

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Polimer dan Serat

Polimer adalah molekul rantai panjang yang dibentuk oleh gabungan monomer secara kimiawi melalui prosesnya yang disebut polimerisasi. Panjang rantai polimer menentukan tingkatan polimerisasi. Polimer yang terbentuk dari dua atau lebih monomer disebut kopolimer. Kopolimer terkadang ditambahkan dalam struktur rantai untuk memperbaiki sifat polimer (Karmakar, 1999). Suatu polimer akan terbentuk bila ratusan sampai ribuan unit molekul kecil yang disebut monomer saling berikatan dalam suatu rantai (Powel, 2003).

Serat terbentuk dari polimer, serat sebagai satuan terkecil dari berbagai jenis tekstil dibuat dari bahan khusus yang memiliki panjang dan diameter tertentu serta memiliki sifat yang dapat dikenali. Serat adalah sebuah zat yang panjang dan tipis dan mudah dibengkokkan. Agar cocok digunakan sebagai bahan baku tekstil, serat harus memiliki panjang yang lebih besar dibanding diameternya (Hartanto dan Watanabe, 2003).

Serat yang dipakai dalam pembuatan tekstil menurut Karmakar (1999) dapat dikelompokkan menjadi empat, yaitu serat selulosa alami, serat protein alami, serat regenerasi, dan serat sintetis. Menurut Jumaeri (1997), pada umumnya kain dari serat alam mempunyai sifat yang hampir sama yaitu kuat, padat, mudah kusut, dan tahan penyetricaan. Serat alam misalnya bulu binatang, protein, serat tumbuh-tumbuhan, dan mineral. Serat alam yang

berasal dari tumbuhan masih dapat dibagi lagi yaitu serat biji, serat buah, serat batang, dan serat daun. Serat mineral yaitu serat yang berasal dari bahan galian, contohnya asbestos, emas, perak, tembaga, dan aluminium yang ditujukan sebagai bahan pembuatan serat logam (Jumaeri, 1997).

Serat sintetis yaitu serat yang terdiri dari polimer yang berasal dari bahan atau senyawa kimia (McIntyre, 2005). Polimerisasi serat sintetis dapat dilakukan secara adisi dan kondensasi. Polimerisasi adisi yaitu penggabungan molekul-molekul kimia yang sama tanpa menghilangkan molekul sederhana. Polimerisasi kondensasi yaitu penggabungan banyak molekul kimia yang sama dengan menghilangkan molekul sederhana (McIntyre, 2005). Salah satu kekurangan serat sintetis yang digunakan untuk bahan tekstil yaitu menyebabkan rasa panas, kurang nyaman dipakai dan tidak dapat menyerap cairan seperti cairan keringat. Kelebihannya adalah memiliki struktur yang lebih kuat dan tahan lama (Powel, 2003).

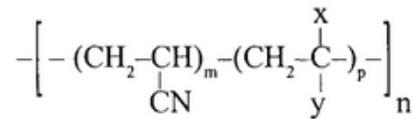
Tidak semua benda yang berbentuk serat dapat dijadikan atau dipakai menjadi bahan baku tekstil. Agar suatu benda yang berbentuk serat dapat dipergunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan tekstil maka harus memenuhi beberapa persyaratan, persyaratan tersebut antara lain: memiliki kekuatan yang cukup, elastis, dan perbandingan panjang lebih besar dari diameternya (Samsul, 2005).

B. Kain

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (2015), kain diartikan sebagai barang yang ditenun dari benang kapas. Dalam arti lain, kain merupakan barang tenunan untuk pakaian atau untuk maksud lain. Kain dihasilkan dari serat atau benang yang ditenun, rajut, atau teknik *felting*. Kain pada mulanya berasal dari serat alami, namun seiring perkembangan teknologi dan industri, kain mulai dibuat dari serat buatan yang lebih murah, awet, dan memiliki ketahanan yang baik. Kain yang berasal dari serat alami contohnya kain katun, linen, sutra, wol, dan kasmir. Kain yang terbuat dari serat sintetis contohnya kain polyester, nilon, akrilik, spandek, dan olefin. Kain yang terbuat dari serat alami memiliki kemampuan terdegradasi yang lebih baik dari pada kain yang terbuat dari serat sintetis (Li dkk., 2010).

