OPTIMASI SENSITIVITAS SENSOR *BENT-OPTICAL FIBER* DENGAN PELAPISAN KITOSAN UNTUK DETEKSI ION KADMIUM

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat

untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

Program Studi Fisika

oleh

Siti Yulia Hanuji

4211412005

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2016

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 2 Agustus 2016

METERAI TEMPEL 6000

Siti Yulia Hanuji

NIM. 4211412005

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Optimasi Sensitivitas Sensor *Bent-Optical Fiber* dengan Pelapisan Kitosan untuk Deteksi Ion Kadmium

disusun oleh

Siti Yulia Hanuji

4211412005

telah dipertahankan dihadapan siding Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada tanggal 2 Agustus 2016.

Ketua

Prof. Dr. Zaenuri S.E, M.Si., Ph.D.
NIP. 19641223 198803 1 001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.
NIP. 196807141996031005

Ketua Penguji

Teguh Darsono S. Pd, M.Si., Ph.D
NIP. 197002112002121001

Anggota Penguji/
Pembimbing I

Dr. Ian Yulianti, S.Si., M. Eng
NIP. 19770701 200501 2 001

Anggota Penguji/
Pembimbing II

Drs. Ngurah Made DP, M.Si., Ph.D.
NIP. 19670217 199203 1 002

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

MOTTO

Do the best and pray. God will take care of the rest.

Stop underestimating yourself.

Masa depan tergantung pada apa yang kita lakukan hari ini (Mahatma Gandhi)

PERSEMBAHAN

Untuk Bapak, Ibu, Kakak dan adik tercinta, Sahabat dan Almamaterku

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'alamin atas segala nikmat iman, Islam, kesempatan, serta kekuatan yang telah diberikan Allah Subhanahuwata'ala sehingga dapat menyelesaikan skripsi sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana sains di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada tuntunan dan suri tauladan Rasulullah Shallallahu'alaihiwasallam beserta keluarga, sahabat, dan umat beliau yang senantiasa menjunjung tinggi nilai-nilai Islam yang sampai saat ini dapat dinikmati oleh seluruh manusia di penjuru dunia.

Terselesaikannya skripsi dngan judul "**Optimasi Sensitivitas Sensor *Bent-Optical Fiber* dengan Pelapisan Kitosan untuk Deteksi Ion Kadmium**" tidak terlepas dari bimbingan, masukan, saran, dan bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan yang berbahagia ini penulis ucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu dan Ayah atas segala doa yang selalu dipanjatkan, semangat yang selalu diberikan, kesabaran yang selalu dicurahkan dan dukungan moril maupun materil yang tak henti-hentinya diberikan.
2. Prof. Dr. Zaenuri, S.E, M.Si,Akt. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

4. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si. selaku Kepala Program Studi Fisika Universitas Negri Semarang.
5. Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang dan dosen pembimbing II yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan,saran dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
6. Dr. Ian Yulianti, M.Eng. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan,saran dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
7. Teguh Darsono S. Pd, M.Si., Ph.D selaku dosen penguji yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan, saran dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
8. Dr. Sulhadi, M.Si. selaku penanggung jawab laboratorium fisika terapan yang telah mengijinkan penelitian di laboratorium fisika terapan.
9. Drs. Imam Sumpono, M.Si. selaku dosen Fisika Unnes yang telah membimbing selama berkegiatan di Laboratorium Fisika Unnes.
10. Sunarno, S.Si. M.Si. selaku koordinator KBK Instrumentasi dan Komputasi Program Studi Fisika Unnes.
11. Asisten Laboratorium Fisika: R. Muttaqin, S.Si., Wasi Sakti Wiwit P., S.Pd., Natalia Erna S., S.Pd., dan Nurseto yang telah membantu selama proses penelitian skripsi ini.

