

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DANDASAR TEORI**

#### **2.1. Tinjauan Pustaka**

Ding dkk. (2002) meneliti pembuatan dan karakterisasi fiber PVA berskala nanometer dengan metode elektrospinning. PVA yang digunakan memiliki MW 65.000 dengan 96% hidrolisis. Fiber PVA dengan diameter 50-250 nm dihasilkan dengan variasi konsentrasi larutan, tegangan, dan jarak tip ke kolektor. Konsentrasi larutan yang digunakan divariasi dari 7-15%. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Ding dkk (2002), faktor yang paling mempengaruhi diameter fiber ialah konsentrasi larutan.

Rwei dan Huang (2012) telah melakukan penelitian tentang analisis morfologi dari hasil elektrospinning larutan PVA. PVA yang digunakan memiliki MW 88.000 dan 16.000. Rentang konsentrasi yang diteliti dengan PVA MW 88.000 adalah 6% hingga 14%. Fiber hasil elektrospinning memiliki diameter rata-rata 230-460 nm untuk PVA dengan MW 88.000.

Sementara untuk PVA dengan MW 16.000 menghasilkan fiber dengan rata-rata diameter 110-320 nm. Rentang konsentrasi yang digunakan untuk PVA dengan MW 16.000 adalah 14 hingga 24%. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya ketergantungan fiber hasil elektrospinning terhadap MW yang digunakan. Morfologi fiber dari variasi larutan PVA dengan MW 16.000 dapat dilihat pada gambar 2.3

Li dkk. (2013) menggunakan PVA dengan MW 118.000 – 124.000 dengan variasi konsentrasi 6 hingga 10%. Karakterisasi larutan PVA melalui parameter konduktivitas dan viskositas dilakukan untuk mengetahui perbedaan pada setiap konsentrasi. Dari hasil pengukuran, konsentrasi meningkat diikuti meningkatnya nilai konduktivitas dan tegangan permukaan. Diameter fiber meningkat dengan adanya peningkatan konsentrasi. Pada rentang MW 118.000-124.000 memiliki batas untuk dapat menghasilkan fiber yang seragam dan kontiyu pada konsentrasi 8% berat. Semakin besar konsentrasi maka akan semakin besar diameter rata-rata dari nanofiber PVA.

Rosic dkk. 2013 melakukan penelitian tentang sifat fisik dari larutan PVA yang akan dielektrospinning. PVA yang digunakan memiliki berat molekul 125.000 g/mol. Keberhasilan proses elektrospinning bergantung pada nilai-nilai parameter larutan polimer. Parameter yang diukur antaralain viskositas, konduktivitas dan teganga permukaan. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi larutan PVA maka semakin besar pula tegangan permukaan dari larutan. Semakin besar konsentrasi maka semakin besar pula konduktivitasnya dan semakin menurun konduktivitas per molarnya. Semakin besar konsentrasi maka semakin besar pula nilai viskositasnya.

Harsojo (2013) melakukan penelitian mengenai pembuatan serat nanofiber dengan metode electrospinning. Fabrikasi nanfiber dilakukan menggunakan PVA yang dilarutkan pada aquades sampai kadar 10% wt, kemudian diumpankan pada alat electrospinning dengan tegangan listrik dan jarak yang divariasi (tegangan 5, 10 dan 20 kV serta jarak 40 dan 60mm). Serat yang dihasilkan dari PVA 10% wt memiliki pola acak “*non woven*”. Tegangan yang lebih tinggi dan jarak yang lebih jauh dapat menghasilkan serat yang tidak mengandung butir *beads*.

Papitak (2010) melakukan penelitian mengenai fabrikasi membran nanofiber PVA/kitosan menggunakan larutan PVA/kitosan *blend* pada perbandingan berat 80:20 dalam 2% asam asetat. Konsentrasi kitosan divariasi (3, 4, 5% berat) dengan pengadukan selama 90 menit pada temperature 75°C menggunakan *magnetic stirring*. Proses electrospinning dilakukan pada tegangan variasi yaitu 21-25 kV dan jarak tip ke kolektor 10 cm. pengamatan morfologi permukaan menggunakan SEM memperlihatkan sistem nanofiber yang terdiri dari struktur nanofiber dan butiran *beads*. Konsentrasi kitosan mempengaruhi produktifitas *beads* pada nanofiber, semakin meningkatnya konsentrasi kitosan maka produksi *beads* cenderung lebih sedikit. Formasi nanofiber optimum dicapai oleh nanokomposit fiber PVA/kitosan pada konsentrasi kitosan 5%wt dengan diameter nanofiber yang cenderung seragam pada 100nm.

Biazar et al., (2015) melakukan penelitian lanjutan mengenai hasil pengujian papitak (2010) dengan melakukan pengujian sifat mekanik pada nanokomposit fiber PVA/kitosan dengan parameter fabrikasi yang serupa. Hasil uji

tarik menampilkan sifat mekanik yang lebih unggul dicapai pada konsentrasi 5% dengan nilai tegangan maksimal 11 MPa dan regangan 21%.

Sosiati (2018) melakukan penelitian fabrikasi membran PVA *Gohsenol* dengan pengisi (*filler*) matriks polimer jenis baru yaitu *Aloe Vera*. Hal mengejutkan bahwa membran serat nano berbahan dasar PVA/*Aloe vera* dengan konsentrasi (0, 2, 4, 6 % w/w) berhasil difabrikasi, yang menghasilkan kondisi optimum pada konsentrasi PVA/*Aloe vera* 4 %. Dari hasil pengujian tarik didapat nilai kuat tarik antara (2,22 – 6,38 MPa), nilai modulus elastisitas (13,69 – 34,75 MPa) dan nilai regangan (63,92 – 141,29 %).

Nugroho (2018) melakukan penelitian fabrikasi membran PVA *Gohsenol* dengan pengisi (*filler*) matriks polimer jenis baru yaitu lendir bekicot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran serat nano berbahan dasar PVA/Lendir bekicot dengan konsentrasi (0, 2, 4, 6 % w/w) berhasil difabrikasi, yang menghasilkan kondisi optimum pada konsentrasi PVA/lendir bekicot 2 %. Dari hasil pengujian tarik didapat nilai kuat tarik antara (3,48-5,37 MPa), nilai modulus elastisitas (12 - 22,7MPa) dan nilai regangan (101,25 – 157,13 %) yang berpotensi diaplikasikan sebagai pembalut luka, karena masuk dalam standar material medis yang harus memiliki nilai kuat tarik 1-24 MPa dan nilai elongasi antara 17 – 207 %

Tabel 2.1 menampilkan rangkuman penelitian-penelitian yang telah dilakukan tentang nanofiber PVA hasil elektrospinning dan juga parameter-parameter yang diamati. Bersarkan referensi-referensi tersebut belum ada yang meneliti nanofiber PVA *Gohsenol* dengan bahan pengisi (*filler*) ekstrak *Curcuma Mangga Val. CMV* telah terbukti memiliki aktivitas antimikroba yang dapat menahan beberapa bakteri seperti *Pseudomonas aureginosa*, *Staphylococcus aureus* dan bakteri lainnya yang dapat menyebabkan infeksi kulit (Novita, 2011). PVA *Gohsenol* memiliki MW yang tidak terlalu tinggi dan tidak terlalu rendah, MW yang terlalu kecil akan membutuhkan konsentrasi yang cukup tinggi untuk mencapai konsentrasi optimal untuk menghasilkan fiber dari proses elektrospinning

**Tabel 2.1** Penelitian tentang nanofiber PVA hasil elektrospinning

| Referensi             | Molecular Weight (MW) PVA (g/mol) | Parameter yang diamati   | Parameter tetap yang digunakan                   |
|-----------------------|-----------------------------------|--|--|
| Ding dkk. (2002)      | 65.000                            | Konsentrasi larutan, tegangan yang digunakan dan jarak tip ke kolektor             | Tegangan 7-19 kV, Jarak ke kolektor 4-12 cm      |
| Rwei dan Huang (2012) | 18.000<br>88.000                  | Konsentrasi larutan dan MW   | Tegangan 0kV                                     |
| Li dkk. (2013)        | 118.000<br>124.000                | Konduktivitas tegangan permukaan dan viskositas larutan                            | Tegangan 17kV, jarak ke kolektor 12 cm           |
| Rosic dkk (2013)      | 125.000                           | Konduktivitas, tegangan permukaan dan viskositas                                   | Tegangan 15kV, Jarak ke kolektor 15cm            |
| Harsojo (2013)        | -                                 | Tegangan dan jarak tip ke kolektor   | Tegangan 5, 10 dan 20 kV serta jarak 40 dan 60mm |
| Papitak (2010)        | -                                 | Konsentrasi larutan, viskositas, dan tegangan yang digunakan                       | Jarak tip ke kolektor 10 cm                      |
| Biazar et al          | -                                 | Konsentrasi larutan, viskositas, dan tegangan yang digunakan                       | Jarak tip ke kolektor 10 cm                      |
| Sosiati (2018)        | PVA <i>Gohsenol</i><br>22.000     | Konsentrasi larutan, viskositas, tegangan yang digunakan dan jarak tip ke kolektor | Tegangan 10kV, Jarak ke kolektor 16.5            |
| Aris (2018)           | PVA <i>Gohsenol</i><br>22.000     | Konsentrasi larutan, viskositas, tegangan yang digunakan dan jarak tip ke          | Tegangan 10kV, Jarak ke kolektor 16.5            |

MW yang terlalu tinggi akan membutuhkan tegangan yang tinggi pula. Semakin besar berat molekul, pada konsentrasi yang sama akan membutuhkan tegangan yang lebih tinggi. Berat molekul ini relatif rendah maka tegangan yang dibutuhkan berkisar antara 1- hingga 15kV. Penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki pengaruh dari parameter larutan (konsentrasi, viskositas, dan konduktivitas larutan) terhadap morfologi dan sifat kuat tarik membran nanofiber PVA *Gohsenol*/CMV hasil elektrospinning.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Polimer

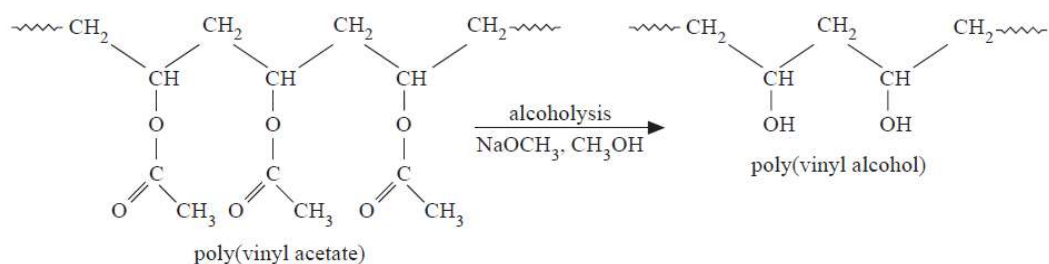
Kata polimer berasal dari bahasa Yunani, “*poly*” artinya banyak dan “*meres*” artinya bagian. Polimer merupakan makromolekul yang tersusun oleh beberapa rantai kimia sederhana. Polimer tersusun oleh n-monomer. Perubahan bentuk ddari monomer ke polimer melibatkan penyusunan kembali elektron-elektron (Ebewele, 2000)