C. Kain Akrilik

Kain akrilik pertama kali diproduksi oleh perusahaan Dupont pada tahun 1940. Serat akrilik terbentuk dari polimer polyacrylonitrile. Polyacrylonitrile yaitu gabungan-gabungan dari monomer acrylonitrile [-CH₂-CH (CN)] yang dipolimerisasikan secara adisi (Karmakar, 1999). Berat molekul polyacrylonitrile rata-rata adalah 100.000 g/mol. Serat akrilik mengandung sekitar 15% komonomer dan sekitar 85% acrylonitrile. Komonomer ditambahkan untuk meningkatkan sifat serat akrilik, diantaranya *thermoplasticity*, kelarutan, dan *dyebility* (Karmakar, 1999). Struktur acrylonitrile dan monomernya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur acrlonitrile dan monomernya
(Sumber : Karmakar, 1999)

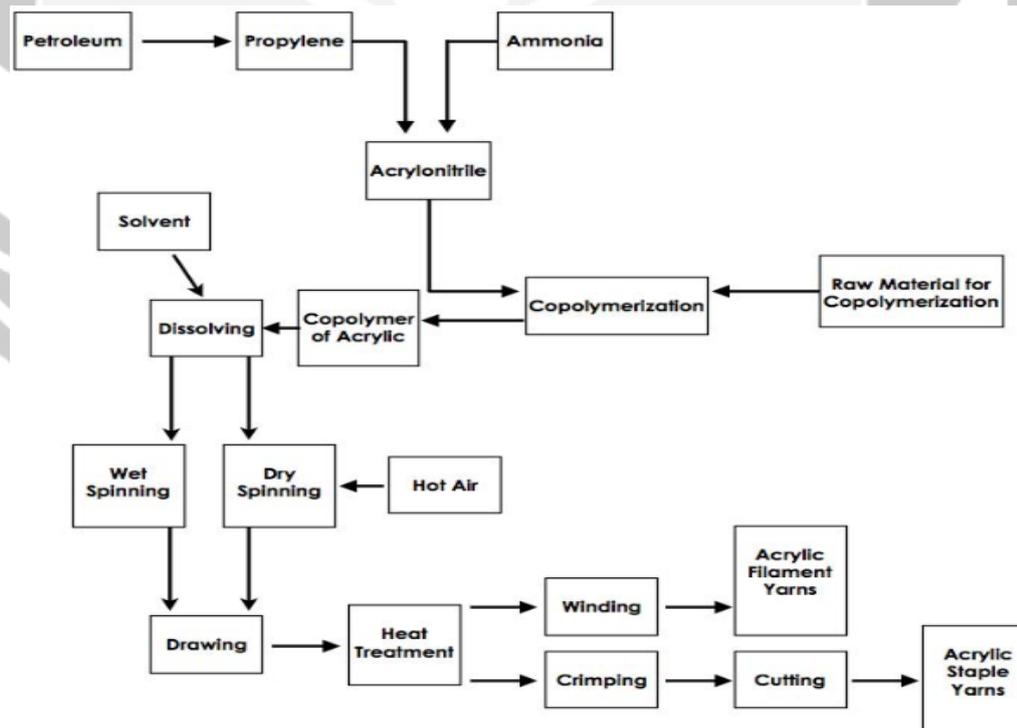
Keterangan :

n = derajat polimerisasi (150-200 unit)

m, p = jumlah monomer dan komonomer unit dalam rantai polimer

x, y = disubstitusi dari komonomer

Acrylonitrile merupakan senyawa yang berasal dari minyak bumi. Acrylonitrile dapat menyebabkan gangguan iritasi apabila kontak dengan kulit dan apabila masuk ke dalam tubuh dapat menyebabkan gangguan pada hati, sakit kepala, mual, muntah, dan kebingungan (New Jersey Department of Health and Senior Services, 2005). Proses pembuatan serat untuk kain akrilik disajikan pada Gambar 2.



