memperbaiki sifat mekanik dan struktural dari membran *vascular patch* yang dihasilkan. Dengan memadukan sifat-sifat unik dari PLA, kolagen, dan PVA, diharapkan dapat menciptakan membran *vascular patch* yang efektif dan aman untuk digunakan dalam pengobatan jantung koroner, serta meminimalkan risiko infeksi dan komplikasi lainnya.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Penyakit Jantung Koroner

Penyakit Jantung Koroner (PJK) dimulai dengan proses aterosklerosis, suatu proses yang rumit yang melibatkan penumpukan lipoprotein dalam plasma dan perkembangan elemen seluler di dalam lapisan dinding arteri [14]. Penyakit jantung koroner merujuk pada kondisi yang dipicu oleh akumulasi plak di arteri koroner, yang berfungsi sebagai saluran pasokan oksigen ke otot jantung. Jenis penyakit ini termasuk dalam kategori penyakit kardiovaskular. Beberapa penelitian mengidentifikasi faktor risiko penyakit jantung koroner yang melibatkan faktor keturunan, usia, jenis kelamin, konsumsi makanan tinggi lemak dan kalori, asupan rendah buah dan sayur, kebiasaan merokok, konsumsi alkohol, kurangnya aktivitas fisik, tekanan darah tinggi, obesitas, diabetes melitus, aterosklerosis, penyakit arteri perifer, stroke, dan dislipidemia. Secara nasional, tidak terdapat satu faktor risiko yang mendominasi penyakit jantung koroner [15].



Gambar 2.1 Anatomi Jantung Manusia [16]

Sebenarnya, penyakit jantung koroner termasuk dalam kategori penyakit menular yang umumnya terjadi pada usia rata-rata 65 tahun. Namun, penyakit jantung koroner lebih sering terkait dengan faktor risiko non-menular seperti gaya hidup, pola makan, dan aktivitas fisik, meskipun ada komponen genetik yang juga dapat mempengaruhi kerentanan seseorang terhadap penyakit ini. Gejala penyakit jantung koroner melibatkan nyeri khas di dada yang dapat merambat ke leher, rahang, lengan, pergelangan tangan, tulang belikat, perut, dan punggung. Oleh karena itu, penting untuk memiliki manajemen diri yang baik dalam mengatur perilaku pribadi guna meningkatkan kesehatan, menjadi aspirasi bagi setiap individu [17]. Pada seseorang yang mengidap penyakit jantung koroner, kepatuhan terhadap diet adalah keadaan kesadaran kebiasaan makan sehari-hari. Kendala terbesar dalam terapi diet adalah rasa kenyang untuk pasien setelah terapi nutrisi. Ditambah lagi dengan tantangan para pasien selama terapi diet, perlu untuk mengurangi jumlah makanan kesukaan, dengan waktu tertentu yang diberikan untuk pemilihan dan persiapan makanan diet [18].

2.2.2 Membran Vascular Patch

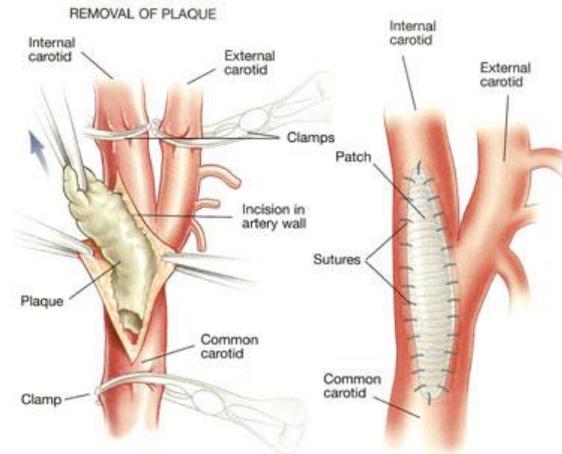
Operasi vaskular dibutuhkan untuk memperbaiki atau mengganti pembuluh darah yang rusak, memulihkan aliran darah, dan mempertahankan fungsi jaringan. Endarterektomi, prosedur pembedahan yang dilakukan untuk memperbaiki stenosis (penyempitan) arteri karotis dan perifer, melibatkan

pembuatan lubang longitudinal di arteri untuk menghilangkan plak aterosklerotik, diikuti dengan penutupan primer atau penutupan dengan bantuan tambalan. Dalam prosedur endarterektomi, penggunaan *patch* vaskular berfungsi untuk mengurangi risiko komplikasi pasca operasi yang menyebabkan reoklusi pembuluh darah. Tambalan vena sintetik atau autologus dan bahan biologis xenogenik merupakan bahan untuk tambalan vaskular. *Patch* sintesis biasanya dibuat dari *Polytetrafluoroethylene* (ePTFE) yang diperluas, *Polyethylene Terephthalate* (PET) dan *Dacron* (terbuat dari serat poliester) [6].



