

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Triyana (2013) membahas tentang pembuatan serat PVA dari campuran prosentase PVA 10% berat di dalam aquadest yang diumpankan pada alat *electrospinning* menghasilkan serat PVA acak (non woven) dalam orde ratusan nanometer sampai submikrometer telah dapat dihasilkan bila pemasangan alat dilakukan pada tegangan listrik DC di atas 5 kV. Pada tegangan lebih tinggi dan jarak yang lebih jauh dapat dihasilkan serat nano yang tidak mengandung *beads*.

Judawisastra *et al.* (2012) melakukan penelitian pembuatan serat nano kitosan tanpa beads dengan penambahan PVA dan HDA. Dari penelitian yang dilakukan penambahan surfaktak ionik HDA terbukti efektif dalam menghilangkan *beads* (butiran serat) pada serat nano berbahan dasar kitosan (rasio berat kitosan/PVA:60/40) dengan derajat deasetilasi rendah (65%). Serat nano kitosan tanpa *beads* dengan derajat deasetilasi 65% dapat dibuat melalui proses *electrospinning* dengan penambahan PVA sebesar 40% berat larutan dan penambahan HDA sebesar 1×10^6 mol/L. Serat nano kitosan yang dihasilkan memiliki diameter sekitar 200 nm.

Biazar *et al.* (2015) melakukan penelitian sifat mekanik membran serat nano yang difabrikasi menggunakan metode *electrospinning* berbahan dasar PVA dan kitosan. Dari penelitian yang dilakukan perbandingan berat dari poli vinil alkohol / kitosan adalah 80:20 pada 2% asam asetat. Konsentrasi PVA/ prekursor kitosan adalah 5% wt dan dicampur dengan pengadukan magnetik stirer selama 1,5 jam pada 75 ° C. Paramerter tegangan yang digunakan adalah 21-25 kV dan jarak antara tip ke *collector* di buat konstan yaitu 10 cm. Dari penelitian yang dilakukan dihasilkan, bahan pembuat membran serat nano yang dikombinasikan antara bahan polimer PVA dan kitosan memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan bahan polimer yang tidak dikombinasikan antara keduanya, dengan nilai tegangan maksimal 11 Mpa dan regangan 21%, kitosan 22 Mpa dan regangan 18% , dan polimer PVA dengan tegangan 1,2 Mpa dan regangan 27 %.

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Mutia *et al.* (2012) membahas tentang pembuatan webs (lembaran tipis) atau membran dari serat alginat/ PVA melalui teknologi *electrospinning*. Percobaan dilakukan dengan menggunakan variasi komposisi larutan pintal Alginat 3%/PVA 10% (7/3, 6/4, 5/5, 4/6, 3/7), jarak (10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm) dan tegangan (12 KVA, 15 KVA, 18 KVA, 23 KVA). Pengujian terhadap produk akhir meliputi analisa gugus fungsi, analisa struktur mikro, uji resistensi terhadap mikroba dan uji pre klinis. Hasil penelitian menunjukkan proses *elektrospining* menggunakan larutan Alginat 3%/PVA 10% 4/6, pada tegangan 15 KVA dengan jarak 15 cm, menghasilkan webs serat dengan ukuran diameter mayoritas antara 100 nm - 300 nm. Selain itu, produk tersebut bersifat anti bakteri dan lolos uji pre klinis, karena tidak menyebabkan iritasi serta dapat berfungsi sebagai pembalut luka dengan kualitas yang lebih baik dibanding pembalut luka alginate konvensional, yaitu mampu mempercepat penyembuhan luka dari 24 jam menjadi 1 jam.

Muhaimin *et al.* (2014) membahas tentang fabrikasi serat nano komposit nanoselulosa dan PVA telah dilakukan dengan metode *electrospinning*. Pada penelitian ini, nanoselulosa berbentuk nanowishkers yang diperoleh dari ekstraksi serat sisal melalui proses hidrolisa. Selulosa nanowishkers yang dihasilkan selanjutnya didispersikan melalui proses ultrasonic pada suhu 30°C dengan variasi waktu 10 menit (UC-10) dan 30 menit (UC-30). Nanofiber komposit pertama dibuat dengan konsentrasi 3% nanoselulosa UC-10/PVA (menghasilkan serat nano komposit “A”) dan serat nano komposit kedua dibuat dengan 5% nanoselulosa UC-30/PVA (menghasilkan serat nano komposit “B”). Proses *electrospinning* dilakukan pada tegangan 15 kV, jarak antara ujung jarum dan pelat kolektor (TCD) 13 cm dan diameter jarum syringe 0,5 mm. Morfologi nanoselulosa dan serat nano komposit nanoselulosa/PVA diamati menggunakan scanning electron microscopy (SEM), sedangkan kandungan selulosa dianalisis puncak serapannya menggunakan Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. Hasilnya menunjukkan bahwa komposit serat nano “A” memiliki morfologi serat yang tidak seragam dengan diameter antara 100 nm – 500 nm dan terjadi aglomerasi di sepanjang nanofiber, sedangkan