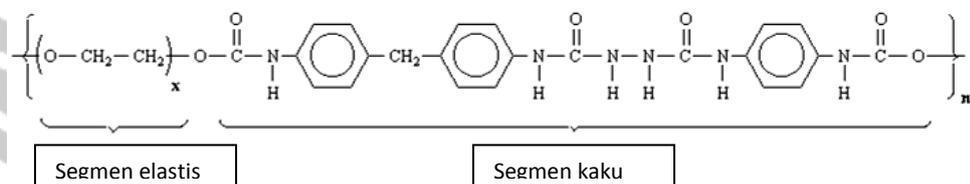
Gambar 2. Proses Pembuatan Bahan Kain Akrilik (Sumber : Kadolph dkk., 1993)

Kain akrilik memiliki karakteristik yang mirip dengan kain wol. Kain ini sering disebut juga wol sintetis. Akrilik menjadi kain yang banyak digunakan untuk membuat *sweater*, selimut, dan barang-barang lain yang sering dipakai dan dicuci. Akrilik memiliki sifat hampir sama seperti wol alami, yaitu berkerut ketika dipintal dengan proses pemintalan kering, namun akrilik memiliki masa yang lebih ringan walaupun ketebalan yang sama dengan wol (Kadolph dkk., 1993). Selain itu akrilik dapat terus tersedia karena seratnya dapat terus dibuat dan harganya lebih murah (Cohen dan Johnson, 2010).

Kain akrilik memiliki kelebihan, yaitu ringan, memiliki ketahanan yang baik, memiliki elastisitas yang baik, memiliki tekstur lembut, memberikan kehangatan bagi pemakainya, memiliki resistensi yang sangat baik terhadap sinar matahari dan pelapukan, serta mudah dicuci (Kadolph dkk., 1993 ; Cohen dan Johnson, 2010). Serat akrilik tahan terhadap asam lemah, alkali lemah, pelarut organik, zat pengoksidasi dan pelarut yang digunakan pada *dry cleaning*, namun serat ini peka terhadap basa kuat dan pelarut organik yang sangat polar. Serat akrilik kurang menyerap kelembaban dibandingkan dengan serat yang terbuat selulosa asetat dan polyester. Selain itu serat akrilik memiliki kekuatan panas basah yang sangat rendah apabila dibandingkan dengan serat sintetis lainnya seperti selulosa asetat dan polyester (Paul, 2015).

D. Spandek

Kain berbahan spandek pertama kali diproduksi dan diperkenalkan oleh perusahaan Dupont pada tahun 1960 dengan nama dagang Lycra. Spandek merupakan serat termoplastik yang memiliki ketahanan sangat baik. Serat spandek tidak rusak saat terkena minyak tubuh, keringat, lotion, deterjen, atau ozon. Spandek memiliki sifat ringan dan sangat fleksibel, (Anslyn dan Dougherty, 2006). Spandek juga memiliki ketahanan fisik dan kimiawi yang baik terhadap hidrolisis, perubahan pH, panas, oksigen, dan radiasi ultraviolet (Cook, 2001). Struktur spandek terdiri dari struktur uretan yang cukup kaku sehingga spandek cukup baik sebagai bahan pembuatan serat. Selain itu spandek juga terdiri dari struktur fleksibel yang memberikan sifat elastis. Spandek dapat meregang hampir 600% dari ukuran awal dan kemudian kembali ke bentuk aslinya (Anslyn dan Dougherty, 2006). Struktur spandek dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur spandek terdiri dari segmen kaku dan segmen elastis
(Sumber : Anslyn dan Dougherty, 2006)

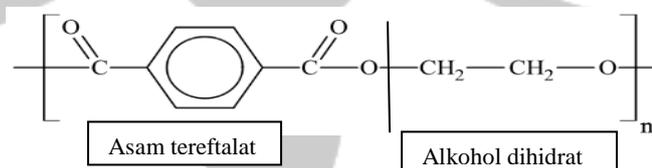
Spandek terbuat dari dua jenis prepolimer yang direaksikan, secara adisi, yaitu macroglycol (ethylene glycol) yang bersifat fleksibel dan diisocyanat yang bersifat kaku. Ethylene glycol merupakan polimer rantai panjang yang memiliki gugus hidroksil (-OH) pada kedua ujung rantai. Ethylene glycol menghasilkan serat spandek yang lentur dan dapat meregang.

Dalam proses pembuatan serat spandek, bahan alami seperti katun dan wol sering ditambahkan sebagai pelapis serat agar nyaman digunakan. Lapisan katun atau wol adalah lapisan sangat tipis yang menutupi inti serat (Ma dan Negahban, 1995a).

Diisiosianat memberikan sifat kaku dan kuat pada serat spandek. Jenis diisiosianat yang biasa digunakan yaitu diisiosianat poli-meric. Diisiosianat poli-meric adalah rantai polimer pendek yang memiliki isosianat (-NCO) kelompok pada kedua ujungnya. Karakteristik utama dari molekul ini adalah kekakuan yang memberikan kekuatan pada serat spandek (Negahban, 1993).