Gambar 2.2 Vascular Patch [19]

Tambalan yang ideal harus memenuhi sejumlah persyaratan krusial untuk memastikan pengaruh yang optimal terhadap aliran darah dalam tubuh. Pertama-tama, tambalan harus dirancang sedemikian rupa untuk mencapai sifat hemodinamik yang ideal. Bentuk yang dapat mengurangi resistensi terhadap aliran darah dan mencegah penolakan oleh sistem kekebalan tubuh. Selain itu, tambalan juga harus kuat dan tahan lama untuk menahan tekanan dari gelombang nadi arteri tanpa mengalami kerusakan. Kemudian, keberadaan bahan yang bersifat biokompatibel sangat penting agar dapat berintegrasi dengan jaringan sekitar tanpa menimbulkan reaksi yang merugikan.



Gambar 2.3 Removal Plaque [20]

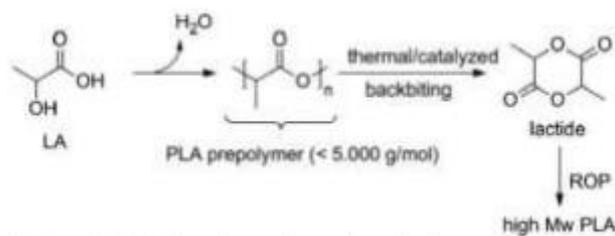
Operasi pengangkatan plak menggunakan *vascular patch* bertujuan untuk menghapus plak aterosklerotik yang menyumbat pembuluh darah dan menghambat aliran darah. *Vascular patch* digunakan untuk menutup lubang pasca pengangkatan plak, sehingga memulihkan aliran darah normal [21]. Tambalan yang ideal juga harus memiliki sifat *bioabsorbable*, yang memungkinkannya untuk perlahan-lahan diserap oleh tubuh dan digantikan oleh jaringan hidup seiring berjalannya waktu. Selain itu, tambalan harus mampu beradaptasi dengan pertumbuhan tubuh pasien, memastikan kinerjanya tetap optimal meskipun terjadi perubahan anatomi. Terakhir, kemampuan tambalan untuk meregenerasi dirinya sendiri sangat penting dalam mencegah terjadinya masalah seperti trombosis dan stenosis yang dapat mengganggu aliran darah normal. Rekayasa jaringan *vascular patch* dapat memecahkan masalah yang terkait dengan penggunaan biomaterial lain dan perangkat yang dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan individu pasien [22].

2.2.3 Polylactic Acid (PLA)

Poli asam laktat atau *Polylactic Acid* (PLA) adalah poliester termoplastik *biodegradable* dan terbarukan yang paling banyak dipelajari dan digunakan yang memiliki potensi untuk menggantikan polimer petrokimia tradisional. PLA atau

yang dikenal dengan poliester hidrofofik alifatik, bahan sintetis yang bisa diproduksi, bisa diserap secara hayati, dan mahal. Ini sangat terkenal pada banyak sekali bidang, misalnya perangkat biomedis implan, pengemasan makanan, sistem pengiriman obat dan lain-lain. PLA dapat terurai secara hayati dan menunjukkan perilaku termoplastik. Aplikasi medis yang relevan berkisar dari rekayasa jaringan dan kedokteran regeneratif hingga aplikasi ortopedi, jantung, dan gigi.

PLA sendiri terdiri dari monomer asam laktat yang membentuk tulang punggung polimernya. Monomer PLA juga dapat disebut sebagai 2-Hydroxypropionic Acid atau *Cyclic Lactide Ester*. PLA dapat diperoleh dari bahan baku terbarukan seperti karbon dioksida, gandum, jagung, dan beras. Produk degradasi PLA juga tidak beracun bagi manusia dan lingkungan. PLA menggunakan energi 25-55% lebih sedikit untuk diproduksi daripada polimer berbasis bensin. *Food and Drug Administration* (FDA) telah menyetujui PLA untuk kontak langsung dengan cairan biologis [23].