komposit serat nano “B” memiliki morfologi serat yang relatif seragam dengan diameter antara 100 nm – 200 nm dan terbentuk serat yang halus.

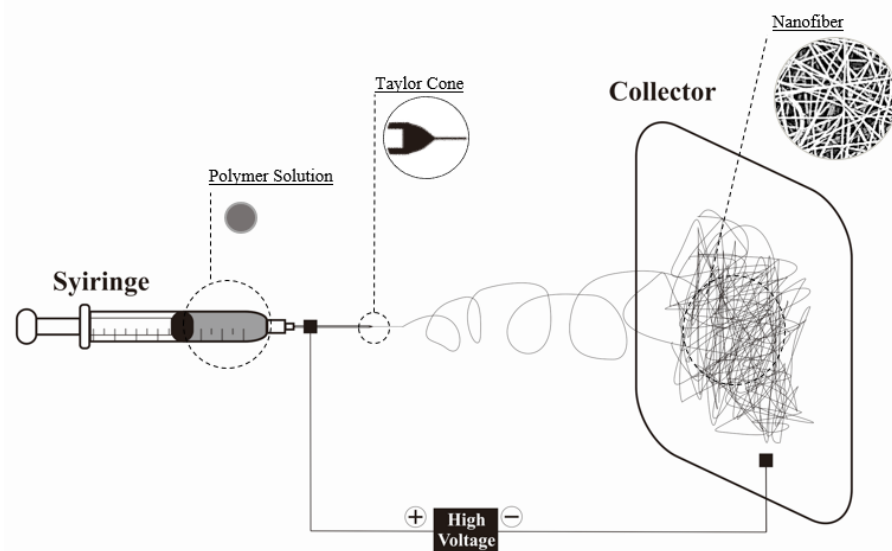
Bahmid *et al.* (2014) membandingkan sifat mekanik bioplastik dari mikrofiber dan nanofiber selulosa asetat dan mengetahui pengaruh penambahan pemlastis *dietilen glikol (DEG)* terhadap sifat mekanik bioplastik yang dihasilkan. Penelitian ini didahului dengan pembuatan selulosa asetat dari selulosa tandan kosong kelapa sawit dan sintesis nanofiber selulosa asetat dengan metode *electrospinning*. Penelitian utama adalah pembuatan bioplastik menggunakan metode solution casting dengan perlakuan ukuran serat selulosa asetat (mikrofiber atau nanofiber) dan penambahan pemlastis *DEG* (0,10, 20 dan 30%). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sifat mekanik bioplastik nanofiber lebih baik dibanding mikrofiber selulosa asetat. Penambahan pemlastis meningkatkan elongasi, daya serap air dan densitas, tetapi menurunkan kuat tarik dan modulus elastisitas bioplastik. Berdasarkan sifat fisis dan mekanis, perlakuan terbaik dihasilkan pada bioplastik nanofiber selulosa asetat dengan konsentrasi pemlastis 10%. Sifat mekanis bioplastik yang dihasilkan adalah kuat tarik 18,560 MPa, elongasi 3,953%, modulus elastisitas 0,676 GPa, daya serap air 16,772% dan densitas 1,045 g/cm³.

Herdiawan *et al.* (2013) membahas tentang pembuatan Co-PVDF nanofiber komposit dengan menggunakan teknik *elektrospinning*. PVDF dicampur dengan Co(Ac)₂, kemudian dilarutkan di dalam pelarut 1-metil-2-pirolidon (NMP). Terhadap larutan tersebut dilakukan elektrospinning dengan beberapa parameter diantaranya perbedaan konsentrasi PVDF dan Co(Ac)₂, tegangan, laju alir, dan jarak kolektor. Struktur dan sifat fisik dan kimia nanofiber dikarakterisasi dengan mikroskop cahaya, SEM, EDX, FTIR dan XRD. Hasil sintesis nanofiber yang paling baik diperoleh pada konsentrasi 21%, tegangan 21 kV, kecepatan alir 0,05 mL/menit, Jarak 12 cm dimana morfologi permukaan seratnya halus, seragam, kontinyu, serta tidak terbentuk *beads*. Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa Co-nanofiber komposit telah terbentuk dengan adanya pergeseran puncak serapan pada 879,54 cm⁻¹ menjadi 881,47 cm⁻¹ dan adanya serapan khas Co(Ac)₂ pada 1670,35 cm⁻¹.