E. Polyester

Serat polyester adalah serat yang substansinya terdiri dari rantai polimer sintetik panjang yang mengandung 85% berat ester dari alkohol dihidrat (HOROH) dan asam tereftalat (p-HOOC-C₆H₄COOH). Polimer polyester dibuat dengan cara polimerisasi secara kondensasi. Struktur polyester dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 . Struktur kimia polyester merupakan gabungan dari asam teretalat dan alkohol dhidrat (Sumber : Krevelen dan Nijenhuis, 2009).

Serat polyester yang paling banyak digunakan terbuat dari polimer linear (etilena tereftalat), dan kelas polyester ini umumnya disebut sebagai PET (Polyethylene terephthalate) (Education Department, 1978). PET juga merupakan bahan pembuat berbagai kemasan plastik, seperti botol minuman,

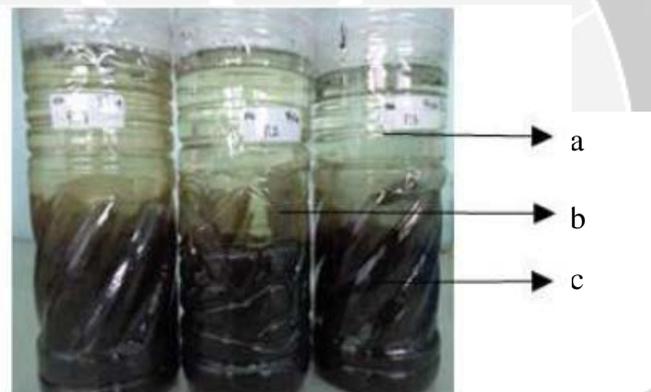
wadah bahan makanan, botol kemasan obat, dan wadah kemasan kosmetik (Maeda dkk., 2015). Sifat dari serat polyester yaitu kuat, tahan peregangan dan penyusutan, tahan terhadap sebagian besar bahan kimia, cepat kering, garing dan ulet, tahan kerut, tahan jamur, tahan abrasi, mempertahankan lipatan akibat panas (misalnya setrika), tahan terhadap bakteri dan jamur dan mudah dicuci (Kotra dan Gao, 2004).

F. Kolom Winogradsky

Kolom Winogradsky merupakan ekosistem mikroba buatan yang berfungsi untuk mempelajari kultur bakteri dalam waktu jangka panjang. Kolom Winogradsky merupakan metode yang penamaannya sesuai dengan penemunya, yaitu Sergei Winogradsky (Madigan dkk., 2000). Kolom Winogradsky digunakan untuk mengungkapkan populasi mikroba dalam sampel tanah atau air tertentu. Kolom dan semua komponennya pertama kali disterilkan dan kemudian diinokulasi dengan tanah steril atau sampel air. Populasi mikrobia akan berkembang di bagian kolom yang menyediakan kondisi fisik dan kimia yang tepat bagi pertumbuhan mikrobia. Aplikasi penting dari kolom Winogradsky yaitu dapat digunakan untuk menguji berbagai bahan melalui perubahan ekologi potensial. Perubahan signifikan populasi mikrobia di dalam kolom menjadi indikasi dari bahan tertentu yang diujikan (Pfafflin dan Ziegler, 2006).

Kolom Winogradsky dibuat dengan memasukkan tanah basah dengan ketebalan beberapa inci dari tanah kebun ke dalam silinder dengan ketinggian

minimal 2 inci ke dalam tabung dengan ukuran tinggi 12-15 cm. Lumpur dari kolam atau badan air lainnya ditambahkan dan dilakukan penambahan nutrisi seperti karbon. Air ditambahkan sampai menutupi tanah dan lumpur. Kolom dapat ditempatkan dalam keadaan terpapar udara atau sedikit terpapar udara. Setelah beberapa minggu, populasi mikrobia akan mulai terbentuk dan membentuk gradien sepanjang kolom. Dasar kolom akan bersifat anaerob dan semakin ke atas semakin banyak oksigen. Sehingga mikrobia pada setiap lapisan dapat berbeda (Ernst, 2000). Kolom winogradsky sederhana disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kolom winogradsky sederhana (Sumber : Ainiyah dan Shovitri, 2014)

Keterangan :