Gambar 2.4 Poly(lactic Acid) (PLA) [24]

Sifat mekanik PLA dalam aplikasi teknik mungkin memiliki keterbatasan, ketangguhan yang rendah, menjadikannya bahan yang cukup rapuh dengan tampilan kurang dari 10%. PLA menggabungkan sifat fisik dan kemampuan cetakan termoplastik. Polimer termoset menunjukkan ketahanan panas yang meningkat dan tidak dapat diubah setelah disembuhkan. Sebaliknya, polimer termoplastik dapat dipanaskan atau dipanaskan kembali dan didinginkan untuk mengubah morfologi yang diinginkan. PLA adalah polimer semi kristal dengan suhu transisi kaca (T_g) 55°C dan titik leleh (T_m) 165°C. Berat molekul, struktur primer, karakterisasi optik, dan kristalinitas sangat penting juga untuk sifat fisik PLA. PLA juga dapat dicampur dengan polimer lain termasuk polietilen,

polipropilena, kitosan, polistirena, polietilen tereftalat, dan polikarbonat. Monomer yang membentuk PLA adalah molekul optis aktif, asam laktat ($\text{CH}_3\text{-CHOHCOOH}$) [25].

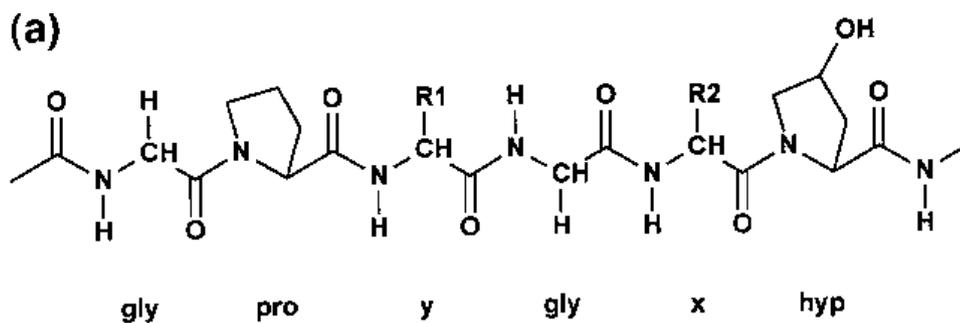
Ada beberapa keuntungan dari bahan ini, seperti, ramah lingkungan. PLA dapat terurai secara hayati, dapat didaur ulang, dan dapat dibuat kompos. Sifat daya tahan dan keramahan lingkungan ini menjadikan PLA sebagai biopolimer yang menarik serta memiliki kompatibilitas biologis. Aspek yang paling menarik dari PLA, terutama dalam aplikasi biomedis, adalah biokompatibilitasnya. Bahan biokompatibel tidak boleh memiliki efek toksik atau karsinogenik pada jaringan lokal [26]. PLA ini semakin banyak digunakan karena sifat mekaniknya yang baik, transparansi, dan kemampuan kompos. Kerugian umum dari keluarga bahan PLA adalah memiliki suhu transisi gelas (T_g) yang lebih rendah hingga sekitar 60°C dibandingkan dengan poliester pesaing [27].

Monomer asam hidroksi PLA adalah asam laktat (asam α -hidroksipropionat), yang memiliki asam hidroksi pada posisi α yang memfasilitasi polimerisasinya. PLA umumnya disintesis oleh polikondensasi dan polimerisasi pembukaan cincin. Kedua rute sintetik tipikal ini juga sering digunakan dalam pembuatan polimer lain [28]. Aplikasi biomedis dapat diadaptasi. Tipe dari sel ke bahan tergantung pada jenis kristalnya. PLLA-b-poli(N,N-dimetilamino-2-etil metakrilat) (PDMAEMA), PDLA-b-PDMAEMA, PLLA dan PDLA juga disintesis dan serat elektrospun disiapkan [29].

2.2.4 Kolagen

Kolagen adalah protein struktural terpenting dari sebagian besar jaringan keras dan lunak, hewan dan tubuh manusia dan memainkan peran penting dalam menjaga integritas biologis dan struktural matriks ekstraseluler serta dukungan fisik jaringan. Kolagen dapat diekstraksi dan dimurnikan dari berbagai sumber serta menawarkan imunogenisitas rendah, struktur berpori, permeabilitas yang baik, biokompatibilitas, dan biodegradabilitas. Kolagen dikenal karena sifat imunogeniknya yang buruk dibandingkan dengan protein lain. Kolagen memiliki struktur yang relatif stabil karena ikatan silang kovalen terbentuk di antara serat

kolagen [30]. Kolagen terlibat dalam perlindungan mekanis jaringan dan organ. Ini memiliki sejarah panjang sebagai bahan alami dan telah digunakan di beberapa bidang biomedis seperti rekayasa jaringan dan sistem penghantaran obat. Sejumlah besar protein kolagen juga digunakan dalam produksi gelatin, yang memiliki berbagai sifat fungsional seperti gel, pengemulsi, koagulan, penstabil dan koloid, dan lainnya.