2.2. Landasan teori

2.2.1. *Electrospinning*

Electrospinning merupakan metode yang sederhana dan efektif (Abdelhady *et al.* 2015) untuk membuat serat nano dari bahan polimer, campuran polimer atau komposit. Pada prinsipnya metode ini memanfaatkan gaya elektrostatis dari molekul/ partikel bermuatan akibat pengaruh perbedaan potensial tegangan yang sangat tinggi antara ujung tip (jarum tabung *syringe/spinnerate*) dengan *collector* (pengumpul serat nano) (Muhaimin *et al.* 2014).



Gambar 2.1. Skema alat *electrospinning*

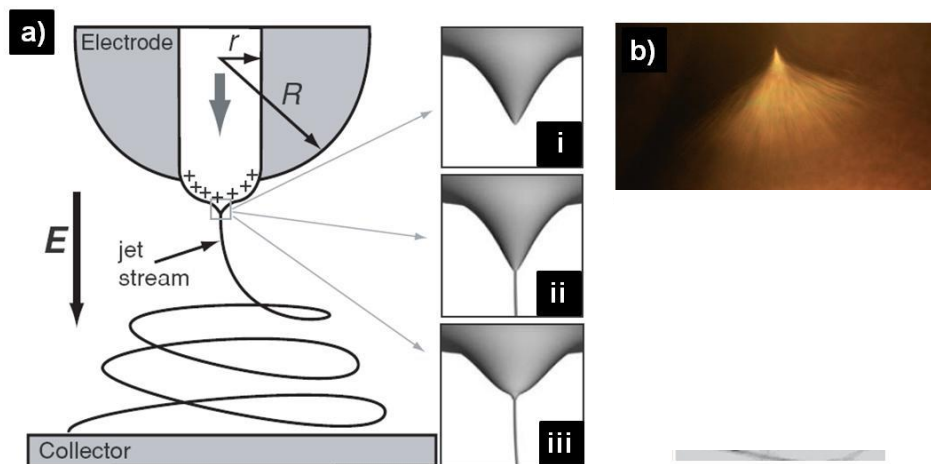
Secara garis besar metode *electrospinning* dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu tegangan tinggi (*high voltage*) *direct current* (DC), pengumpan (*syringe*) termasuk jarum/ tip (*spinnerate*), dan pengumpul serat nano (*collector*). Untuk prinsip kerja metode *electrospinning* yaitu, elektroda positif diberikan pada bagian jarum atau tip dan elektroda negatif diberikan pada bagian *collector* selanjutnya terjadi beda potensial sehingga menghasilkan gaya elektrostatis yang ditandai dengan tertariknya serat nano dari ujung tip ke *collector* seperti pada Gambar 2.1.

Secara umum proses pembentukan serat nano menggunakan metode *electrospinning* terbagi menjadi tiga tahap yang diperkenalkan sebagai *Jet*

Modeling (Deniz, 2011). Tahapan tersebut yaitu proses inisiasi, proses *thining fiber* dan proses penguapan larutan dan pembekuan fiber (*jet solidification*).

2.2.1.1. Tahap inisiasi

Tahap inisiasi adalah tahap terbentuknya tetesan larutan pada ujung jarum, dimulai dengan terbentuk dan berkumpulnya muatan positif di permukaan ujung jarum. Ilustrasi pada tahap inisiasi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



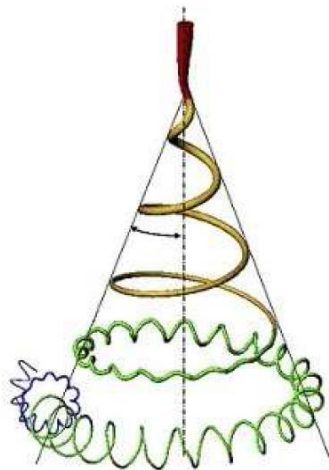
Gambar 2.2. (a) Ilustrasi aliran jet (*jet stream*) dan Taylor cone pada ujung jarum; (i) Pembentukan Taylor cone pada saat awal terjadi beda potensial, (ii) kondisi pada saat larutan mulai terpancar, (iii) permukaan kerucut mengalami relaksasi selama aliran jet, (b) Foto proses serat nano terpancar ke *collector* (Deniz, 2011)