Polimer memiliki kemampuan dengan ekstensi tinggi dibawah kondisi *ambient* dapat diaplikasikan sangat penting sebagai elastomer. Untuk tambahan pada karet alami, ada beberapa sintesis elastomer penting termasuk nitril dan karet rubber. Polimer lain yang mempunyai karakteristik yang dapat dibuat menjadi fiber yang panjang dan dapat diaplikasikan di bidang tekstil. Pembuatan fiber, prinsipnya nylon dan polyester, merupakan pengganti untuk fiber alami seperti kapas, wool dan sutra (Fried, 2014)

Sebaliknya, penggunaan polimer pada material komersial lebih dari elstomer dan fiber yang diturunkan dari polimer sintetis disebut plastik. Jenis plastik komersial resin memiliki dua atau lebih polimer sebagai tambahan untuk perbedaan zat tambahan dan pengisi (Fried, 2014)

### 2.2.2 Poly (Vinyl Alcohol) / PVA

*Poly (Vinyl Alcohol) / PVA* merupakan polimer tidak stabil, isomer dengan *acetaldehyde*. Oleh karena itu, PVA dihasilkan secara tidak langsung dengan cara alkoholisis dari *poly (vinyl asetat)* yang terkonsentrasi metanol atau etanol. Reaksinya dilakukan oleh adanya katalis basa ataupun asam (katalis basa lebih cepat reaksinya). Reaksi pembentukanya dapat dilihat pada gambar 2.1



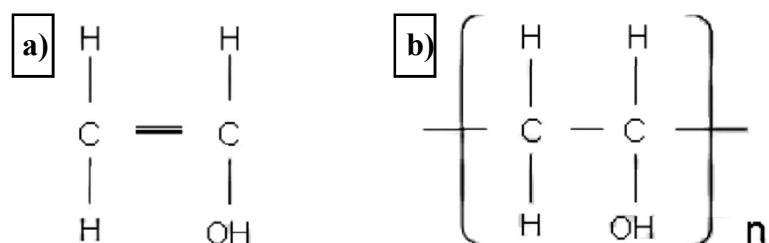
**Gambar 2.1** Reaksi pembentukan poly (vinyl alcohol) Ebewele, 2000)

PVA memiliki struktur rantai yang atatic, dan konsekuensinya bersifat amorphus. Bagaimanapun juga PVA dapat diregangkan menjadi fiber kristalin. Ukuran kecil dari gusus OH memungkinkan PVA untuk menyesuaikan menjadi kisi kristal. PVA tersedia pada beberapa tingkatan yang dibedakan oleh berat molekul dan dari derajat hidrolisisnya, yang akan menentukan keterlarutan dalam air (Ebewele, 2000)

PVA memiliki kapasitas absorpsi air yang tinggi dan terlihat seperti kapas. Saat fiber PVA yang direaksikan dengan *formaldehyde*, fiber vinal atau vinylon dapat menggantikan kapas pada aplikasi kontak dengan tubuh. Fiber PVA memiliki stabilitas dimensi dan penahan air yang baik, mudah dibersihkan dan cepat kering (Ebewele,2000)

PVA pertama kali difabrikasi oleh herman dan haehnel pada tahun 1924. merupakan salah satu dari beberapa polimer sintetik yang memiliki sifat “biodegradable” (Kroschwitz, 1998). PVA memiliki densitas 1,3 gram/cm<sup>3</sup> pada temperature 20°C pada kisaran pH antara 3,5 sampai 7,0 jika dilarutkan dengan konsentrasi 40 gram/liter pada temperature 20°C (Simanjuntak, 2008). PVA memiliki sifat hayati yang baik dan pola tekstur yang elastis, memiliki kemampuan tinggi untuk larut dan mengembang dalam air, tidak korosif, lembut serta adesif.

Selain diaplikasikan sebagai bahan biomedis, PVA juga banyak dipakai sebagai pelapis kertas (*paper coating*), pengkilap permukaan (*warpsizing*), bahan adesif dan sensor kelembaban. PVA difabrikasi dari monomer vinil asetat (Simanjuntak, 2008). Struktur PVA diperlihatkan pada gambar 2.2



**Gambar 2.2** Struktur (a) Vinil asetat (b) PVA (Simanjuntak, 2008)

Ikatan silang yang baik dengan monomer/polimer lain maupun pemberian penguat pada *solvent* menjadikan PVA dapat digunakan sebagai polimer alternative penyusun membran.

### **2.2.3 *Curcuma Mangga Val***

Jenis kunir (*Curcuma/kunyit/temu*) termasuk dalam keluarga *Zingiberaceae*. Kunir dianggap berasal dari daerah Indo-Malaya (Purseglove, 1968) serta tersebar luas di daerah tropis Asia ke Afrika dan Australia. Dari 100 lebih spesies dilaporkan dalam genus ini, dan sekitar 40 spesies berasal dari India (Velayudhan dkk., 1999). Di seluruh dunia, kunir lebih dikenal sebagai bumbu. Penggunaannya adalah sebagai bumbu bubuk kari, kaldu ayam, saus, bumbu kering, sup, minuman, permen, dan lain sebagainya (Sasikumar, 2001). Dalam perkembangannya, kunir tidak hanya dimanfaatkan untuk bumbu, tetapi juga untuk pengobatan beragam jenis penyakit, bahkan perempuan Jawa menggunakannya sebagai bahan baku lulur, untuk merawat kecantikan kulit.

Secara turun menurun, kunir telah digunakan di India untuk pengobatan berbagai penyakit manusia dan hewan, sebagai pewarna alami, serta dalam persiapan hidangan. Keberadaan kunir sekarang semakin penting diseluruh dunia dan dijadikan sebagai obat yang mujarab untuk melawan berbagai macam penyakit, seperti antiperadangan, hipokolesterolemik, koleretik, anti mikroba, anti rematik, antifibrotik, antibisa, antivirus, antidiabetes, antihepatotoksik, dan antikanker serta aktivitas anti serangga (Chattopadhyay dkk.,2004). Minyak astiri dalam kunir sekarang juga digunakan sebagai aromaterapi pada industri parfum.

Kunir juga mengandung turmerin (peptida yang larut dalam air), minyak esensial (seperti *tumeron*, *atlanton*, dan *zingiberon*) dan kurkuminoid yang termasuk kurkumin (*Curcumin*) dengan rumus : [1.7-bis-(4-hidroksi-3-metoksifenil)-1, 6-heptadiene-3.5-Dione] dan kurkuminoid yang dapat didefinisikan sebagai senyawa felonik yang berasal dari akar *Curcuma* spp. Kurkumin (*diferuloylmethane*) yang juga disebut “temu India” adalah polifenol dengan berat molekul rendah. Pertama kali diisolasi hampir dua abad yang lalu dan karakterisasi kimia pada tahun 1910, yang umumnya dianggap sebagai

Kurkuminoid ada di beberapa spesies *Zingiberaceae* seperti *Curcuma zedoaria* (kunir putih/temu putih), *Curcuma longa* (kunyit), *Curcuma mangga* (temu mangga), *Curcuma aromatic* (temu liar), dan *Curcuma xanthorrhiza* (Anggarwal dkk., 2003).

Kunir dikenal oleh masyarakat di Indonesia meliputi temu putih (*Curcuma zedoaria* Rosc), kunir putih jenis gombyok (*Kaempferia rotunda*) dan kunir putih jenis mangga (*Curcuma mangga* Val).



**Gambar 2.3** Kunir putih jenis mangga (*Curcuma mangga* Val)

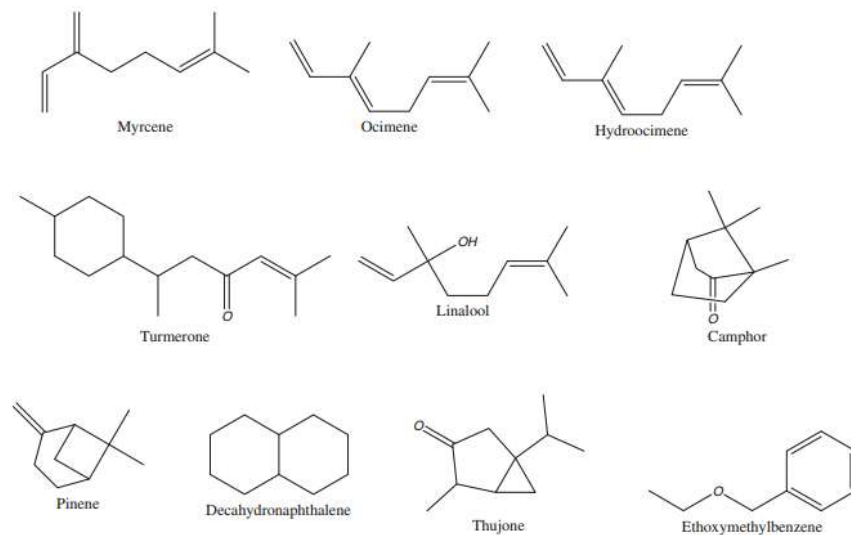
Temu mangga adalah salah satu jenis kunyit yang memiliki ciri khas umbinya berwarna kuning dan memiliki bau khas seperti bau mangga. Temu mangga disebut juga *Curcuma amada* Roxb atau *Curcuma mangga* Val. Temu mangga berasal dari wilayah Indo-Malaya, dan secara luas didistribusikan ke daerah tropis, yaitu Asia, Afrika, dan Australia. Tanaman ini tumbuh hingga mencapai tinggi 1-2 m, memiliki dau panjang 5 sampai 6 pasang dalam satu tanaman, dan rimpangnya memiliki panjang 5-10 cm dengan diameter 2-5 cm.

Temu mangga adalah repah-rempah unik yang memiliki kemiripan morfologi dengan jahe (*Zingiber officinale*), tetapi memiliki aroma seperti mangga (*Mangifera indica*). Analisis proksimat dan gizi rimpang temu mangga memainkan peran penting dalam menilai kualitas gizi dan nutrasetikal. Rimpang temu mangga



ditemukan menjadi sumber yang kaya serat dan pati (Lakshminaraya dkk., 1963). Kadar serat kasar bubuk kunir putih adalah 4.15% (Ghozin, 2015).