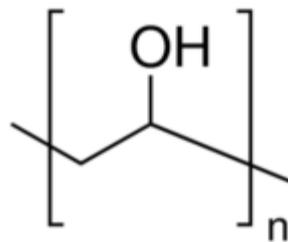
Gambar 2.5 Struktur Kolagen [31]

Ciri yang paling menonjol dari molekul kolagen adalah *triple helix* (karakteristik struktur tersier) dan struktur unik ini terdiri dari tiga rantai polipeptida (rantai identik/tidak identik). Setiap rantai kolagen terdiri dari hampir 1000 asam amino, atau lebih panjang di banyak kolagen. Sumber utama kolagen berasal dari tulang dan kulit hewan jenis sapi seperti sapi, lembu, dan kerbau. Kolagen aman karena tidak menimbulkan reaksi alergi. Sumber kolagen yang paling aman adalah dari laut, termasuk vertebrata dan invertebrata seperti sotong, ubur-ubur, anemon laut, gurita, bulu babi, ikan bintang, udang, dan cumi-cumi. Kolagen dari daging babi dan sapi sangat berpotensi menyebabkan inflamasi dan berbagai penyakit, sehingga kolagen dari laut dianggap sebagai yang terbaik dengan hasil yang lebih unggul. Kolagen dianggap sebagai standar emas untuk rekayasa jaringan karena sifat biokompatibilitasnya yang tinggi [32].

2.2.5 Polyvinyl Alcohol (PVA)

Polyvinyl Alcohol (PVA) adalah polimer polihidroksi yang larut dalam air dan dapat terbiodegradasi yang telah dipelajari secara luas karena stabilitas termal yang baik, biokompatibilitas, ketahanan kimia, dan biaya rendah. PVA adalah

polimer buatan yang digunakan di seluruh dunia pada paruh pertama abad ke-20. PVA diproduksi dengan mempolimerisasi vinil asetat menjadi polivinil asetat dan kemudian menghidrolisis polivinil asetat menjadi PVA. PVA tidak beracun dan larut dalam air, sehingga banyak digunakan di berbagai bidang termasuk bidang medis dan farmasi. Serat nanokomposit PVA yang diperkuat dengan nanopartikel Ag dapat digunakan sebagai pembalut luka. Fabrikasi *nanofiber* komposit berbasis PVA dengan metode *electrospinning* telah banyak digunakan. Beberapa referensi menjelaskan bahwa penambahan bahan anorganik pada PVA mempengaruhi sifat serat berukuran nano [33].



Gambar 2.6 Unit berulang untuk Polivinil Alkohol [34]

PVA pertama kali diproduksi oleh Hermann dan Haehnel pada tahun 1924 dengan menghidrolisis polivinil asetat dengan kalium hidroksida dalam etanol. PVA diproduksi secara komersial dari polivinil asetat, biasanya dalam proses yang berkelanjutan. Gugus asetat dihidrolisis melalui transesterifikasi dengan metanol dengan adanya natrium metilat anhidrat atau natrium hidroksida berair. Sifat fisik dan kegunaan fungsional spesifiknya bergantung pada derajat polimerisasi dan hidrolisis. Terdapat dua kelompok: terhidrolisis sebagian dan terhidrolisis penuh. PVA terhidrolisis sebagian digunakan dalam makanan. PVA termasuk bubuk butiran bening yang tidak berbau, tidak berasa, berwarna putih atau putih pucat. Larut dalam air, sedikit larut dalam etanol, tetapi tidak larut dalam pelarut organik lainnya. PH larutan polivinil alkohol 5% biasanya berkisar antara 5,0 hingga 6,5.

Polimer ini telah dipelajari secara ekstensif untuk digunakan dalam produk ikatan silang dan *nanofiller*. Selain itu juga dapat dengan mudah dicampur dengan

berbagai bahan alami untuk mendapatkan khasiat yang sesuai dengan berbagai aplikasi. PVA sebagai *guest polymer* yang memiliki sifat *electrospinnable*, kemampuan *electrospinning* dari PVA disebabkan oleh struktur molekulnya yang teratur dan polar, serta ketiadaan sifat ionik yang membuatnya lebih mudah dikendalikan. PVA dapat terurai secara hayati dan keberadaan gugus hidroksil pada atom karbon membuatnya lebih mudah terurai melalui hidrolisis. Dengan menambahkan serat dan bahan pengisi alami, sifat mekanik dapat ditingkatkan lebih lanjut tanpa mengurangi kemampuan penguraian secara keseluruhan. Oleh karena itu, potensi manfaat bahan ini karena sifatnya yang larut dalam air sangat besar, namun hal ini harus diimbangi dengan pertimbangan praktis mengenai siklus hidup jangka panjang dalam kondisi lingkungan yang berubah [34].