Tegangan permukaan akan dilawan oleh tekanan listrik normal, sedangkan gaya viskos dilawan oleh tekanan listrik tangensial. Tegangan permukaan pada lapisan terluar droplet berperan membentuk permukaan sferis dan menahan droplet agar tidak menetes. Medan listrik yang muncul akibat adanya beda potensial antara ujung jarum dan kolektor mengakibatkan partikel-partikel larutan yang berada di ujung jarum menjadi bermuatan listrik sejenis sehingga muncul gaya elektrostatik (tolak-menolak) antar partikel. Ketika medan listrik atau tegangan cukup tinggi, gaya listrik yang dihasilkan akan melampaui gaya tegang permukaan, sehingga pada larutan dengan konsentrasi yang cukup akan terjadi aliran jet fiber (Gambar 2.2). Aliran jet diawali dengan terbentuknya permukaan kerucut *Taylor cone* (Gambar 2.2i). Selama terjadi aliran jet permukaan *Taylor cone* seiring dengan

waktu akan mengalami relaksasi akibat pengaruh masih adanya tegangan permukaan (2.2iii). Peristiwa terpancarnya larutan bermuatan disebut dengan aliran jet (jet stream) (Deniz, 2011).

2.2.1.2. Tahap thinning fiber

Tahap pengecilan (thining) fiber terjadi saat diameter fiber mengecil akibat terjadinya peristiwa *bending instability* pada aliran jet. Aliran jet mulanya bergerak dalam lintasan lurus, setelah itu akan terjadi gerakan seperti *bending*, *looping*, dan semakin jauh jarak yang ditempuh semakin kompleks gerakan yang terjadi. *Bending instability* diilustrasikan dalam bentuk spiral loop (Gambar 2.3). Semakin jauh jarak ujung tip dengan *collector*, spiral loopnya semakin kompleks dan akan mengakibatkan penurunan ukuran diameter fiber.



Gambar 2.3. Bending instability (Voigt, 2009)

2.2.1.3. Tahap jet solidification

Jet *solidification* adalah tahap akhir dari *jet modeling*. Tahap ini terkait dengan titik penguapan pelarut. Setiap pelarut membutuhkan waktu penguapan yang berbeda. Lamanya waktu penguapan dikorelasikan dengan pengaturan jarak ujung tip ke kolektor. Semakin singkat waktu penguapan pelarut maka diperlukan jarak antara ujung jarum dengan kolektor yang semakin pendek, begitu pula sebaliknya. Akibatnya lamanya waktu penguapan memberikan berpengaruh yang signifikan pada ukuran diameter serat nano (Deniz, 2011).

2.2.2. Parameter yang mempengaruhi proses *electrospinning*

Terdapat beberapa faktor atau parameter yang mempengaruhi morfologi dan keseragaman serat nano yang terbentuk pada proses *electrospinning*. Parameter diklasifikasikan dalam dua kategori yaitu sebagai berikut (Thompson *et al.* 2007).

2.2.2.1. Sifat larutan polimer

Beberapa sifat larutan yang mempengaruhi pembentukan serat nano antara lain; berat molekul polimer, konsentrasi larutan, viskositas larutan, konduktivitas larutan, konstanta dielektrik dan tegangan permukaan larutan. Besaran-besaran tersebut memberikan pengaruh yang signifikan pada proses *electrospinning*. Sebagai contoh berat molekul dan konsentrasi larutan berpengaruh pada terbentuknya tetesan (*droplet*) dan butiran (*beads*) dalam serat nano. Semakin tingginya konsentrasi larutan, akan mengurangi peluang terjadinya *jet stream*, karena interaksi antara pelarut dengan polimer semakin kuat sehingga larutan menjadi sulit di-*electrospinning* (Thompson *et al.* 2007).