Ada banyak laporan tentang komposisi minyak astiri temu mangga. Aroma mangga terutama dikaitkan dengan kehadiran *car-3-ene* dan *cis-ocimene* diantara 68 komponen aroma volatil yang ada dalam minyak esensial di antara 68 komponen aroma volatil yang ada dalam minyak esensial dari rimpang temu mangga (Mustafa dkk., 2005). Komponen volatil dari kunir putih jenis mangga dapat dilihat pada Gambar 2.11



**Gambar 2.4** Komponen volatil kunir putih jenis mangga (temu mangga/*Curcuma mangga* Val) (Policegourda dkk. (2011))

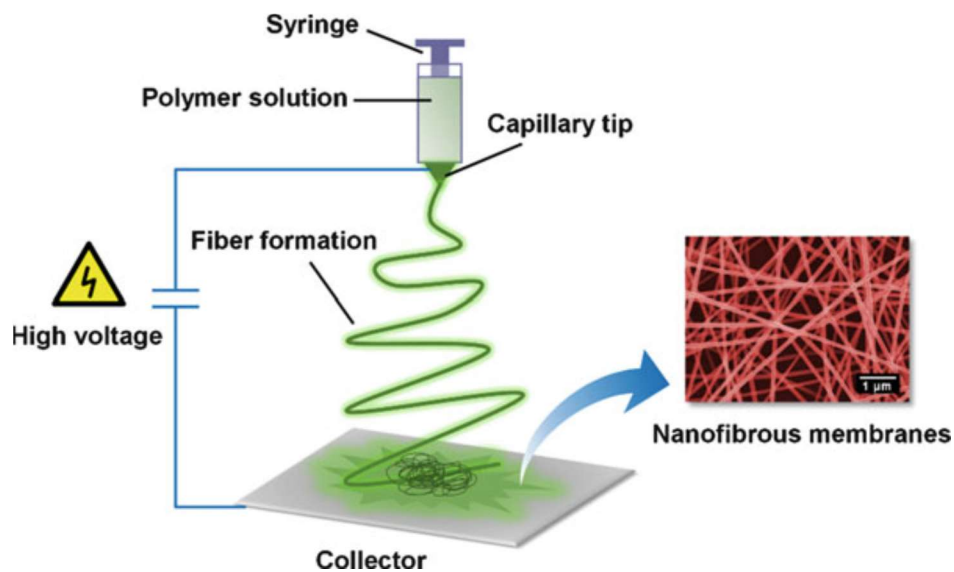
Senyawa *cis* dan *trans-hydroocimene*, *ocimene* dan *myrcene* ditemukan menjadi senyawa utama yang hadir dalam minyak astiri *C. Amada* yang menunjukkan bahwa aroma mangga adalah campuran karakteristik dari senyawa yang ditemukan pada buah mangga dan kunyit (Rao dkk., 1989). Ekstrak aseton mangga terdiri dari minyak tidak berwarna, kurkumin, fitosterol, dan minyak yang mengandung *Azulenogenic pinene*, *kamper*, *curcumene* dan *ar-tumeron* (Jain dan Mirsha, 1964). Ada lebih dari 100 fitokimia yang dilaporkan dari ekstrak segar dan kering dari *C. Amada* yang diteliti oleh Jatoi dkk. (2007).

#### 2.2.4 Elektrospinning

Proses elektrospinning dipatenkan oleh Fornhals pada tahun 1934 berawal dari eksperimen yang bertujuan untuk membuat filamen polimer menggunakan gaya elektrostatis. Ketika eksperimen digunakan untuk membentuk fiber, prosesnya dinamakan elektrospinning. Dengan kata lain, elektrospinning merupakan proses untuk menghasilkan nanofiber melalui jet muatan listrik dari larutan polimer. Proses elektrospinning merupakan bentuk paling sederhana yang terdiri atas pemberi tegangan DC dengan rentang kV. Polimer dijatuhkan dari ujung jarum *syringe* dan membentuk fiber karena adanya tegangan yang tinggi. Jet polimer dimuati listrik dan muatan tersebut menyebabkan fiber berikatan seperti berputar, lalu diameter susut mengecil. Fiber terkumpul dipermukaan kolektor (Ramakhrisna dkk, 2007)

Peralatan elektrospinning terdiri dari tiga komponen utama : sumber tegangan tinggi, tip kapiler dari logam, dan kolektor. Ilustrasi skema dari peralatan dasar elektrospinning ditunjukkan pada Gambar 3.6 *syringe* berisi larutan polimer, tegangan tinggi (biasanya 10-50kV) yang dikenakan pada jarum *syringe* dan kolektor, kemudian larutan akan dialirkan dengan bantuan pendorong syringe dan bisa diatur kecepatan pendorongnya. Pada dasarnya proses elektrospinning berbeda dengan teknik spinning yang lain karena gaya ekstruksi dihasilkan oleh interaksi larutan polimer dan medan listrik eksternal yang dikenakan. Ketika tegangan tinggi dikenakan larutan menjadi bermuatan banyak dan hasilnya droplet dari larutan pada ujung jarum akan melewati dua aya utama, yaitu gaya elektrostatis repulsif dan tegangan permukaan. Pada interaksi elektrostatis ini, larutan berbentuk kerucut diujung jarum dinamakan *Taylor cone*. Pada tegangan kritis, gaya repulsif dari polimer bermuatan akan melewati tegangan permukaan yang dimiliki larutan dan jet bermuatan akan keluar dari *Taylor cone* pada ujung jarum, kemudian bergerak ke arah elektroda yang sebaliknya dan menjadi lebih tipis saat proses tersebut berlangsung. Pada saat menuju elektroda yang sebaliknya, pelarut akan menguap dan fiber padat dengan diameter mikrometer hingga nanometer akan terbentuk (Editor dan Lockwood, 2014)

Elektrospinning merupakan proses yang mudah, murah dan dapat menghasilkan nanofiber kontinyu melalui jet larutan polimer yang bermuatan listrik. Walaupun peralatan elektrospinning sangatlah sederhana, tetapi konsep fisika dibelakangnya sangatlah kompleks dan sangat baru bagi komunitas sains, meliputi pengetahuan tentang statistik listrik, rheologi dari cairan dan sifat dari larutan polimer. Pada masa sebelumnya, bentuk fiber ultra-tipis hasil elektrospinning sering dianggap berasal dari pemecahan dan pelebaran jet yang termuati sebagai hasil dari repulsi antara muatan permukaan. Beberapa pengamatan eksperimen mengindikasikan bahwa proses pembentukan fiber dipengaruhi oleh interaksi beberapa proses ketidakstabilan fisik pada medan listrik. Sekarang ini, teori tentang elektrospinning dengan mengamati fenomena saat pembentukan fiber terbagi menjadi beberapa bagian, yaitu : *droplet* cairan karena tegangan tinggi, teori *Taylor Cone*, dan teori ketidakstabilan perjalanan jet (Editor dan Lockwood, 2014).

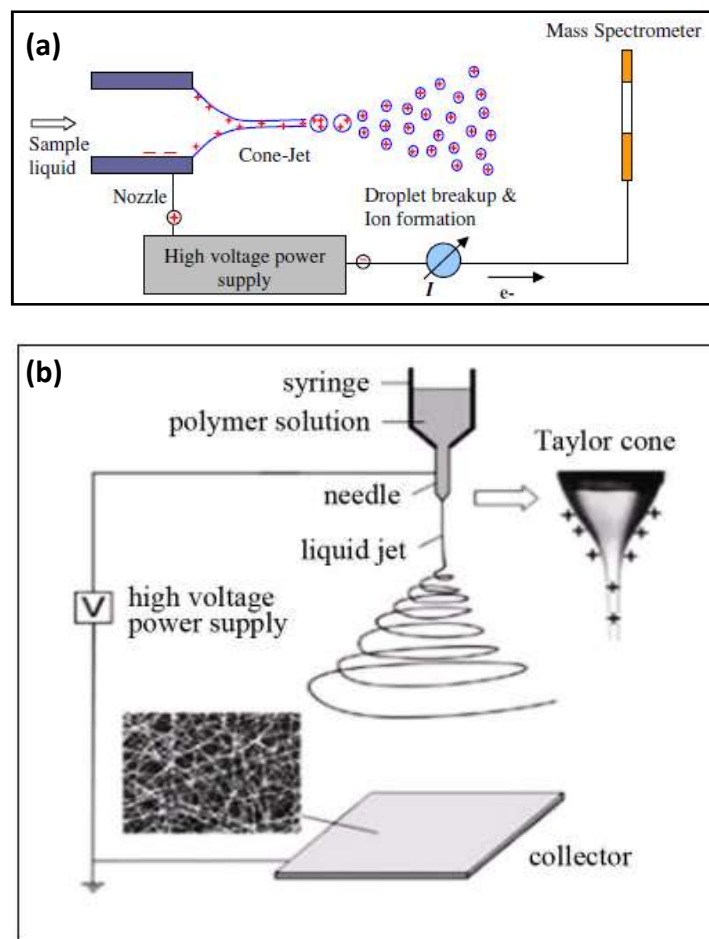


Gambar 2.5 Skema elektrospinning (Editor dan Lockwood, 2014)

#### a. Metode elektrospinning

Elektrospinning adalah salah satu contoh fenomena elektrohodinamika. Dalam elektrohodinamika, suatu muatan listrik akan dapat mengakibatkan pergerakan suatu fluida ketika dikenai medan listrik. Proses elektrospinning memiliki banyak kesamaan dengan electrospraying. Perbedaan kedua proses

tersebut hanya terletak pada produk akhir yang dihasilkan. Dalam elektrospraying, partikel-partikel atau struktur *bead* akan dihasilkan, sedangkan dalam electrospinning menghasilkan nanofiber yang koontinyu (Gambar 2.6) Terbentuknya *bead* maupun nanofiber tergantung apakah medan listrik yang diterapkan mampu mengimbangi tegangan permukaan larutan.



**Gambar 2.6.** a) Fenomena elektrospraying yang menghasilkan struktur *bead* atau partikel (Sen *et al.*, 2006), b) Fenomena electrospinning dengan hasil akhir berupa nanofiber (Li dan Xia, 2004)

Dalam metode electrospinning, tegangan tinggi pada rentang tertentu diterapkan di antara dua buah elektroda untuk memperoleh jenis dan kualitas nanofiber yang diinginkan. Satu elektroda dibuat bersentuhan dengan cairan polimer untuk menghasilkan cairan yang bermuatan ketika dikenai medan listrik luar dan elektroda lainnya bertindak sebagai kolektor. Untuk mendapatkan nanofiber, proses electrospinning harus diawali dengan terbentuknya , tegangan tinggi pada

rentang tertentu diterapkan di antara dua buah elektroda untuk memperoleh jenis dan kualitas nanofiber yang diinginkan. Satu elektroda dibuat bersentuhan dengan cairan polimer untuk menghasilkan cairan yang bermuatan ketika dikenai medan listrik luar dan elektroda lainnya bertindak sebagai kolektor. Untuk mendapatkan nanofiber, proses elektrospinning harus diawali dengan terbentuknya *Taylor cone* (cairan berbentuk seperti kerucut diujung spinneret). Medan listrik yang mengenai *Taylor cone* harus mampu mengimbangi tegangan permukaan larutan. Ketika medan listrik dinaikan lagi, formasi jet akan keluar dari ujung *Taylor cone*. Jet polimer akan mengalami gangguan sehingga terjadi *bending* dan dilanjutkan dengan terbentuknya lintasan spiral hingga akhirnya nanofiber terkumpul di kolektor dalam bentuk solid.

Dalam elektrospinning, larutan polimer akan mengalami beberapa ketidakstabilan. Ketidakstabilan ini mempengaruhi ukuran dan geometri nanofiber yang dihasilkan. Ketidakstabilan yang pertama, yang juga dikenal sebagai ketidakstabilan *Rayleigh* merupakan ketidakstabilan asimetrik dan terjadi ketika kuat medan listrik yang dipakai rendah atau ketika viskositas larutan berada dibawah nilai optimum. Penggunaan larutan dengan viskositas yang rendah menyebabkan jet terputus dan berubah menjadi *bead* pada morfologi nanofiber. Hal ini disebabkan oleh rendahnya densitas rantai yang bertautan (*entanglement*) pada larutan dan tidak cukup mampu menahan gaya dari medan listrik yang diberikan. Ketidakstabilan *Rayleigh* dapat teratasi ketika medan listrik yang digunakan lebih tinggi (densitas muatan yang lebih tinggi) atau dengan membuat konsentrasi yang tinggi pada larutan polimer.