2.2.6 *Electrospinning*

Bahan non anyaman ditawarkan oleh teknologi *electrospinning* hingga ukuran beberapa nanometer, dengan luas permukaan yang besar, pengoperasian yang mudah untuk berbagai keperluan, dan sifat mekanik yang sangat baik. Bidang biomedis adalah salah satu aplikasi terpenting, termasuk penggunaan teknologi *electrospinning* seperti *filter* dan bahan pelindung, aplikasi listrik dan optik, sensor, komposit yang diperkuat *nanofiber*, dan masih banyak lagi. Rakitan *electrospinning* dapat dimodifikasi dengan berbagai cara untuk menggabungkan sifat-sifat material dengan struktur morfologi yang berbeda untuk aplikasi ini. Pentingnya *electrospinning* dalam aplikasi biomedis umum seperti penghantaran obat melalui rekayasa jaringan, pembalut luka, imobilisasi enzim, dan lain-lain.

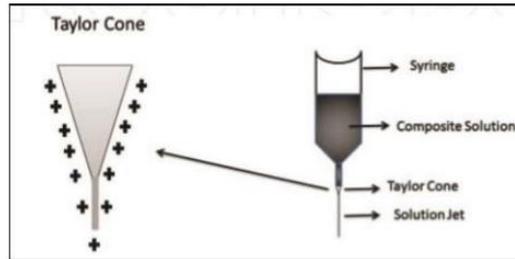
Electrospinning adalah teknik yang sangat serbaguna yang melibatkan penggabungan dua teknik, yaitu *electrospray* dan *spinning*. Medan listrik yang kuat diterapkan pada tetesan cairan yang dapat berbentuk cair atau leleh, yang timbul dari ujung cetakan yang berperan sebagai salah satu elektroda. Dampak dari medan listrik yang diterapkan adalah deformasi pada tetesan, yang akhirnya menghasilkan pelepasan jet bermuatan dari ujung kerucut. Jet ini kemudian berakselerasi menuju elektroda lawan, menyebabkan pembentukan serat kontinu [35]. *Electrospinning* menerapkan gaya elektrostatis untuk membuat struktur bahan *nanofiber*. Dengan demikian, fenomena elektrofisiologi ini meluas dan

memanjang larutan dari ujung jarum suntik ke kolektor dibantu oleh peristiwa penguapan membuat serat menjadi lebih halus [36].



Gambar 2.7 Mesin *Electrospinning* [36]

Electrospinning ini sederhananya melibatkan sumber daya DC tegangan tinggi, pompa injeksi, *spinner*, dan pengumpul. Tetesan cairan dilepaskan dari *spinneret*, selama proses *electrospinning* menjadi bermuatan listrik dan berubah bentuk karena tolakan elektrostatis untuk membentuk kerucut *Taylor*. Sebuah jet muncul dari puncak kerucut *Taylor*, membentuk pita cair yang panjang dan tipis. Filamen ini awalnya bergerak meregang dan meregang dalam medan listrik. Dengan diameter yang lebih kecil, pelarut menguap dengan cepat, menyebabkan serat mengeras dan terkumpul di kolektor. Pelarut yang dipilih untuk menyiapkan larutan polimer harus memiliki tekanan uap, viskositas, dan tegangan permukaan yang sesuai untuk meningkatkan integritas serat. Selain faktor kunci tersebut, proses *electrospinning* membutuhkan pemahaman tentang parameter lain yang mempengaruhi pembentukan kerucut *Taylor* dan ketidakstabilan jet, yaitu konduktivitas larutan atau lelehan, elektrostatis, kekuatan medan listrik, muatan permukaan, dan medan ionisasi [35].



Gambar 2.8 Pembentukan *Taylor Cone* [33]

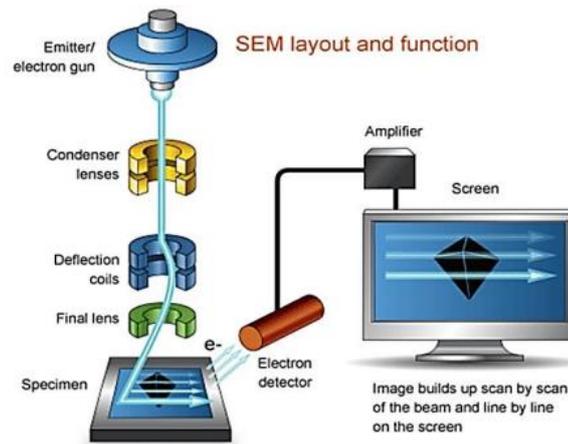
Electrospinning yang paling umum yang menggunakan bahan polimer. Beberapa polimer meliputi polimer industri, polimer *biodegradable*, polimer khusus dan polimer alami. Secara umum polimer tersebut harus mempunyai berat molekul yang tinggi dan dapat larut dalam pelarut atau dapat dikatakan homogen. *Electrospinning* dapat digunakan untuk polimer penting secara komersial seperti polietilen dan polipropilena yang larut dalam beberapa pelarut [33].