2.2.2.2. Parameter *electrospinning*

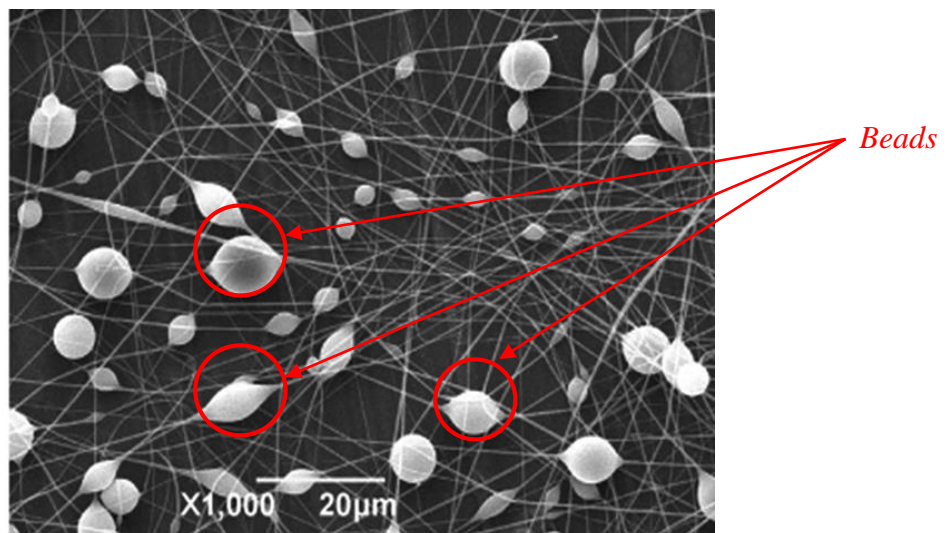
Parameter alat *electrospinning* merupakan faktor penting yang mempengaruhi proses *electrospinning*. Parameter tersebut meliputi besar medan listrik besar beda potensial, laju aliran larutan dan jarak ujung jarum/ tip ke *collector* (TCD= *Tip to Collector Distance*). Semakin jauh TCD, ukuran serat yang terbentuk akan semakin kecil, karena diperlukan waktu lebih lama bagi serat untuk mencapai *collector* sehingga larutan menguap pada saat diperjalanan menuju *collector*. Sedangkan jarak yang lebih pendek akan menyebabkan ukuran diameter serat yang besar, karena tidak cukup waktu bagi larutan untuk menguap sebelum sampai ke *collector*. Besarnya beda potensial juga mempengaruhi ukuran serat. Semakin tinggi beda potensial maka ukuran serat akan semakin kecil karena medan listrik yang besar membuat serat mengalami regangan lebih besar (Thompson *et al.* 2007).

2.2.3. Beads (bintik serat)

Beads biasanya dianggap sebagai serat yang berkualitas buruk (*fiber defect*) ditandai dengan bintik/ butiran pada serat nano. Penelitian yang telah dilakukan Fong *et al.* (1999) menunjukkan bahwa berikut ini adalah faktor utama yang berkontribusi terhadap pembentukan *beads* diantaranya :

- a. Berat molekul rendah / konsentrasi / viskositas
- b. Tegangan permukaan tinggi
- c. Kepadatan muatan rendah

Beads pada serat nano kitosan dapat terjadi akibat kompetisi antara perubahan viskositas dan konduktifitas larutan selama proses *electrospinning*. Metode terkini untuk menghilangkan *beads* telah berhasil diterapkan pada pembuatan serat nano polistirena melalui peningkatan konduktifitas larutan dengan penambahan surfaktan ionik pada larutan polimer. Beberapa contoh surfaktan ionik adalah *dodecyltrimethyl-ammonium bromide* (DTAB), *tetrabutyl-ammonium chloride* (TBAC) dan *Hexadecylamine* (HDA) (Judawisastra *et al.* 2012).

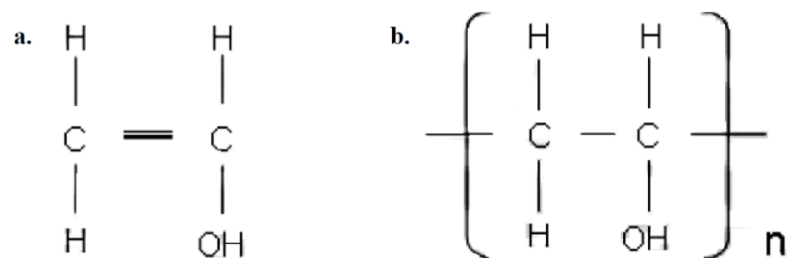


Gambar 2.4. *Beads* serat nano

2.2.4. Polyvinyl Alkohol (PVA)

Polyvinyl alcohol (PVA) pertama kali dibuat oleh Herman dan Haehnel pada tahun 1924 (Maiti *et al.* 2012). PVA dengan rumus $(C_2H_4O)_n$ merupakan salah satu polimer hidrofilik berbentuk bubuk halus, berwarna putih kekuningan, tidak berbau dan memiliki densitas $1,3 \text{ gram/cm}^3$ pada $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan kisaran pH 3,5 – 7,0 jika dilarutkan dengan konsentrasi 40 gram/liter pada $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Simanjuntak, 2008). PVA merupakan polimer yang larut dalam air dan mudah bereaksi dengan agen berikatan silang (*cross linked*) yang lain untuk membentuk gel. PVA juga bersifat biokompatibel dan biodegradable, sehingga banyak digunakan untuk aplikasi medis, kosmetik, dan kemasan (Maiti *et al.* 2012).