Jet polimer yang baru saja terbentuk dan dikontrol oleh ketidakstabilan *Rayleigh* akan bergerak lurus. Jet ini selanjutnya dipengaruhi oleh dua ketidakstabilan lainnya, yakni ketidakstabilan *bending* dan *whipping*. Kedua ketidakstabilan ini muncul akibat adanya interaksi tolak-menolak antara muatan *excess* yang terdapat di dalam jet, sehingga memicu terjadinya penipisan (*thinning*) dan pemanjangan (*elongation*) jet. Pada medan listrik yang tinggi, jet didominasi oleh ketidakstabilan *bending (axisymmetric)*, yang menyebabkan pergerakan jet seolah-olah seperti membentuk suatu kerucut. Pada medan listrik yang tinggi dan

terdapat densitas muatan yang cukup pada jet, ketidakstabilan *axisymmetric* (*Rayleigh* dan *bending*) akan menurun, sementara ketidakstabilan non-aksisimetrik akan meningkat. Ketidakstabilan *whipping* menghasilkan derajat elongasi jet yang tinggi. Selama proses ini berlangsung, pelarut akan menguap dan akhirnya terdeposit sebagai nanofiber pada elektroda kolektor.

### b. Teori elektrospinning

Beberapa model telah dikembangkan untuk memahami secara detail mengenai fenomena elektrohodinamika, baik dalam elektrospinning maupun elektrospaying. Karena proses yang terjadi pada elektrospinning dan elektrospaying memiliki banyak kesamaan, maka beberapa teori pada elektrospaying seharusnya dapat dipakai untuk menjelaskan proses elektrospinning.

Dalam fenomena elektrohodinamika, persamaan Navier-Stokes dan persamaan-persamaan Maxwell seringkali dikombinasi untuk mengetahui bagaimana gerak fluida dan fenomena elektromagnetik yang ada di dalamnya. Karena konduktivitas listrik larutan yang sangat kecil, maka efek magnetik dalam persamaan Maxwell dapat diabaikan.

Persamaan yang menjelaskan proses terjadinya elektrospinning diawali dari hukum kelestarian momentum linier. Penerapan hukum kelestarian momentum linier mampu menghubungkan antara elektrodinamika dan mekanika yang merupakan dasar dari mekanisme elektrospinning. Salah satu persamaan hukum kelestarian momentum adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes yang menggambarkan keseimbangan momentum dari suatu benda dapat dituliskan dalam bentuk

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan  $p$  adalah tekanan fluida,  $\rho$  adalah massa jenis,  $\eta$  viskositas,  $g$  percepatan gravitasi dan  $\mathbf{u}$  adalah medan kecepatan. Jika momentum listrik dan gravitasi diikutsertakan, persamaan tersebut dapat ditulis,

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \nabla \cdot (\mathbf{T}^m + \mathbf{T}^e) \rho \mathbf{g} \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan momentum mekanik diekspresikan sebagai gradien dari tensor stress mekanik fluida  $\mathbf{T}^m$ , dan diberikan oleh,

$$\nabla \cdot \mathbf{T}^m = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} \dots \dots \dots (2.3)$$

Sementara itu, tensor stress listrik  $\mathbf{T}^e$  didefinisikan oleh,

$$\nabla \cdot \mathbf{T}^e = q\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \nabla p_{st} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan  $E$  adalah medan listrik,  $q$  muatan listrik,  $\varepsilon$  permivitas bahan dan  $p_{st}$  merupakan tekanan elektrostriktif. Suku pertama dalam persamaan tersebut dikenal sebagai gaya Coloumb, yakni gaya elektrodinamika yang terkuat dan merupakan gaya per satuan volume pada medium yang mengandung muatan listrik bebas. Suku kedua, disebut gaya dielektroforesis, yang muncul sebagai akibat dari gaya yang bekerja karena medan listrik yang terdapat pada fluida dielektrik yang tidak homogen. Suku ketiga merupakan gaya elektrostriktif yang merepresentasikan densitas gaya elektromekanik karena ketidakseragaman medan listrik. Sehingga persamaan kelestarian momentum secara keseluruhan menjadi,

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + q\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left( \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_T} E^2 \right) + \rho \mathbf{g} \dots \dots (2.5)$$

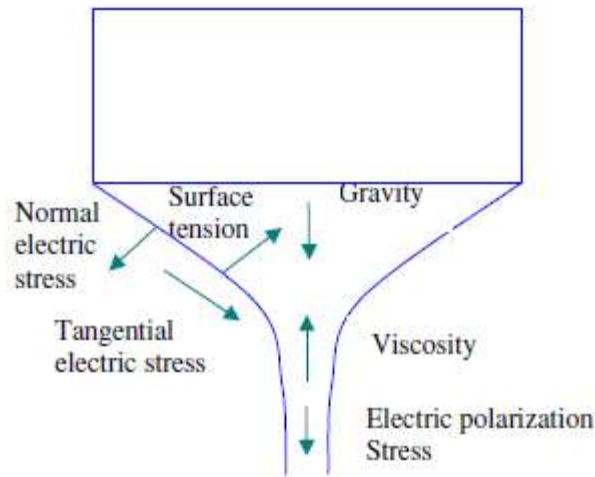
Dalam medium isotropik, sifat fluidanya inkompresibel, besaran permitivitas tidak memiliki gradien, sehingga gaya dielektroforesis bernilai nol. Untuk medan listrik yang seragam, gaya elektrostriktif juga menjadi nol, sehingga didapatkan persamaan

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + q\mathbf{E} + \rho \mathbf{g} \dots \dots \dots (2.6)$$

Pada fluida yang konduktif, muatan – muatan listrik dan gaya listrik akan terkonsentrasi pada batas permukaan. Ini berarti bahwa densitas muatan permukaan akan tersebar disepanjang wilayah antarmuka, sehingga menjadikan gaya Couloumb mampu mendeformasi cairan (Lastow dan Balachandran, 2006)

Telah diketahui bahwa dalam elektrospinning, pembentukan formasi *Taylor cone* memiliki peran yang penting dalam menginisiasi terbentuknya nanofiber. Tanpa kehadiran medan listrik eksternal, larutan polimer yang keluar dari ujung spinneret akan menetes dan tidak bisa melanjutkan proses berikutnya untuk membentuk nanofiber. Akan tetapi, ketika meda listrik luar diberikan, larutan diujung spinneret yang awalnya berbentuk bola akan berubah menjadi kerucut.

Mekanisme perubahan bentuk formasi larutan diperhatikan pada Gambar 2.7 Beberapa gaya yang bekerja pada larutan yang berada diujung spineret adalah gaya gravitasi bumi, tegangan permukaan, gaya viskus, dan beberapa stress listrik.



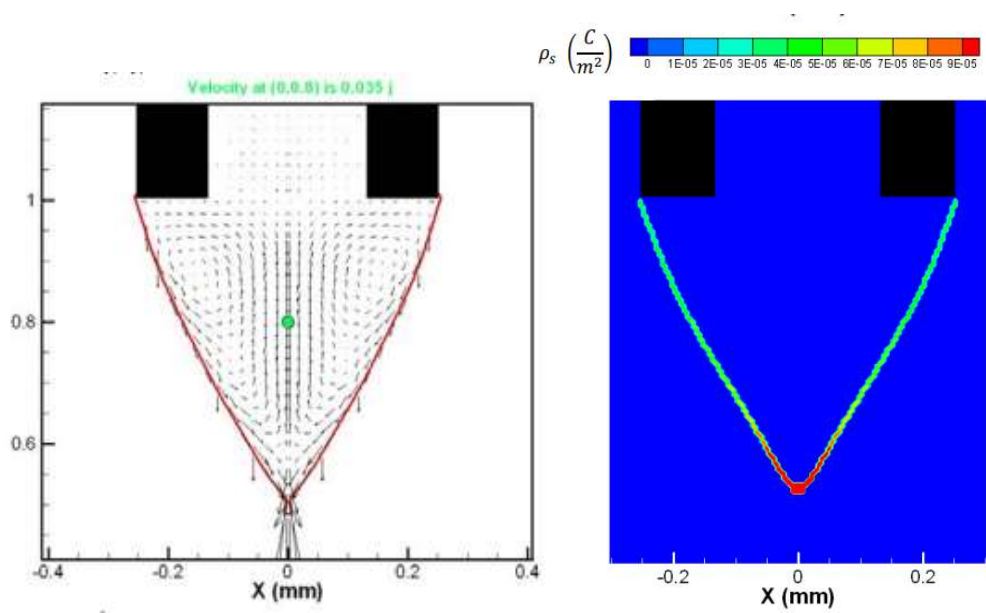
**Gambar 2.7** Gaya-Gaya yang bekerja pada *Taylor cone* (Sen *et al.*, 2006)

Pemberian medan listrik luar  $E$  pada arah sumbu- $z$  akan menginduksi munculnya arus  $\mathbf{j}(E)$  yang mematuhi hukum Ohm, yakni

$$\mathbf{J} = K\mathbf{E} \dots \dots \dots (2.7)$$

Komponen normal pada arus ini bertanggung jawab atas generasi muatan di permukaan (Subbotin *et al.*, 2013). Akumulasi densitas muatan permukaan (antar muka larutan polimer dan udara) akan memicu munculnya medan listrik pada arah normal permukaan dan menghasilkan adanya stress pada arah normal dan tangensial dari permukaan (Sen *et al.*, 2006). Stress listrik pada arah tangensial selanjutnya menggerakkan muatan-muatan ke ujung meniskus dan mengubah bentuk formasi larutan menjadi *Taylor cone*. Sebagian besar muatan akan terkumpul di ujung *Taylor cone* dan sebagian lagi kembali sehingga membentuk *vortex* (Gambar 2.15)





**Gambar 2.8** a) Pergerakan muatan di dalam *Taylor cone*, b) Distribusi muatan di dalam *Taylor cone* (Fardet *et al.*, 2010)

Densitas muatan yang lebih besar diujung *Taylor cone* menyebabkan munculnya gaya tolak Coulomb antar muatan-muatan yang mampu melepas cairan polimer dan melahirkan formasi jet.

Adanya transisi antara *Taylor cone* dan formasi jet membuat proses elektrospinning dibagi ke dalam dua bagian, yakni konduktif dan konvektif. Bagian konduktif berada pada wilayah yang berdekatan dengan *nozzle*  $z < 0$ , sedangkan bagian konvektif berada pada  $z > 0$ , dimana  $z$  adalah panjang jet. Oleh karena itu, total arus pada elektrospinning merupakan kontribusi dari arus yang berada di kedua wilayah tersebut dan diberikan oleh,

$$I = I_{kon} + I_{konv} = \pi r^2 K E_z + 2\pi r \sigma v_z \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan  $I_{kon}$  dan  $I_{konv}$  berturut-turut merupakan arus konduksi dan konveksi  $r$  adalah radius jet,  $E_z$  medan listrik di permukaan yang searah sumbu  $-z$ ,  $v_z$  kecepatan jet pada arah  $-z$ , dan  $\sigma$  adalah densitas muatan permukaan. Arus listrik pada bagian konduktif sangat ditentukan oleh konduktivitas, sedangkan arus di bagian konvektif ditentukan oleh arus konveksi. Pada  $z = 0$  kedua arus tersebut memiliki besar yang sama (Subbotin *et al.*, 2013).

### **c. Proses Elektrospinning**

Parameter yang paling mempengaruhi proses electrospinning dapat dibagi menjadi 3 (tiga) kategori yaitu karakteristik larutan (viskositas, konsentrasi, sifat molekul zat, konstanta dielektrik, dan tegangan permukaan larutan) variable kontrol proses electrospinning, dan faktor lingkungan Haitao *et al.* (2011).