2.2.7 Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah suatu instrumen mikroskop elektron yang memanfaatkan elektron untuk melakukan pemindaian objek. Penggunaan umum dari SEM adalah untuk mengamati objek pada skala nanometer (skala nano) karena kemampuannya dalam memberikan resolusi tinggi pada struktur permukaan sampel. SEM digunakan secara luas dalam berbagai bidang teknologi skala nano. Aplikasinya meliputi ilmu material, forensik, metalurgi, analisis kegagalan elektronik, ilmu korosi, batuan mineral, perangkat nano, polimer, katalisis, desain semikonduktor, dan identifikasi material dalam produksi minyak dan gas. Komponen pendukung SEM meliputi catu daya (*power supply*), sistem vakum, dan sistem pendingin.

SEM memang menggunakan sistem vakum untuk menciptakan lingkungan bebas partikel udara sehingga elektron dapat bergerak dengan bebas dan memberikan resolusi tinggi saat memindai objek. Tegangan tinggi yang diterapkan selama pengoperasian SEM dapat menyebabkan peningkatan suhu di dalam alat. Seringkali diperlukan sistem pendingin untuk menjaga suhu agar tetap dalam batas yang aman dan menjaga suhu pada level kerja yang optimal selama penggunaan SEM. Hal ini tidak hanya mendukung kinerja alat yang stabil tetapi juga membantu mencegah potensi kerusakan atau pengaruh negatif pada kinerja

alat serta perubahan pada sampel yang diamati. Penggunaan sistem pendingin merupakan strategi umum untuk memastikan kondisi operasional SEM yang optimal. Oleh karena itu, penggunaan sistem pendingin diperlukan untuk mempertahankan suhu pada level yang ideal selama beroperasi.

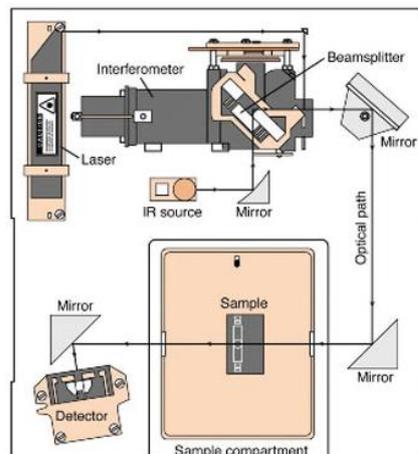


Gambar 2.9 Skema SEM (kolom SEM dan *display image*) [37]

Selama pengoperasian, sistem SEM ditempatkan di lantai yang tidak bergetar dan di lingkungan ruangan yang bebas dari medan magnet atau gangguan listrik yang dapat mempengaruhi operasional dan akurasi perangkat tersebut. Posisi dan lingkungan operasional yang tepat membantu memastikan hasil pengamatan SEM yang akurat dan konsisten. Jadi, dapat meminimalkan gangguan eksternal seperti getaran atau medan elektromagnetik adalah praktik yang umum dilakukan dalam penggunaan SEM. Panjang gelombang yang dihasilkan oleh 54 elektron *probe* berada di luar jangkauan spektrum cahaya tampak, maka gambar yang dihasilkan oleh SEM bersifat monokromatik, muncul dalam skala warna hitam dan putih. Sejalan dengan prinsip SEM, berkas elektron dengan radius kecil diterapkan untuk menerangi sampel. Elektron kemudian berinteraksi dengan atom-atom dalam sampel. Akibat dari interaksi elektron dengan sampel, terjadi pembentukan sinyal yang membawa informasi mengenai topografi permukaan, komposisi, morfologi, dan parameter lainnya. Sinyal-sinyal ini dapat dideteksi oleh perangkat detektor untuk analisis lebih lanjut [37].

2.2.8 Uji *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Metode spektroskopi inframerah yang menggunakan *Fourier Transform* disebut sebagai *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Dalam spektroskopi inframerah, radiasi inframerah melewati sampel yang sedang dianalisis. Sejumlah radiasi inframerah dapat diserap oleh sampel, sementara yang lainnya ditransmisikan melalui sampel [38]. Spektrum yang dihasilkan mencerminkan pola penyerapan dan transmisi molekul dalam sampel, membentuk suatu jejak yang dapat diidentifikasi untuk molekul tersebut. Sama seperti sidik jari, tidak ada dua molekul dengan struktur yang berbeda yang akan memberikan spektrum inframerah yang sama persis. Karakteristik unik ini membuat spektroskopi inframerah menjadi alat yang berharga untuk berbagai jenis analisis. Spektroskopi FTIR adalah jenis spektroskopi yang paling umum digunakan. Metode ini menggunakan transformasi *Fourier* pada hasil spektral inframerah untuk analisis [39].