PVA mempunyai ketercampuran hayati yang baik dan memiliki sifat fisik yang elastis, serta memiliki kemampuan yang tinggi untuk mengembang dalam air, tidak korosif, lembut dan bersifat adesif serta kekuatan tarik yang baik. Selain untuk aplikasi medis PVA juga telah digunakan secara luas pada berbagai aplikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Menurut Simanjuntak (2008) PVA diproduksi dari monomer vinil asetat. Gambar 2.5 memperlihatkan struktur PVA.



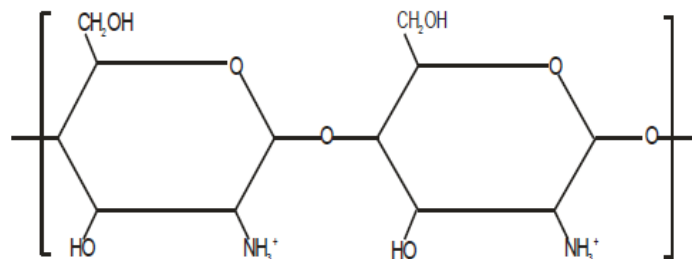
Gambar 2.5. (a) Vinil asetat (b)PVA (Simanjuntak 2008).

Sedikit modifikasi ikatan silang PVA dengan monomer/polimer lain maupun dengan pemberian penguat pada *solvent*, maka PVA akan dapat digunakan sebagai matrik membran. Oleh karena itu, jika PVA dikembangkan dengan tepat dapat menjadi polimer alternatif penyusun membran komposit dari keunggulan karakteristik yang dimiliki.



Gambar 2.6. Multi facets of PVA membrane (Maiti *et al.* 2012)

2.2.5. Kitosan



Gambar 2.7. Struktur Kimia Kitosan (Kurniasari, 2016)

Senyawa yang biasanya digunakan untuk menstabilkan ukuran nanopartikel adalah polimer (Wahyudi and Sugiyana, 2011). Menurut Kurniasari (2016) kitosan adalah suatu polimer dari sakarida (polisakarida) yang didapatkan dari proses deasetilasi senyawa kitin yang terkandung didalam kulit luar hewan golongan Crustacea contohnya udang, kepiting, dan lainnya. Kitosan merupakan salah satu polimer yang banyak dikembangkan dan diteliti untuk aplikasinya dalam bidang farmasetika karena memiliki sifat *biocompatible*, *biodegradable*, dan tidak memiliki efek toksik. Struktur kimia kitosan dapat dilihat pada Gambar 2.7.