Beberapa sifat larutan memiliki pengaruh berbeda dalam proses *electrospinning*. Salah satu faktor yang paling mempengaruhi terbentuknya jet stream yaitu homogenitas larutan. Keseragaman larutan mempengaruhi interaksi dielektrik terutama pada permukaan ujung tip. Semakin homogen sebuah larutan maka akan mengurangi peluang terjadinya interaksi antara pelarut dengan polimer (Thompson *et al.*, 2007).

Variable control proses electrospinning meliputi tegangan listrik, laju aliran larutan, dan TCD (*Tip to Collector Distance*). Semakin besar TCD akan mengakibatkan waktu penguapan larutan semakin lama sehingga didapatkan diameter serat yang lebih kecil. Diameter serat juga dipengaruhi tegangan listrik yang dikenakan. Semakin tinggi tegangan listrik, beda potensial tegangan akan semakin besar pula. Hal tersebut akan mengakibatkan penurunan diameter serat karena regangan yang semakin besar (Thompson *et al.*, 2007).

### **d. Parameter parameter proses elektrospinning**

Untuk mendapatkan nanofiber dengan morfologi yang diinginkan melalui elektrospinning ada beberapa parameter yang harus diperhatikan. Parameter tersebut antara lain parameter larutan, parameter mesin *electrospinning*, dan parameter lingkungan. Parameter larutan diantaranya konsentrasi larutan, viskositas, konduktivitas. Parameter mesin *electrospinning* antara lain kuat medan listrik antara tip kolektor, jarak penjepit ujung jarum *syringe* dan *feed rate*. Parameter lainnya yakni berasal dari lingkungan berupa suhu, kelembaban, dan komposisi udara. Dengan mengontrol parameter-parameter tersebut dalam berbagai variasi, nanofiber yang dihasilkan akan memiliki berbagai bentuk struktur, yakni bentuk tak beraturan (*non woven*), tiga dimensi (*3D scaffold*), koaksial, dan benang (*yarn*) (Mu'min.,2014).

### **i. Konsentrasi larutan polimer**

Perbedaan konsentrasi larutan yang akan menghasilkan bentuk morfologi nanofiber yang berbeda-beda. Nanofiber yang dibuat dari PEO pada konsentrasi 5% terbentuk *bead-fiber* sementara pada konsentrasi 6.5% dan 8% mengalami pembentukan nanofiber tanpa *bead* yang memiliki panjang seragam (Gou-en *et al.*, 2010). Konsentrasi dapat diubah-ubah dengan mengatur porsi pelarut dalam larutan. Untuk pembuatan nanofier, konsentrasi polimer yang dibutuhkan harus pas, tidak terlalu tinggi dan juga tudaj terlalu rendah. Diameter fiber akan meningkat dengan meningkatnya nilai konsentrasi larutan. Ditambah lagi, konsentrasi yang terlalu tinggi menyebabkan proses elektrospinning menjadi sulit dilakukan, dan medan listrik yang tinggi diperlukan untuk mengimbangi gaya-gaya viskoelastik, dan berpotensi memunculkan *bead*.

Pada umumnya, berat molekul mempengaruhi viskositas larutan dan ketika polimer dengan berat molekul yang lebih kecul dilarutkan ke dalam pelarut maka viskositasnya akan lebih rendah dibandingkan polimer dengan berat molekul yang lebih tinggi. Kondisi yang sangat penting untuk proses elektrospinning agar membentuk fiber ialah polimer yang dipakai harus mempunyai berat molekul yang cukup da larutan harus memiliki viskositas yang sesuai. Selama elektrospinning berlangsung ketika jet polimer meninggalkan jarum, larutan polimer memanjang menuju dan mengendap di plat kolektor. Peningkatan konsentrasi polimer mengarahkan pada peningkatan viskositas dari larutan polimer, peningkatan konsentrasi larutan akan mengakibatkan ikatan rantai polimer yang lebih kuat sehingga sangat penting untuk menjaga kontiunitas dari jet saat elektrospinning. Terlebih lagi ikatan dari polimer mempunyai dampak yang signifikan terhadap *bead-fiber* atau fiber dengan *droplets* kecil. Disamping itu, peningkatan viskositas larutan polimer pada nilai yang sangat tinggi akan menyebabkan sulit untuk mendorong larutan di dalam jarum sehingga larutan akan mengering diujung jarum sebelum proses elektrospinning berlangsung (Kwankhao, 2013).

## ii. Dielektrik pelarut

Konstanta dielektrik dari pelarut memberikan dampak yang signifikan pada proses elektrospinning. Secara umum, sebuah larutan yang memiliki konstanta dielektrik yang lebih tinggi akan mengurangi terbentuknya beaads dan juga mengurangi ukuran diameter dari serat yang terbentuk. Ketidakstabilan ikatan pada elektrospinning jet juga meningkat seiring dengan peningkatan konstanta dielektrik. Hal itu juga dapat membantu dalam usaha untuk mengurangi ukuran diameter serat karena peningkatan jet path. Jika pelarut yang memiliki konstanta dielektrik yang lebih tinggi ditambahkan ke dalam sebuah larutan untuk meningkatkan electrospinnabiity dari sebuah larutan, interaksi antara campuran seperti solubility dari polimer pun akan memberikan dampak pada sifat morfologis dari serat yang terbentuk. Jika pelarut yang memiliki konstanta dielektrik yang lebih tinggi ditambahkan ke dalam sebuah larutan, interaksi antara campuran seperti solubility dari polimer pun akan memberikan dampak pada sifat morfologis dari serat yang terbentuk.

## iii. Viskositas

Viskositas larutan sebenarnya dapat berubah dengan cara mengatur konsentrasi larutan. Semakin tinggi konsentrasi larutan, viskositas larutan juga akan semakin tinggi. Seperti halnya konsentrasi larutan, viskositas larutan juga merupakan parameter yang sangat menentukan morfologi dan ukuran diameter nanofiber. Pada viskositas yang rendah, proses elektrospinning akan condong menghasilkan *bead* dari nanofiber. Peningkatan viskositas dengan cara meningkatkan konsentrasi larutan bisa memperbaiki kualitas hasil elektrospinning yang awalnya berupa *bead* berubah menjadi nanofiber. Semakin kental larutan polimer, diameter nanofiber yang dihasilkan semakin besar. Namun, viskositas yang terlalu tinggi menyebabkan tidak terbentuknya formasi jet dan mengarah pada terbentuknya formasi jet dan mengarah pada terbentuknya tetesan-tetesan di ujung spinneret, sehingga mempersulit jalannya proses elektrospinning.

Viskositas larutan berhubungan dengan tingkat ikatan rantai molekul polimer dalam larutan. Ketika viskositas sebuah larutan rendah, electrospaying muncul dan

terbentuklah partikel polimer bukan fiber. Pada keadaan viskositas rendah dimana secara umum ikatan rantai antar polimer rendah akan muncul kecenderungan terbentuknya beads dari pada serat yang halus. Ketika sebuah polimer yang memiliki berat molekul yang tinggi dilarutkan dalam pelarut, viskositasnya akan lebih besar jika dibandingkan dengan polimer yang sama namun memiliki berat molekul yang lebih rendah.

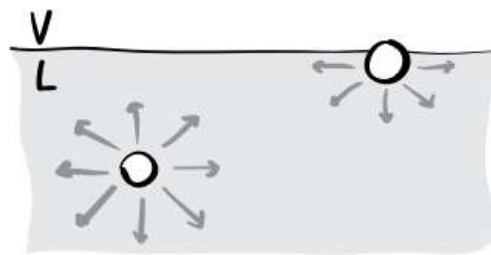
Berat molekul dari sebuah polimer menggambarkan panjang dari sebuah rantai polimer. Hal tersebut memberikan dampak pada viskositas karena panjang polimer akan mengakibatkan jumlah jeratan rantai polimer dalam pelarut. Cara lain untuk meningkatkan viskositas larutan adalah dengan memperbesar konsentrasi dari larutan. Meskipun viskositas memiliki peran penting dalam pembentukan serat yang halus, namun hal tersebut tidak menentukan pada konsentrasi berapa sebuah serat dapat terbentuk dalam proses elektrospinning (Ramakrishna, dkk., 2005)40

#### **iv. Tegangan Permukaan**

Saat proses elektrospinning, muatan pada larutan polimer harus cukup tinggi untuk melewati nilai tegangan permukaan dari larutan. Saat jet dari larutan mengalami percepatan dari ujung jarum kolektor, larutan memanjang sementara tegangan permukaan yang rendah dan biasanya ditambahkan agar membentuk fiber yang baik. Cara lain adalah menambahkan surfaktan yang berbentuk serbuk ke dalam larutan polimer. Larutan polimer yang telah ditambahkan surfaktan akan menghasilkan nanofiber yang lebih seragam dan diameter fiber akan lebih baik (Kwankhao, 2013)

Tegangan permukaan (*surface tension*) digambarkan sebagai gaya tarik-menarik antara molekul-molekul di permukaan dari suatu cairan. Di lokasi bagian dalam dan jauh dari permukaan cairan, semua molekul-molekul ditarik oleh molekul-molekul tetangga yang ada disekitarnya dengan besar gaya yang sama seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.4. Karena molekul cairan mengalami tarik-menarik antara satu dengan yang lainnya, maka terdapat gaya total yang besarnya nol pada molekul yang berada di dalam cairan. Namun, di bagian permukaan, molekul-molekul ditarik ke arah dalam dengan suatu gaya yang lebih

besar daripada tarik menarik yang dilakukan oleh molekul-molekul pada medium di sekitarnya, yakni apakah medium itu suatu gas ataupun cairan yang *immiscible*. Sebagai akibatnya, permukaan akan condong untuk membentuk suatu luas permukaan yang minimal dengan menyusut sekuat mungkin. Hal ini yang menyebabkan lapisan cairan pada permukaan seolah-olah tertutup oleh selaput elastis yang tipis.