- a. MSM (Mineral Salt Medium)
- b. Potongan sampel
- c. Tanah sampah sebagai inokulum

G. Parameter Uji

1. Suhu dan Derajat Keasaman (pH)

Laju pertumbuhan dan aktivitas bakteri dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya pH, suhu, nutrisi, tekanan osmosis, pengeringan, dan lain sebagainya (Waluyo, 2010). Menurut Waluyo

(2010), suhu dan pH menjadi salah satu faktor penting bagi pertumbuhan bakteri karena masing-masing spesies bakteri mempunyai suhu dan pH optimum bagi pertumbuhannya. Menurut Setyawan (2002), bakteri yang hidup pada tanah terutama pada lapisan atas merupakan bakteri mesofilik yaitu hidup pada kisaran suhu 20-45°C mengikuti suhu tanah.

Bakteri tanah berkembang dengan baik pada pH di atas 5,5. Jika kurang dari itu, bakteri tidak tumbuh dengan baik (Hardjowigeno, 2007). Menurut Maytayani dan Pandebesie (2013), semakin tinggi suhu yang dihasilkan dalam proses biodegradasi, dapat meningkatkan kualitas mikroorganisme yang ada dalam sampah yang didegradasi tersebut. Sehingga peningkatan kualitas hidup mikroorganisme tersebut dapat mempengaruhi proses laju degradasi.

2. Berat Kain

Proses terjadinya biodegradasi pada lingkungan dimulai dengan tahap degradasi kimia yaitu proses oksidasi molekul yang menghasilkan polimer dengan berat molekul rendah. Proses berikutnya adalah serangan mikroorganisme dengan memanfaatkan enzim yang dihasilkannya. Selama biodegradasi berlangsung, terjadi proses depolimerasi dimana eksoenzim dari mikroba akan memecah polimer kompleks menjadi rantai pendek oligomer dan monomer sehingga dapat melewati membran semi permeabel mikroba, yang kemudian dapat digunakan sebagai sumber karbon dan energi. Selanjutnya terjadi proses mineralisasi dimana terjadi

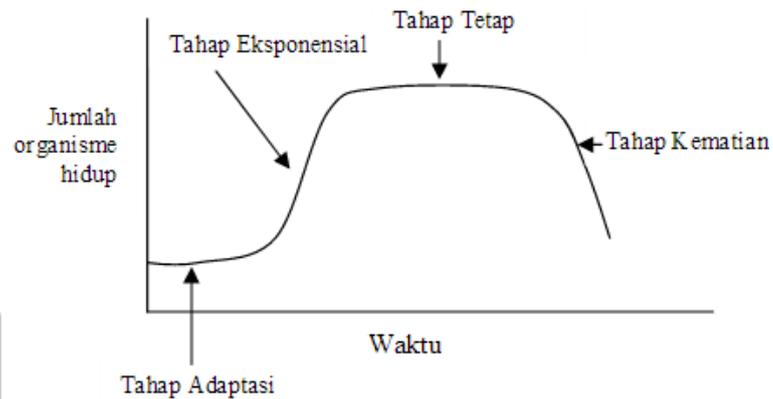
pengubahan fragmen oligomer dan monomer menjadi produk akhir seperti karbon dioksida, air, atau metana (Jendrossek dan Handrick, 2002).

Terurainya bahan menjadi sumber energi bagi mikrobia menyebabkan berkurangnya volume bahan yang mempengaruhi berat bahan tersebut. Maka dari itu berat merupakan tolak ukur yang baik dalam proses degradasi (Sawada, 1994). Menurut Owen dkk. (1995), menimbang massa polimer sebelum dan setelah proses biodegradasi selama selang waktu tertentu merupakan metode kuantitatif yang paling sederhana untuk mengkarakterisasi terjadinya biodegradasi suatu polimer.

H. Bakteri Pendegradasi Kain

Bakteri adalah istilah yang berasal dari bahasa Yunani yaitu “bakterion” yang berarti tongkat atau batang. Istilah bakteri ditujukan pada mikrobia bersel satu dengan bentuk bermacam-macam, mulai dari kokus (bulat), batang (basil), spiral, vibrio (koma), dan spirocheta. Ukuran sel bakteri bervariasi dengan lebar 0,2-1 μ dan panjang 1-10 μ (Adam, 1992).