12. Kakak dan adikku, Aji Yulianto, Tri Agustiningsih dan Agung Ruwah Diyanto yang selalu menjadi motivasi dan semangat terbesarku.
13. Teman-teman KBK Instrumentasi dan Komputasi : Esti, Itsnud, Yuni, Okti dan Afif. Terima kasih yang telah memberikan dukungan yang luar biasa serta tambahan pengetahuan dalam penelitian ini.
14. Budi Antoni Saputra yang menjadi teman diskusi dan telah banyak membantu selama mengerjakan penelitian.
15. Rafika Pratiwi, Any Septianti dan Puput Ardiyansah yang telah memberikan semangat, dukungan, doa dan motivasi demi terselesaikannya skripsi ini.
16. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang membantu menyelesaikan skripsi ini. Semoga amal dan budi baiknya mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT.

Semoga Allah yang membalas seluruh kebaikan kalian, Allahumaamin. Dalam penulisan skripsi ini penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, oleh sebab itu dibutuhkan saran, masukan, serta kritikan dalam bentuk apapun yang dapat membangun ke depannya. Semoga laporan penelitian yang sangat sederhana ini dapat bermanfaat bagi masyarakat, pembaca, dan siapapun secara langsung maupun tidak langsung.

Semarang, 2 Agustus 2016

Siti Yulia Hanuji

4211412005

ABSTRAK

Hanuji, S.Y.2016**.** *Optimasi Sensor Bent-Optical Fiber dengan Pelapisan Kitosan untuk Deteksi Ion Kadmium.* Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Ian Yulianti, M.Eng. dan Pembimbing Pendamping Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D.

Kata Kunci : sensor *bent-optical fiber*, sensitivitas, kitosan, ion kadmium.

Polutan ion logam berat telah menjadi masalah serius karena keberadaan ion logam berat ini tidak hanya di sekitar daerah perindustrian tetapi juga telah menyebar ke kawasan yang lebih luas. Salah satu logam berat yang berbahaya adalah kadmium. Kadmium memiliki sifat racun tinggi. Telah difabrikasi sensor *bent-optical fiber* dengan pelapisan kitosan untuk deteksi ion kadmium. Fabrikasi sensor dilakukan dengan cara menggantikan mantel serat optik dengan kitosan menggunakan teknik *dip-coating*. Fabrikasi sensor dibuat dengan ketebalan *coating* yang berbeda yaitu 103,2 µm, 246,6 µm, 479,29 µm dan 553,59 µm. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan ion kadmium dengan konsentrasi 0,1 ppm; 0,2 ppm; 0,3 ppm; 0,4 ppm; 0,5 ppm dan 0,6 ppm. Sensor *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 103,2 memiliki sensitivitas tertinggi yaitu 15,92 dBm/ppm dengan koefisien korelasi 93,6 % dan resolusinya 125×10^{-5} ppm. Semakin tipis lapisan *coating*, sensitivitas sensor *bent-optical fiber* semakin tinggi. Waktu respon sensor dengan ketebalan 103,2 µm lebih cepat sekitar 52,58 detik dibandingkan waktu respon sensor dengan ketebalan 553,59 µm yang membutuhkan 228,6 detik untuk mencapai keadaan stabil pada konsentrasi 0,1 ppm. Semakin tebal lapisan *coating* sensor, semakin lama waktu yang dibutuhkan sensor untuk mencapai keadaan stabilnya. Sensor *bent-optical fiber* dapat mendeteksi ion kadmium hingga konsentrasi 125×10^{-5} ppm dengan sensitivitas yang tinggi dan waktu respon yang cepat.