**Gambar 2.9** Gaya tarik-menarik yang dialami molekul yang terdapat di bagian dalam dan permukaan larutan (Marchand et al., 2011)

Tegangan permukaan merupakan salah satu parameter yang sangat penting dalam proses elektrospinning. Dalam proses elektrospinning, muatan-muatan listrik di dalam larutan polimer harus cukup tinggi untuk mengatasi tegangan permukaan larutan. Ketika jet larutan mengalami percepatan dari tip menuju kolektor, larutan akan diregangkan, sementara tegangan permukaan menyebabkan larutan berubah menjadi bentuk tetesan (Ramakrishna *et al* ,2005)

#### v. Konduktivitas Larutan Polimer

Konduktivitas dari larutan polimer akan menentukan kapasitas muatan pembawa pada jet, sehingga mempengaruhi gaya tensile pada jet oleh medan listrik. Tegangan yang lebih tinggi, pada umumnya menghasilkan diameter fiber yang lebih kecil. Peningkatan jumlah muatan akan memberikan gaya pada jet untuk memanjang sebagai akibat dari replusif coulomb. Gaya ini berlaku berlawanan dengan tegangan permukaan menahan ketidakstabilan Rayleigh dan kemudian menghasilkan fiber-*non beads* . Penambahan garam pada larutan yang akan di elektrospinning menciptakan perpindahan ion pada larutan dan perpindahan

muatan. Hal ini merupakan kelebihan dari larutan polimer dengan konduktivitas yang lebih besar (Kwankhao,2013)

Diameter fiber menurun seiring dengan naiknya nilai konduktivitas larutan, dan memiliki hubungan dalam bentuk persamaan pangkat (*power law relationship*). Ini disebabkan oleh distribusi muatan permukaan disekitar jet dan variasi dalam medan listrik tangensial disepanjang permukaan cairan. Larutan polimer yang memiliki konduktivitas yang sangat rendah dapat dilakukan proses elektrospinning karena tidak adanya muatan permukaan pada permukaan jatuhnya cairan untuk membentuk formasi *Taylor cone*. Sedangkan larutan polimer dengan konduktivitas yang sangat tinggi juga tidak akan menyebabkan terbentuknya *Taylor cone* karena berkurangnya medan listrik pada arah tangensial di permukaan dari jatuhnya cairan. Kenaikan konduktivitas juga dapat menghasilkan formasi multijet pada jatuhnya fluida dan bahkan juga mendapatkan adanya tonjolan pada fiber (Angamma dan Jayaram, 2011)

Secara umum konduktivitas dari bahan pelarut sangatlah kecil (pada umumnya berkisar antara  $10^{-3}$  sampai  $10^{-9}$  S/m) disebabkan adanya beberapa ion bebas, yang akan berpengaruh pada konduktivitas listrik dari larutan tersebut. Keberadaan asam, basa dan karbon dioksida yang terkalut dapat meningkatkan konduktivitas dari pelarut. Konduktivitas listrik dari sebuah pelarut dapat ditingkatkan secara signifikan dengan mencampurkan bahan kimia yang tidak bereaksi. Kenaikan dari tegangan larutan juga akan cenderung menghasilkan serat dengan diameter yang lebih kecil (Ramakrishna, et al., 2005)

Penambahan ion dapat meningkatkan konduktivitas larutan, sehingga tegangan kritis untuk elektrospinning dapat menjadi berkurang. Dampak lain dari peningkatan muatan adalah meningkatnya ketidakstabilan ikatan. Sebagai hasil luas area pengendapan dari fiber menjadi meningkat. Larutan yang dibuat menggunakan pelarut yang memiliki konduktivitas lebih tinggi, secara umum menghasilkan serat tanpa *beads*. Sementara itu serat tidak akan terbentuk apabila larutan memiliki konduktivitas nol (Ramakrishna, et al.,2005).

Interaksi antara bahan reaksi yang ditambahkan untuk meningkatkan konduktivitas dari larutan dan larutan asal juga dapat memberikan dampak yang

signifikan pada serat yang dihasilkan. Pada beberapa kasus, penambahan garam ionik dapat menyebabkan peningkatan viskositas larutan. Dengan demikian meskipun konduktivitas dari larutan meningkat, gaya viskositas yang lebih besar dari gaya coulomb justru menyebabkan kenaikan ukuran diameter serat.

#### vi. Tegangan tinggi

Bagian yang sangat penting saat proses elektrospinning yaitu nilai tegangan tinggi yang dikenakan pada larutan. Tegangan tinggi akan menginduksi muatan positif pada larutan dan akan memberikan medan listrik eksternal yang akan memulai proses elektrospinning ketika gaya elektrostatis melewati tegangan permukaan dari larutan. Pada umumnya, tegangan lebih dari 6kV dapat membuat larutan membentuk *taylor cone* saat awal proses elektrospinning. Akan tetapi dampak dari tegangan tinggi yang digunakan ini pada diameter masih belum jelas, karena tegangan yang dibutuhkan sangat bergantung pada parameter larutan polimer (Kwankhao, 2013)

Faktor utama yang harus dilakukan untuk menghasilkan nanofiber yang seragam dan bebas dari *bead* adalah menetapkan kuat medan listrik antara tip-kolektor. Daerah operasi yang stabil untuk pembentukan jet yakni berada diantara 0.9 dan 1.1kV/mm (Angamma and Jayaram, 2012). Jika kuat medan listrik kurang dari 0.9 kV/mm, tetesan polimer akan terbentuk selama proses elektrospinning. Sementara jika kuat medan listrik berada diatas 1.1 kV/mm, formasi *Taylor cone* akan hilang pada ujung jarum. Ini diakibatkan karena jet menjadi tidak stabil, sehingga menghasilkan nanofiber yang tidak seragam. Diameter fiber menurun ketika medan listrik meningkat dan jika terdapat ruang yang cukup bagi *whipping region* sebagaimana diameter fiber berkurang dengan semakin meregangnya jet. *Whipping time* menurun dengan meningkatnya medan listrik, sehingga waktu yang digunakan untuk stretching menjadi berkurang jika jarak tip-kolektor terlalu dekat. Bentuk *bead* pada nanofiber berubah dari bulat menjadi bulat lonjong dengan meningkatnya jarak tip-kolektor dan dengan menggunakan jarum dengan diameter lebih kecil,



### **vii. Penguapan larutan**

Saat proses elektrospinning berlangsung, kebanyakan pelarut menguap sebelum jet berhasil mencapai kolektor, maka kemudian fiber atau nanofiber *webs* terbentuk. Bagaimanapun juga, saat rata-rata penguapan yang sangat rendah menyebabkan fiber tidak terbentuk dari *thin film* terkumpul di kolektor. Akan tetapi, rata-rata penguapan dari pelarut akan bergantung pada beberapa faktor seperti tekanan uap, panas spesifik, tegangan permukaan dari aciran, dan pergerakan udara disekitar permukaann cairan (Kwankhao, 2013)

### **viii. Flow Rate**

Parameter yang penting saat proses elektrospinning adalah *flow rate* polimer dari *syringe* yang mempengaruhi rata-rata perpindahan larutan dan penguapan dari jet (Kwankhao, 2013). *Flow rate* menentukan banyaknya larutan yang dapat dielektrospinning. Saat tegangan tinggi dikenakan, untuk menjaga kestabilan *Taylor cone* akan bergantung pada nilai *flow rate*. Ketika *flow rate* meningkat maka akan menghasilkan diameter fiber yang mengikat ataupun akan berpengaruh pada ukuran *bead* (Editor dan Lockwood, 2014).

Parameter *flow rate* menentukan besarnya jumlah larutan yang akan dielectrospinning. Pada nilai tegangan yang sudah ditetapkan dan *taylor cone* dapat dipertahankan, terdapat suatu kaitan antara feed rate terhadap diameter nanofiber dan *bead* yang terbentuk. Semakin tinggi *flow rate*, ukuran nanofiber dan *bead* akan semakin besar. Hal ini karena adanya volume larutan yang lebih besar terdorong keluar dari ujung spinneret. Bahkan jika *flow rate* terlalu tinggi, maka pelarut akan mengalami waktu evaporasi yang lebih lama dan memberikan pelarut residu pada nanofiber di kolektor. Pelarut residu ini kemudian memungkinkan terjadinya penyatuan antara nanofiber yang satu dengan yang lain dan membentuk formasi berbentuk jaring (*web*) yang saling terhubung.

#### **ix. Jarak ujung jarum ke kolektor (TCD)**

Jarak ujung jarum ke kolektor mempengaruhi struktur dan morfologi dari fiber hasil elektrospinning karena mereka menjadi pelengkap pada waktu desposisi, rata-rata penguapandari larutan polimer dan besarnya medan listrik. Fiber agar dapat terbentuk maka jet elektrospinning harus mempunyai cukup waktu untuk menguapkan pelarut dari larutan polimer. Ketika jarak antara ujung jarum dan kolektor kecil, maka jet mempunyai jarak yang lebih sedikit untuk melakukan perjalanan sebelum mencapai kolektor yang sama halnya seperti peningkatan medan listrik (Kwakhao, 2013)

#### **x. Pengaruh kondisi lingkungan**

Kondisi lingkungan (terutama suhu) selalu berubah terhadap waktu, sehingga dapat menyebabkan bentuk dan kualitas nanofiber yang dihasilkan menjadi tidak konsisten. Dari beberapa penelitian, pengaruh eksternal seperti suhu, kelembaban, dan kandungan dan gerakan udara di atmosfer ikut mempengaruhi proses elektrospinning. Oleh karena itu kondisi lingkungan dimana proses elektrospinning dilakukan perlu diperhatikan atau dikontrol untuk keberhasilan dalam pembuatan nanofiber.

Penelitian yang dilakukan oleh Korkut *et al.*, (2008) menggunakan larutan gliserol, menunjukkan bahwa pada dengan meningkatkan kelembaban dari 25% menuju 70% bisa menurunkan amplitude gangguan pada terbentuknya jet, sehingga diperoleh ukuran jet yang lurus dan lebih panjang. Kehadiran medan listrik yang cukup tinggi pada arah normal terhadap permukaan cairan cukup mampu untuk proses terjadinya ionisasi yang dekat dengan ujung cairan. Di wilayah ini sejumlah elektron dihasilkan dan meninggalkan ion positif ketika bergerak menuju antar muka cairan dengan udara dan menetralkan muatan permukaan pada jet. Penurunan densitas muatan permukaan pada jet dapat mengurangi laju ketidakstabilan dan ionisasi pada daerah dibawahnya. Di sisi lain, penelitian oleh Vrieze *et al.*, (2009) menggunakan polimer *Polyvinylpyrrolidone (PVP)* dengan pelarut etanol menunjukkan bahwa nanofiber tidak dapat terbentuk pada kelembaban 60%. Proses elektrospinning pada kondisi kelembaban tinggi dapat menyebabkan larutan PVP-

etanol menyerap uap air di lingkungan karena tekanan air yang lebih tinggi di atmosfer. Ini menghasilkan deposisi film akibat adanya penggabungan fiber pada kolektor. Dari keseluruhan eksperimennya disimpulkan bahwa kelembaban relative dapat menjadikan diameter nanofiber lebih kecil atau lebih besar tergantung sifat kimiawi polimer yang digunakan.