Gambar 2.10 Bagian Alat FTIR [39]

2.2.9 Uji Degradabilitas

Pengujian degradabilitas merupakan suatu prosedur untuk mengevaluasi kemampuan suatu bahan atau produk untuk terdegradasi oleh mikroorganisme hidrolitik dan bakteri. Selain itu, uji ini merupakan suatu proses atau metode yang digunakan untuk menguji stabilitas atau ketahanan bahan atau produk terhadap perubahan atau kerusakan yang terjadi seiring berjalannya waktu atau dalam

kondisi lingkungan tertentu [40]. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana suatu bahan atau produk mempertahankan kualitas dan kinerjanya selama periode waktu tertentu atau dalam kondisi tertentu. Dalam uji ini, laju degradasi atau *Degradation Rate* (DR) penting dan dinyatakan dalam satuan gram per hari, dihitung dengan rumus selisih antara berat awal dan berat akhir dibagi dengan durasi waktu dalam satuan hari. Rumus ini digunakan untuk menentukan kecepatan penurunan massa suatu bahan dalam periode tertentu. Secara matematis, hal ini dinyatakan seperti pada persamaan 2.2.9 [41].

$$DR \text{ (gram/hari)} = \frac{(\text{berat awal} - \text{berat akhir})}{\text{waktu (hari)}} \quad (2.2.9)$$

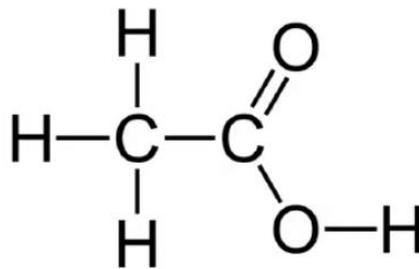
Metode pengujian degradasi dapat bervariasi tergantung pada jenis bahan atau produk yang diuji dan faktor lingkungan yang terlibat. Contoh uji degradasi adalah uji keausan yang berfungsi untuk mengukur perubahan fisik atau mekanis pada material yang disebabkan oleh gesekan atau penggunaan berulang. Uji ketahanan korosi untuk menguji kemampuan suatu material dalam menahan kerusakan akibat reaksi kimia dengan lingkungan, seperti oksidasi dan korosi. Uji penuaan panas dengan mengenakan bahan pada suhu tinggi untuk menilai perubahan sifat fisik dan mekanik seiring waktu. Pengujian paparan lingkungan yang memaparkan material pada kondisi lingkungan tertentu seperti sinar ultraviolet, kelembapan, dan suhu ekstrem untuk menilai respons material terhadap faktor-faktor ini [42].

Uji biodegradasi merupakan sebuah metode yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan suatu bahan dalam mengalami degradasi melalui proses biologis atau alami yang terjadi dalam suatu lingkungan tertentu. Hasil dari uji tersebut memiliki peran yang signifikan dalam mengidentifikasi potensi kerentanan yang mungkin dimiliki oleh desain atau konstruksi suatu bahan atau produk, serta dalam memperkirakan masa manfaat atau masa aman penggunaan. Selain itu, pengujian kerusakan juga memiliki peran penting dalam memastikan bahwa produk tersebut memenuhi standar kualitas dan keamanan yang berlaku, sehingga dapat dipastikan bahwa produk tersebut aman digunakan oleh

konsumen. Uji ini memberikan wawasan yang mendalam tentang kualitas dan keamanan produk secara keseluruhan [43].

2.2.10 Asam Asetat

Asam asetat memiliki kemampuan ekstraksi kolagen yang lebih efektif daripada pelarut lain seperti asam sitrat dan asam klorida. Jika konsentrasi asam terlalu tinggi, hidrolisis lebih lanjut dapat terjadi, mengubah rantai kolagen menjadi gelatin. Selain itu, perlu dilakukan pengaturan waktu ekstraksi yang tepat dengan cara perendaman dalam asam. Semakin lama waktu ekstraksi maka penyerapan air oleh kulit semakin besar, dan serat kolagen semakin mudah terkelupas dari kulit sehingga proses ekstraksi menjadi lebih mudah. Waktu perendaman yang terlalu lama dapat mengganggu kelarutan kolagen dan menyebabkan hilangnya kolagen [44].