Bakteri dapat hidup dalam berbagai tempat dan kondisi lingkungan, mulai dari tubuh manusia, udara, air, tanah, sampai lava gunung berapi. Selain itu, bakteri juga dapat hidup pada rentang suhu dingin sampai panas dan kondisi asam sampai basa. Bakteri memiliki siklus daur hidup yang terdiri dari 4 fase, yaitu fase lag (adaptasi), fase log (eksponensial), fase pertumbuhan statis (fase tetap/stasioner), dan fase kematian. Kurva daur hidup bakteri dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Daur Hidup Bakteri (Sumber : Garbutt, 1997)

a) Fase Lag (Fase Adaptasi/permulaan)

Fase lag yaitu fase dimana pertumbuhan sangat minim karena adanya masa adaptasi dengan lingkungan (Harti, 2015). Waktu yang dibutuhkan selama masa adaptasi tergantung kepada kondisi lingkungan, nutrisi yang tersedia, jumlah inokulum, serta kondisi inokulum (Garbutt 1997).

b) Fase Logaritma (Fase Log/ Fase Eksponensial)

Pada fase ini bakteri mencapai kecepatan pertumbuhan maksimum. Jumlah dan massa sel bertambah secara eksponensial. Pertumbuhan yang terjadi seimbang dengan kecepatan pembelahan sel dan aktivitas metabolisme konstan (Harti, 2015). Menurut Garbutt (1997), kecepatan pertumbuhan selama fase log dipengaruhi oleh faktor-faktor, seperti suhu, nutrisi, air dan pH.

c) Fase Pertumbuhan Statis (Fase Stasioner)

Pada fase ini, kecepatan pertumbuhan menurun dan terjadi akumulasi metabolit. Jumlah nutrisi semakin berkurang namun jumlah sel mati dan sel hidup tetap (Harti, 2015). Menurut Garbutt (1997),

penurunan kecepatan pertumbuhan disebabkan oleh berkurangnya jumlah nutrisi, perubahan pH dan suhu yang menghambat pertumbuhan, adanya bahan beracun yang dihasilkan, dan berkurangnya pasokan oksigen.

d) Fase Kematian

Pada fase ini, terjadi laju kematian secara eksponensial dan terjadi penurunan populasi sel-sel hidup (Harti, 2015). Menurut Garbutt (1997), kematian sel bakteri disebabkan oleh nutrisi yang telah habis sehingga tidak terdapat sumber energi, perubahan pH dan suhu yang merusak sel, dan akumulasi bahan beracun di dalam sel.

Kain sintetis terbuat dari polimer sintetis dengan monomer yang sama dengan monomer pembentuk plastik. Secara umum, polimer sintetis dapat terdegradasi oleh mikrobia karena aktivitas enzim tertentu yang menyebabkan pembelahan rantai polimer menjadi monomer dan oligomer. Polimer yang telah dipecah secara enzimatik selanjutnya diserap oleh sel-sel mikroba untuk dimetabolisme (Usha dkk., 2011).

Menurut Chee dkk. (2010), mikroorganisme yang dapat mendegradasi polimer plastik terdapat lebih dari 90 jenis bakteri dan jamur, di antaranya *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas* sp., *Azotobacter*, *Ralstonia eutropha*, *Halomonas* sp., dan sebagainya. Mikrobia yang dapat mendegradasi polimer sintetis berjenis plastik menurut penelitian Mahdiyah dkk (2013) berasal dari bakteri Gram positif dan negatif. Bakteri *Pseudomonas* sp. diketahui mampu mendegradasi plastik sebanyak 8,16% dan memiliki kemampuan

mendegradasi polythene sebanyak 20,54% selama satu bulan inkubasi secara anaerobik (Katherisan, 2003).

Menurut Ebnesajjad (2013), mikrobia yang mampu melakukan biodegradasi terhadap polyester terdiri dari bakteri, fungi, dan kapang dalam keadaan aerob. Bakteri pendegradasi polyester adalah bakteri yang memiliki enzim ekstraseluler *exo-enzyme-type* yang mampu menghidrolisis rantai ester pada struktur polyester. Kemampuan degradasi polyester secara biologi cukup lambat pada suhu ruang. Menurut Kurniali dan Abikusno (2007), suhu ruang memiliki kisaran antara 25-30°C.

I. Hipotesis

Berdasarkan penelitian sebelumnya, dapat diambil hipotesis, yaitu kain spandek adalah kain yang paling banyak mengalami biodegradasi karena terdapat pelapis serat alami dalam proses pembuatannya.