Perubahan temperatur dalam proses elektrospinning akan berpengaruh pada proses laju penguapan pelarut dan viskositas larutan (Vrieze *et al.*, 2009) Peningkatan suhu menyebabkan menurunnya viskositas dan tegangan permukaan larutan, serta meningkatkan konduktivitas larutan. Adanya perubahan sifat larutan dengan pola seperti ini akan dapat mengurangi diameter nanofiber (Wang *et al.*, 2007)

Proses elektrospinning juga dapat dibuat dalam kondisi atmosfer yang beraneka ragam. Elektrospinning yang dilakukan dalam ruang vakum memiliki pengaruh yang signifikan pada proses laju pematatan fiber ke kolektor, Proses evaporasi pelarut dalam vakum akan berjalan dengan cepat karena titik didih cairan sebanding dengan tekanan atmosfer. Elektrospinning dalam ruangan tertutup dapat mengarah pada sifat fiber yang tidak konsisten pada periode waktu yang lama karena pengaruh laju penguapan pelarut. Kondisi ruangan yang tertutup dapat membuat pelarut yang menguap semakin lama akan semakin jenuh, padahal dalam proses elektrospinning gas dalam bentuk udara kering (*dry gas*) diperlukan untuk mempertahankan konsentrasi pelarut di atmosfer (Bosworth dan Downes, 2011). Kondisi atmosfer lainnya dapat dibuat dengan mengalirkan udara didekat tempat berlangsungnya elektrospinning. Kondisi atmosfer lainnya dapat dibuat dengan mengalirkan udara didekat tempat berlangsungnya elektrospinning. Kondisi ini dipakai ketika melakukan proses elektrospinning. Kondisi ini dipakai ketika melakukan proses elektrospinning pada larutan dengan konsentrasi yang rendah namun memiliki viskositas dan tegangan permukaan yang sangat tinggi. Dalam proses ini udara mengalir secara paralel terhadap gerakan jet dan diatur agar aliran udara mengitari jet polimer (Um *et al.*, 2004)

#### xi. Kelembaban dan suhu

Kelembaban dari lingkungan saat proses elektrospinning memiliki pengaruh pada larutan polimer. Pada kelembaban yang tinggi menyebabkan lebih banyak molekul air antara ujung jarum dan kolektor. Molekul ini akan meningkatkan konduktivitas pada daerah tersebut, kemudian mengubah karakteristik dari besarnya meda listrik pada proses elektrospinning karena polarisasi dari molekul air. Ketika fiber dari hasil elektrospinning menjadi tebal diameternya karena polariasai dari molekul air. Ketika fiber dari hasil elektrospinning menjadi tebal diameternya karena kehilangan kekuatan medan listrik dan gaya lebih kecil oada kemebaban yang lebih tinggi (Kwankhao, 2013). Suhu larutan akan memiliki dua dampak yaitu menurunnya *evaporation rate* dan berkurangnya viskositas larutan. Larutan polimer dapat melalui proses elektrospinning pada suhu ruang dengan mudah. Saat substansi biologi seperti enzim dan protein yang ditambahkan pada larutan, jika menggunakan suhu terlalu tinggi akan merusak fungsi dari fiber (Editor dan Lockwood, 2014) Pada Tabel 2.2 terlihat pengaruh parameter larutan terhadap fiber hasil elektrospinning.

**Tabel 2.2** Pengaruh parameter terhadap fiber

| Parameter                        | Morfologi Fiber  |
|----------------------------------|--|
| Viskositas (larutan polimer) [↑] | Diameter fiber [↑](fiber dengan <i>beads</i> hingga fiber halus) |
| Tegangan Permukaan [↑]           | Jumlah fiber dengan <i>beads</i> [↑]                             |
| Konduktivitas larutan [↑]        | Diameter fiber [↓]   |
| Penguapan pelarut [↑]            | Fiber memiliki mikrotekstur (pori pada permukaan fiber)          |
| Tegangan [↑]                     | Diameter fiber tidak menentu [↑] kemudian [↓]                    |
| Jarak jarum ke kolektor [↑]      | Diameter fiber [↑]   |
| Kelembaban [↑]                   | Diamater fiber tidak tentu [↓] kemudian [↑]                      |
| <i>Flow Rate</i> [↑]             | Diameter fiber [↑]   |

## 2.2.5 Pengendalian parameter-parameter larutan

### a. Pengukuran viskositas

Nilai viskositas dari larutan PVA akan ditentukan menggunakan *viscometer rotational*. Alat ini menggunakan prinsip pengukuran rata-rata rotasi dari rotor solid di dalam medium yang memiliki viskositas. Rotor digerakkan dengan gaya atau torsi yang diketahui pada kecepatan angular tertentu. Kelebihan dari *viscometer rotational* ini dibandingkan *viscometer* lain ialah pengukuran yang stabil, dapat melakukan banyak pengukuran dengan sampel yang sama pada *shear rate* yang berbeda, pengukuran kontinu pada material yang memiliki fungsi terhadap temperatur, dan ketidak pastian yang kecil (Viswanath, 2007)

Ada beberapa jenis *rotational viscometer*, salah satunya ialah *coaxial cylinder viscometer*. Desain dasar dari *viscometer* ini seperti pada Gambar 3.8 terdiri dari rotor silinder  $R_2$ (cm). Rotor silinder dalam keadaan diam dan tempat larutan dirotasikan dengan kecepatan konstan ( $\Omega$  rad/sec). Resultan torsi ( $T$  dyne cm) diukur dari refleksi angular rotor silinder yang terhubung dengan kabel halus. Kecepatan dari wadah larutan dapat divariasikan untuk mendapatkan data perubahan viskositas dari larutan dengan *shear rate*. Viskositas dinamik dari larutan Newtonian akan sesuai dengan persamaan 3.1 (Viswanath, 2007)

$$T = \frac{4\pi h R_1^2 R_2^2 \eta \Omega}{R_2^2 - R_1^2} = C \eta \Omega \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan nilai C merupakan konstanta spesifik dari instrumen. Persamaan 3.1 dapat membuktikan torsi yang dihasilkan dari larutan pada permukaan rotor silinder dan didapatkan nilai viskositas dari hasil pembagian antara torsi dan kecepatan angular. Persamaan ini tidak dapat menunjukkan nilai gaya pada ujung silinder dan menimbulkan ralat pada pengukuran. Jangkauan pengukuran alat ini bergantung pada dimensi dan desain dari silinder. Instrumen akan berfungsi dengan baik pada ruang dengan temperatur konstan atau tempat larutan harus dapat menahan temperatur konstan cukup lama untuk dapat memenuhi syarat eksperimen isothermal. Dengan sedikit perubahan metode, tempat larutan dibuat statis dan yang dirotasikan adalah rotor silinder. Pengukuran ini dilakukan berulang dan didapatkan nilai terkecil sebagai nilai yang digunakan. Ketika rotor silinder keluar dari tengah-

tengah tempat larutan, nilai yang terukur akan lebih besar daripada nilai yang seharusnya. Pengukuran viskositas dari material dengan viskositas tinggi dan temperatur rendah akan lebih sesuai dengan menggunakan metode rotor silinder dirotasikan dan tempat larutan yang statis (Viswanath, 2007)

#### **b. Pengukuran Konduktivitas**

Pengukuran konduktivitas menggunakan 2 elektroda logam, biasanya terbuat dari stainless steel atau titanium yang akan ditempatkan di dalam larutan. Pada gambar 3.5, terlihat tegangan dikenakan pada elektroda. Medan listrik menyebabkan ion-ion untuk bergerak kembali dan seterusnya menghasilkan arus listrik. Muatan yang terbawa ion, maka arus ini disebut arus ionik. Analizer mengukur arus dan menggunakan Hukum Ohm untuk menghitung nilai resistansi dari larutan ( $\text{resistansi} = \text{tegangan}/\text{arus}$ ). Nilai konduktansi dari larutan merupakan kebalikan dari resistansi.

Arus ionik bergantung pada konsentrasi total ion pada larutan dan pada panjang dan luas yang dilewati oleh aliran arus. Arus didefinisikan oleh sensor geometri, atau sel konstan, dengan besaran unit sebesar  $1/\text{cm}$  ( $\text{panjang}/\text{luas}$ ). Perkalian antara konduktansi dengan sel konstan yang digunakan sensor geometri pada pengukuran menghasilkan nilai konduktivitas yang hanya bergantung pada konsentrasi ion.

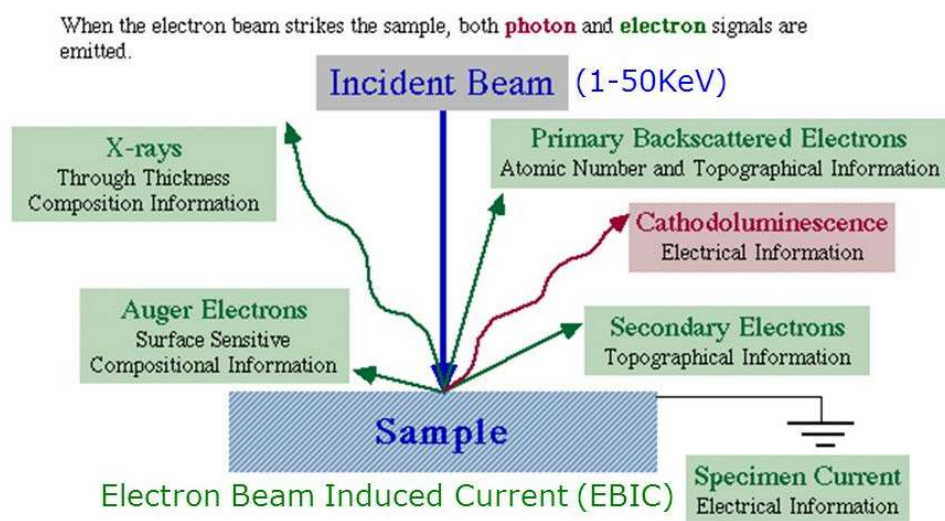
Sel konstan memiliki interpretasi geometri ( $\text{panjang}/\text{luas}$ ), jarang dihitung dari pengukuran dimensinya. Banyak arah dan bentuk medan listrik yang mengalir lebih besar atau tidak sesuai dengan perkiraan panjang dan luas antara 2 elektroda. Pada penerapannya, sel konstan diukur dan dihasilkan nilai konduktivitas. Sel konstan merupakan perbandingan antara konduktivitas ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) dan konduktansi terukur ( $\mu\text{S}$ )

#### **2.2.6 Scanning Electron Microscope (SEM)**

*Scanning electron microscopy* (SEM) merupakan salah satu teknik yang sangat luas digunakan untuk karakterisasi *nanomaterial* dan *nanostructure*. SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan menghitung ukuran dari

suatu nanomaterial. Perbesaran yang dihasilkan oleh SEM dapat diatur mulai dari ~10 hingga 300.000 kali, dengan resolusi yang dihasilkan dapat mencapai ukuran nanometer. Selain menghasilkan informasi topografi dan morfologi dari suatu material, SEM juga mampu menganalisis komposisi kimia dekat permukaan material apabila SEM di-*couple* dengan EDS / EDX (Cao, 2004).

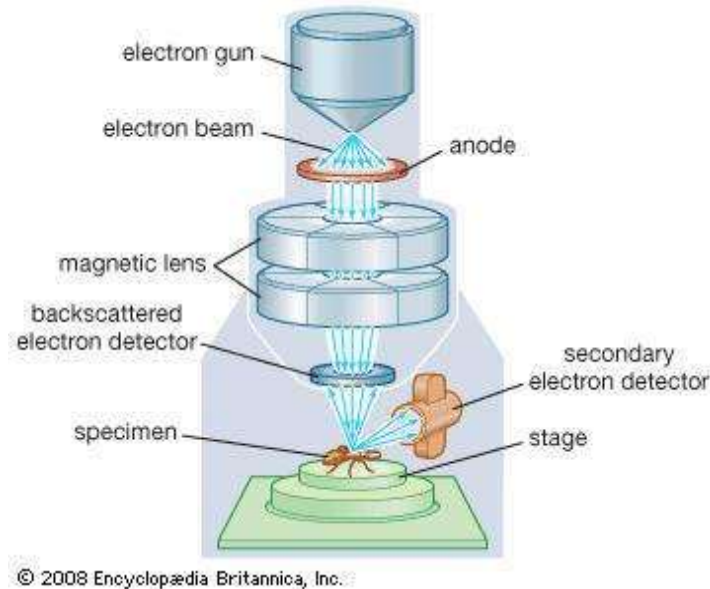
Secara umum prinsip dari SEM yaitu proses pemindaian (scanning) sinar elektron untuk proses pencitraan. Sumber elektron dari SEM difokuskan dalam bentuk berkas dengan ukuran yang sangat kecil (~5nm) dan mempunyai rentang energi muai dari beberapa ratus KeV hingga 50KeV. Untuk mencegah terjadinya pengisian muatan pada sampel, maka perlu dilakukan proses pelapisan (*coating*) sampel dengan logam yang mampu merefleksikan elektron (McMahon, 2007).