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL.....i

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN ii

HALAMAN PENGESAHAN.....iii

MOTTO DAN PERSEMBAHAN iv

PRAKATA.....v

ABSTRAK viii

DAFTAR ISI.....ix

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR TABEL.....xiv

DAFTAR LAMPIRAN.....xv

BAB 1 PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang.....1

1. 2 Rumusan Masalah.....5

1. 3 Batasan Masalah 5

1. 4 Tujuan Penelitian 6

1. 5 Manfaat Penelitian 6

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Sensor Optik.....7

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2.1.1 Penjalaran Gelombang dalam Serat Optik 7

2.1.2 Prinsip Kerja Sensor Optik Berbasis Gelombang *Evanescent* 11

2.1.3 Perambatan Gelombang Cahaya dalam *Bent-Optical Fiber* 14

2.1.4 Klasifikasi Sensor Optik 16

2. 2 Kitosan 20

2.2.1 Struktur Kimia Kitosan 20

2.2.2 Sifat Kitosan 21

2. 3 Logam Berat Kadmium 22

2.3.1 Karakteristik Kadmium 22

2.3.2 Sifat Kimia Kadmium 22

2.3.3 Dampak Negatif Kadmium 23

BAB 3 METODE PENELITIAN

3. 1 Alat dan Bahan 25

3. 2 Eksperimen 29

3.2.1 Teknik Fabrikasi Sensor 29

3.2.2 Persiapan Sampel Ion Kadmium 31

3.2.3 Karakterisasi Sensor 32

3.2.4 Data dan Analisis Data 32

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Teknik Fabrikasi Sensor 34

4.1.1 Pelepasan Jaket dan *Coating* Serat Optik 35

4.1.2 Proses Etsa Mantel 35

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

4.1.3 Proses Pembuatan Larutan Kitosan 36

4.1.4 Proses Pelapisan Serat Optik 37

4.2 Karakterisasi Sensor.....39

4.3 Sensitivitas Sensor 40

4.4 Waktu Respon Sensor 46

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan 50

5.2 Saran 51

DAFTAR PUSTAKA 52

LAMPIRAN 58

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Bagian-Bagian Serat optik 8

Gambar 2.2 Skematis perjalanan cahaya dalam serat optik.....9

Gambar 2.3 Peristiwa gelombang *evanescent* pada serat optik 12

Gambar 2.4 Skema medan *evanescent* pada batas inti-mantel 13

Gambar 2.5 Perambatan cahaya pada serat optik lengkung.....15

Gambar 2.6 Profil indeks bias serat optik multimode step index dalam keadaan (a) lurus (b) dilengkungkan.....15

Gambar 2.7 Tipe sensor optik (a) ekstrinsik (b) intrinsik.....17

Gambar 2.8 Struktur kimia dari selulosa, kitin dan kitosan.....21

Gambar 3.1 Diagram alur penelitian.....24

Gambar 3.2 *Fiber optik stripper three hole* 25

Gambar 3.3 *Optical light sorce*.....25

Gambar 3.4 *Optical power meter*.....26

Gambar 3.5 Salah satu jenis konektor serat optik.....27

Gambar 3.6 Kitosan 28

Gambar 3.7 Patchcord ST –ST multimode 28

Gambar 3.8 Logam Kadmium 29

Gambar 3.9 Skematis proses karakterisasi sensor 32

Gambar 4.1 Citra serat optik sebelum dan sesudah *etsa*.....36

Gambar 4.2 Proses pembuatan larutan kitosan 37

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Gambar 4.3 Hasil pengukuran sampel dengan mikroskop CCD (a) sampel A dengan ketebalan *coating* 103,2 µm (b) sampel B dengan ketebalan *coating* 246,6 µm (c) sampel C dengan ketebalan *coating* 479,29 µm (d) sampel D dengan ketebalan *coating* 553,59 µm 38

Gambar 4.4 Serat optik yang telah dipasang konektor tipe ST.....39

Gambar 4.5 Larutan Cd untuk karakterisasi sensor 40

Gambar 4.6 Grafik hubungan antara konsentrasi kadmium terhadap intensitas keluaran sensor dengan ketebalan *coating* 103,2 µm, 246,6 µm, 479,29 µm dan 553,59 µm. 41

Gambar 4.7 Grafik hubungan antara ketebalan *coating* terhadap sensitivitas sensor 45