Gambar 2.11 Rumus Kimia Asam Asetat [45]

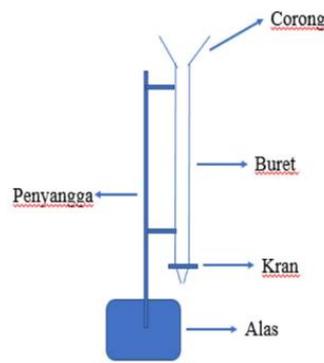
Rumus asam asetat atau cuka adalah $C_2H_4O_2$. Rumus ini sering ditulis dalam bentuk CH_3-COOH , CH_3COOH , atau CH_3CO_2H . Asam asetat dapat digunakan dalam proses demineralisasi. Asam asetat digunakan dalam proses desalinasi karena merupakan asam organik dengan kandungan mineral rendah dan bau yang tidak terlalu menyengat dibandingkan asam lainnya. Asam asetat cair, seperti air dan etanol, merupakan pelarut protik hidrofilik (polar) [46]. Asam asetat, dengan konstanta dielektrik yang moderat sebesar 6,2, memiliki kemampuan untuk melarutkan senyawa polar seperti garam anorganik dan gula. Selain itu, asam asetat juga dapat melarutkan senyawa non-polar seperti minyak, serta unsur-unsur seperti belerang dan yodium. Asam asetat mudah bercampur

dengan pelarut polar atau non-polar lainnya seperti air, kloroform, dan heksana. Asam asetat sering digunakan dalam industri kimia karena kelarutan dan kelarutannya [45]. Asam asetat sering disebut juga sebagai cuka, suatu bahan yang umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari, baik dalam dunia kuliner maupun keperluan rumah tangga lainnya. Cuka mengandung asam karboksilat yang mengoksidasi dan menetralkan permukaan email, memutih gigi. Cuka digunakan sebagai pengasaman dan pengawet dalam makanan. Cuka tidak hanya murah tetapi juga mudah didapat di pasaran [47].

2.2.11 Viskositas

Dalam fisika dasar, viskositas merupakan suatu materi fluida statis. Viskositas merujuk pada tingkat gesekan yang terjadi antara lapisan-lapisan berdekatan dalam suatu fluida. Viskositas pada gas dan cair disebabkan oleh tumbukan antara molekul dalam zat tersebut. Viskositas pada zat cair disebabkan oleh adanya gaya kohesi antara molekul-molekul zat cair. Faktor suhu dapat memengaruhi viskositas fluida. Viskositas dengan suhu memiliki perbandingan yang terbalik, dimana apabila suhunya naik atau tinggi, maka viskositas akan turun atau rendah. Begitu juga sebaliknya, apabila suhu rendah, maka viskositas akan tinggi [48]. Selain itu, dapat dikatakan juga bahwa viskositas adalah gesekan yang terjadi di dalam zat cair [49].

Viskositas adalah ukuran kekentalan suatu zat cair dan dapat diartikan sebagai seberapa besar gaya yang diperlukan untuk menggerakkan suatu benda dalam zat cair tersebut. Semakin tinggi kekentalan suatu zat cair, semakin besar pula viskositasnya. Dalam cairan, air memiliki viskositas lebih rendah dibandingkan sirup, minyak, dan lemak. Nilai koefisien viskositas air adalah $1,8 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ pada 0°C , $1,0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ pada 20°C , dan $0,3 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ pada 100°C [50]. Alat ukur untuk mengukur kekentalan (viskositas) zat cair adalah viskosimeter.



Gambar 2.12 Desain Alat Viskometer [51]

Viskometer ini dapat mengukur kekentalan zat cair secara akurat dan spesifik sesuai standar yang ditentukan. Viskometer yang sering digunakan mencakup viskometer jatuh, viskometer tabung atau kapiler seperti Ostwald, dan sistem berputar. Viskometer Ostwald adalah salah satu jenis viskometer yang dapat digunakan sebagai alternatif. Viskometer Ostwald adalah jenis viskometer yang umum digunakan. Viskometer Ostwald memerlukan jumlah sampel yang lebih sedikit dibandingkan dengan beberapa jenis viskometer lainnya. Prinsip yang digunakan oleh viskometer Ostwald adalah mengukur waktu yang diperlukan oleh suatu zat cair untuk melewati dua titik tertentu pada kapiler vertikal [51]. Dalam proses *electrospinning fiber*, viskositas standar sekitar 0.1-0.2 Pa·s. Viskositas lebih tinggi membantu menghasilkan serat nano yang halus dan kontinu, sementara viskositas lebih rendah menghasilkan serat nano yang lebih besar dan kurang terintegrasi [52].