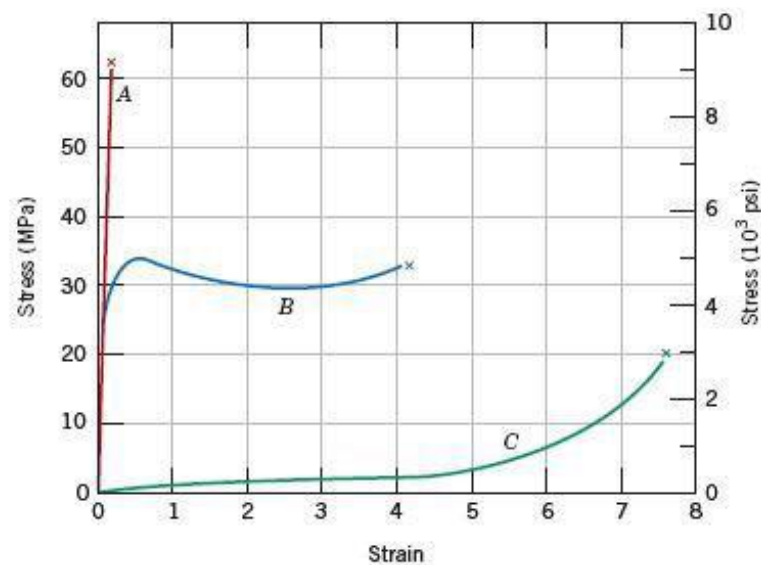
Sumber utama untuk produksi kitosan adalah kitin dan bahan baku yang digunakan untuk mengolahnya tersedia dalam jumlah yang cukup melimpah di Indonesia, terutama cangkang kepiting dan rajungan serta kulit udang. Kitosan merupakan modifikasi polimer karbohidrat alami yang diproses melalui deasetilasi parsial kitin. Unit utama pada polimer kitin adalah 2-deoksi-2-(asetilamino) glukosa. Walaupun kitin tidak larut dalam sebagian besar pelarut, kitosan larut dalam sebagian besar larutan asam organik pada pH kurang dari 6,5 termasuk asam format, asetat, tartrat, dan sitrat. Kitosan tidak larut dalam asam fosfat dan asam sulfat. Kitosan tersedia dalam rentang berat molekul dan derajat deasetilasi yang luas. Berat molekul (BM) dan derajat deasetilasi (DD) adalah faktor utama yang mempengaruhi ukuran partikel, pembentukan partikel, dan agregasi (Tiyaboonchai, 2003). Kitosan memiliki sifat-sifat yang ideal sebagai polimer nanopartikel, sifat-sifat tersebut yaitu: mudah disintesis, murah, biokompatibel, *biodegradable*, *non-immunogenic*, *non-toxic*. Pada pembuatan nanopartikel menggunakan kitosan tidak melibatkan panas, tekanan tinggi, ataupun pelarut organik. Kitosan dapat diaplikasikan untuk obat dengan molekul kecil, protein, dan polinukleotida (Tiyaboonchai, 2003). Kitosan merupakan biopolimer alami yang menarik disebabkan adanya gugus amino reaktif dan grup fungsional hidroksil. Kitosan memiliki karakteristik biokompatibilitas yang diinginkan serta kemampuan untuk meningkatkan permeabilitas membran. Oleh karenanya, kitosan merupakan salah satu matriks imobilisasi yang paling menjanjikan karena memiliki kemampuan membentuk membran, sifat adesi yang baik, harga murah, tidak beracun, kekuatan mekanis dan hidrofilisitas yang tinggi serta perbaikan stabilitas (Nakorn, 2008). Salah satu aplikasi kitosan yang banyak diteliti adalah kemampuannya sebagai polimer dalam membentuk nanopartikel dan telah banyak diteliti bahwa nanopartikel kitosan sebagai pembawa obat untuk penghantaran obat secara oral maupun topikal.

2.2.6. Deformasi

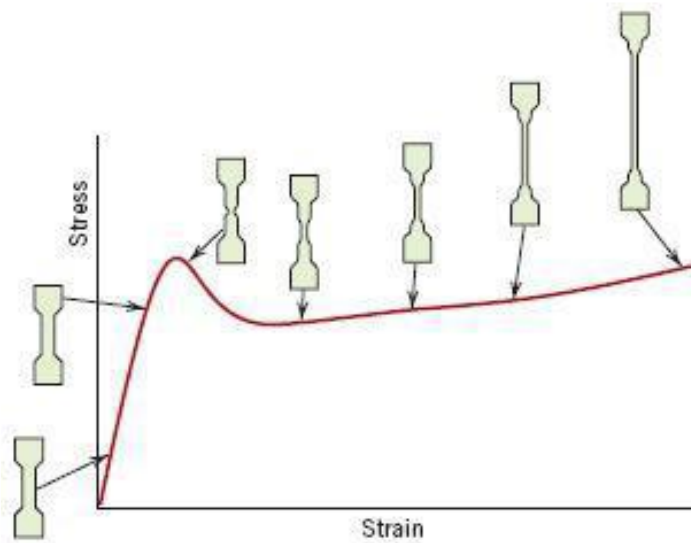
Struktur polimer cukup berbeda sehingga perilaku mekanisnya tidak selalu sama dengan perilaku logam atau keramik nonsilikat. Pada Gambar 2.8 menunjukkan perilaku hasil uji tarik pada bahan polimer yang mempunyai sifat dan karakter yang berbeda. Pada semua padatan, tegangan akan menimbulkan regangan elastis (deformasi elastis). Regangan elastis muncul ketika ada tegangan, tetap konstan apabila tegangannya konstan dan hilang apabila tegangannya dihilangkan.

Deformasi elastis adalah suatu regangan yang dapat balik (*reversible*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 Jika suatu tegangan diberikan dalam bentuk tarik, material akan menjadi sedikit lebih panjang, bila beban ditiadakan material tersebut akan kembali ke dimensi semula. Sebaliknya, bila material mengalami penekanan, material menjadi sedikit lebih pendek.