**Gambar 2.10** Skema interaksi *incident electron*

Elektron yang ditembakkan akan menumbuk dan menembus permukaan sampel, sehingga terjadi interaksi yang dihasilkan emisi elektron dan foton pada sampel seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 Dalam sistem kerja SEM, elektron primer dengan energi yang sangat besar ditembakkan ke permukaan sampel, sehingga elektrom primer akan berinteraksi dengan atom. Selama interaksi tersebut dihasilkan hamburan elastik jika berinteraksi dengan inti atom. Pada proses tumbukan inelastik dengan elektron atom, elektron primer akan mentransfer

energi ke elektron. Ketika energi yang ditransferkan cukup besar, elektron akan diemisikan oleh sampel.

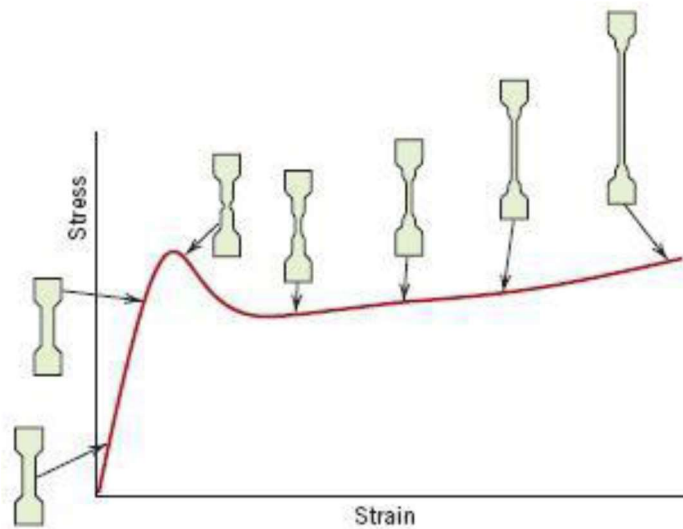


**Gambar 2.11** Sistem Scanning Electron Microscope (SEM) ([www.britannica.com](http://www.britannica.com))

### 2.2.7 Pengujian sifat tarik

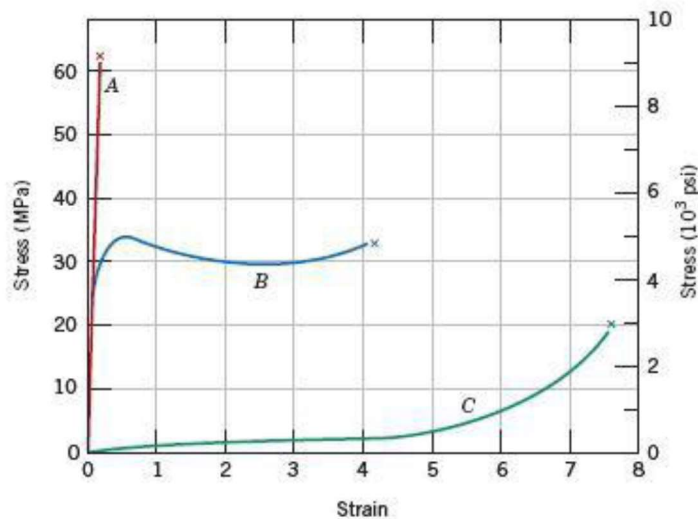
Polimer memiliki struktur dan perilaku fisis yang cenderung berbeda dari logam atau keramik silikat. Deformasi merupakan perubahan bentuk, dimensi dan posisi dari suatu benda dalam skala waktu dan ruang. Deformasi dapat dikategorikan menjadi 2 jenis yaitu deformasi permanen (plastis) dan deformasi sesaat/dinamis (elastis). Deformasi plastis adalah suatu regangan yang tidak dapat kembali (*irreversible*), sedangkan deformasi elastis yaitu perubahan posisi/regangan yang dapat kembali seperti bentuk semula (*reversible*) (Andreas, 2007). Ilustrasi dijabarkan dalam bentuk grafik yang ditampilkan pada gambar 2.11





**Gambar 2.12** Grafik deformasi tegangan-regangan (Callister, 2007)

Suatu material akan mengalami pertambahan panjang jika dikenakan beban tarik. Sebaliknya jika material diberi beban tekan, material tersebut akan mengalami deformasi menjadi lebih pendek. Deformasi plastis selalu dihindari pada pembuatan suatu produk. Pada umumnya perhitungan desain dilandaskan pada tegangan pada daerah elastis (proporsional) (Sumaryono, 2012). Kurva tegangan dan regangan polimer ditampilkan pada gambar 2.12



**Gambar 2.13** Kurva tegangan-regangan untuk polimer umum; (a) getas (brittle); (b) plastis; (c) elastomer (*highly elastic*) (Callister, 2007)

Sifat tarik berhubungan dengan sifat elastis, plastis, kekuatan dan kekakuan suatu material terhadap pembebanan yang diberikan. Dimana elastisitas adalah kemampuan suatu material untuk berdeformasi tanpa terjadinya perubahan (deformasi) yang permanen setelah tegangan dilepaskan. Energi yang diserap material dalam daerah elastis disebut dengan resilience. Sedangkan plastisitas adalah kemampuan material untuk berdeformasi permanen tanpa terjadinya perpatahan. Ukuran plastisitas biasanya ditunjukkan dengan besarnya keuletan (ductility). Energi yang dibutuhkan untuk mematahkan material disebut juga dengan ketangguhan (toughness). Kekuatan adalah kemampuan dari struktur atau material untuk tahan terhadap pembebanan tanpa kerusakan (failure) yang disebabkan oleh tegangan atau deformasi berlebihan yang diukur melalui tegangan yang terjadi pada material dalam kondisi tertentu. Kekakuan adalah besarnya deformasi elastis yang terjadi dibawah pembebanan dan diukur melalui modulus elastisitas.

Kekuatan tarik merupakan kemampuan bahan untuk menerima beban tanpa terjadi kerusakan. Kekuatan tarik suatu bahan ditetapkan dengan membagi gaya maksimum dengan luas penampang mula-mula sebelum terdeformasi.

$$\sigma = \frac{F_{maks}}{A_0} \dots\dots\dots(2.10)$$

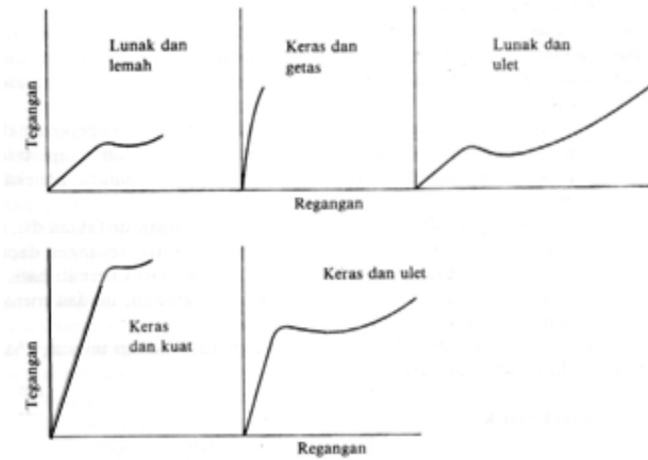
Keterangan :

$\Sigma$  = Kekuatan tarik bahan (MPa)

$F_{maks}$  = Tegangan maksimum (N)

$A_0$  = Luas penampang mula-mula (mm<sup>2</sup>)

Melalui pengujian kekuatan tarik diperoleh kurva tegangan (stress) terhadap (strain). Gambar 2.13 menunjukkan kelakuan tarikan dari bahan polimer dalam bentuk kurva tegangan regangan menurut karakteristiknya lunak atau keras, lemah atau kuat, dan getas atau liat.



**Gambar 2.14** Kurva tegangan-regangan bahan polimer pada pengujian tarik (Steven, 2001)

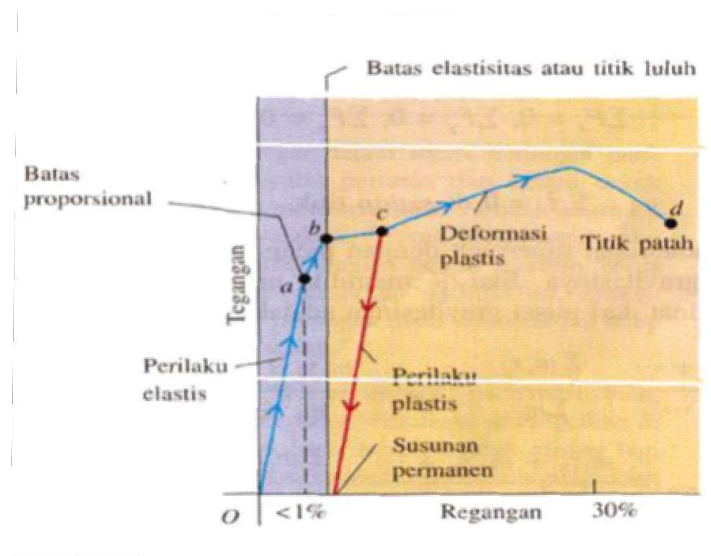
Dari pengujian kekuatan tarik maka didapatkan modulus elastisitas. Modulus elastisitas adalah ukuran suatu bahan yang diartikan ketahanan material tersebut terhadap deformasi elastis. Semakin besar modulusnya, maka semakin kecil regangan elastis yang dihasilkan akibat pemberian tegangan. Sifat mekanis bahan juga diamati dari sifat kemulurannya atau regangan yang didefinisikan sebagai pertambahan panjang yang dihasilkan oleh panjang spesimen akibat gaya yang diberikan.

$$\epsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

- $\epsilon$  = Kemuluran atau regangan (%)
- $l_0$  = Panjang spesimen mula-mula (mm)
- $l_f$  = Panjang spesimen setelah diberi beban (mm)

Pada pengujian tarik akan dihasilkan diagram hubungan antara tegangan dan regangan. Bentuk diagram tegangan-regangan pada tiap bahan adalah berbeda-beda, namun yang biasanya diperoleh dari pengujian tarik bahan yang ulet bisa dilihat pada Gambar 2.14 berikut.



**Gambar 2.15** Kurva tegangan-regangan bahan ulet (Ginting, 2012)

Grafik ini menunjukkan bahwa dari bagian awal kurva tegangan-regangan mulai dari titik o sampai a merupakan daerah elastis, dimana daerah ini berlaku hukum Hooke. Titik a merupakan batas plastis yang didefinisikan sebagai tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh suatu bahan tanpa mengalami regangan permanen apabila beban diiadakan. Dengan demikian, apabila beban diiadakan di sebarang titik o dan a, kurva akan menelusuri jejaknya kembali dan bahan yang bersangkutan akan kembali ke panjang awalnya. Titik b merupakan tegangan tarik maksimum yang masih bisa ditahan oleh bahan. Titik c merupakan titik putus/patah. Penambahan beban sehingga melampaui titik a akan sangat menambah regangan sampai tercapai titik c dimana bahan menjadi putus. Pada daerah antara titik o dan a berlaku hukum Hooke dan besarnya modulus elastisitas pada daerah ini dapat ditulis dengan persamaan :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots \dots \dots (2.12)$$

Keterangan :

E = Modulus elastisitas (Nm<sup>-2</sup>)

$\sigma$  = Tegangan (Nm<sup>-2</sup>)

$\epsilon$  = Regangan (%)