Pada tegangan yang lebih tinggi terjadi pergeseran tetap dari atom-atom dalam suatu bahan disamping regangan elastis. Regangan ini tidak mampu balik pada saat regangan ditiadakan, regangan ini disebut regangan plastis. Pada pemakaian produk, kita selalu menghindari terjadinya deformasi plastis sehingga perhitungan desain dilandaskan pada tegangan-tegangan di daerah elastis (proporsional).



Gambar 2.8. Kurva tegangan-regangan untuk polimer a) getas (*brittle*); b)plastis; dan c) elastomer (*highly elastic*) (Sumaryono, 2012)



Gambar 2.9. Grafik deformasi tegangan-regangan (Sumaryono, 2012).
Hukum Hook

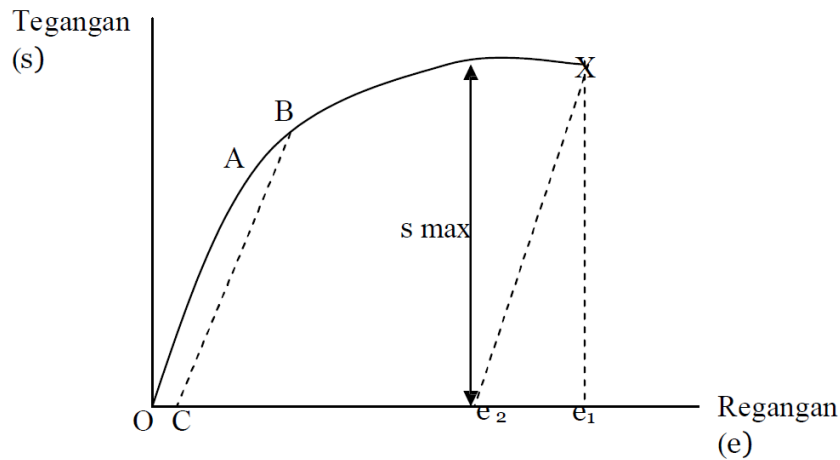
Dalam pengujian tarik, ketika spesimen mendapatkan beban, maka dia akan mengalami perpanjangan, sampai kemudian putus. Jika L_1 adalah panjang mula-mula dari spesimen dan L_2 adalah panjang akhir spesimen setelah penarikan, maka perpanjangan persatuan panjang (e) adalah :

$$e = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \dots\dots\dots(2.1)$$

Perpanjangan per satuan panjang ini disebut regangan (strain). Dari regangan ini kita bisa mengetahui mampu bentuk suatu bahan. Semakin besar nilai regangan berarti bahan tersebut semakin baik mampu bentuknya. Disamping itu spesimen juga mendapatkan pembebanan (P) per satuan luas (A) yang besarnya adalah :

$$S = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.2)$$

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 2.10 berikut.



Gambar 2.10. Diagram tegangan-regangan uji tarik bahan ulet (Sumaryono, 2012)

Bagian awal linear garis OA merupakan daerah elastis. Titik A ialah batas elastis yang didefinisikan sebagai tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh bahan tanpa mengalami regangan permanen apabila beban ditiadakan. Penentuan batas elastis cukup rumit, tergantung kepekaan instrument pengukur regangan. Itulah sebabnya mengapa batas elastis sering diganti dengan batas proporsional. Batas proporsional adalah tegangan dimana garis lengkung tegangan-regangan menyimpang dari kelinierannya. Titik B merupakan kekuatan luluh (*yield strength*) dimana tegangan yang akan menghasilkan deformasi permanen dalam jumlah kecil yang pada umumnya sama dengan regangan sebesar 0,2 %. Dalam hal ini digunakan metode *offset*. Hal ini dilakukan dengan menarik garis sejajar dengan daerah proporsional pada jarak 0,2 % atau titik C. Kemudian perpotongan antara garis *offset* dengan diagram ditentukan sebagai titik luluh bahan. Pada bahan yang bersifat ulet, biasanya setelah pembebanan dihilangkan, regangan total akan berkurang dari e_1 menjadi e_2 . Berkurangnya regangan ini disebut *recoverable elastic strain*. Maka regangan yang diambil untuk menentukan offset adalah e_2 .

Kekuatan tarik suatu bahan ditunjukkan oleh harga tegangan maksimum (s_{max}) kurva tegangan-regangan. Sedangkan tegangan patah adalah tegangan dimana spesimen mengalami patah (Sumaryono, 2012).