Gambar 4.8 Waktu respon sensor tebal *coating* 103,2 µm dan 246,6 µm.....47

Gambar 4.9 Waktu respon sensor *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 479,29 µm 48

Gambar 4.10 Waktu respon sensor dengan ketebalan *coating* 553,59 µm.....49

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 4.1 Hasil Fabrikasi Sensor 34

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiranr 1 Data Pengamatan Sensor *Bent-Optical Fiber* 58

Lampiranr 2 Rincian penggunaan persamaan Maxwell dalam penjalaran gelombang dalam serat optik.....60

Lampiranr 3 Surat Penetapan Dosen Pembimbing 65

Lampiranr 4 Surat Tugas Panitia Ujian Sarjana.....66

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Polutan ion logam berat telah menjadi masalah serius karena keberadaan ion logam berat ini tidak hanya di sekitar daerah perindustrian tetapi juga telah menyebar ke kawasan yang lebih luas. Hal ini terjadi karena pencemaran ion logam berat berasal dari hasil pembakaran bahan bakar minyak yang menyebabkan hujan asam sehingga mencemari sumber air. Penyebab lain dari pencemaran ion logam berat seperti ion timbal dan ion kadmium adalah dari saluran pipa air dan juga pemanas air. Material dari saluran pipa air akan tergerus seiring dengan waktu dan menyebabkan residu pada air.

Ion logam berat yang paling banyak ditemukan adalah kadmium (Cd), timbal dan merkuri. Cd adalah salah satu logam berat yang berbahaya karena elemen ini beresiko tinggi terhadap pembuluh darah (Damin, 2011). Cd juga memiliki efek toksik yang tinggi, bahkan pada konsentrasi rendah (Rumahlatu, 2012). Jika manusia terpapar akut oleh Cd menyebabkan gejala *nausea* (mual), muntah, diare, kram otot, anemia, dermatis, pertumbuhan lambat, kerusakan ginjal, hati, gangguan kardiovaskuler, *emphysema* dan degenerasi *testicular*. Perkiraan dosis mematikan akut adalah sekitar 500 mg/kg berat badan untuk dewasa dan efek dosis akan nampak jika terabsorbsi 0,043 mg/kg per hari. Gejala akut keracunan Cd adalah

sesak dada, kerongkongan kering dan dada terasa sesak, nafas pendek, nafas terengah-engah, distress dan bisa berkembang ke arah penyakit radang paru-paru, sakit kepala dan menggigil, bahkan dapat diikuti dengan kematian (Widaningrum dkk, 2007).

Air yang mengandung logam berat jika dikonsumsi akan menyebabkan masalah kesehatan yang serius bagi manusia mengingat ion logam berat bersifat toksik. Konsumsi air minum yang mengandung logam berat yang melebihi kadar aman menyebabkan penyakit yang berbahaya seperti kanker, penyakit jantung, kerusakan otak, gagal ginjal serta gangguan sistem syaraf (Dong et al., 2009;Liu et al., 2009). Pada anak-anak, konsumsi air minum yang mengandung logam berat dapat menimbulkan gangguan pertumbuhan fisik dan mental serta penyakit kronis lainnya (Cho et al., 2012).

Oleh karena sifat ion logam berat kadmium yang membahayakan seperti yang diuraikan di atas, maka pendeteksian ion logam berat kadmium, terutama pada sumber air minum, menjadi hal yang sangat penting. Sensor konvensional biasa digunakan untuk deteksi ion logam berat dengan cara pengukuran laboratorium atau pengukuran titik. Contoh sensor konvensional untuk deteksi ion kadmium adalah menggunakan metode elektrode selektive ion (ESI) kadmium. Kelemahan metode ini yaitu kestabilannya rendah (Purwanto dkk, 2011). Oleh karena itu, pengukuran *in-situ* dengan teknik sistem sensor terdistribusi tidak dapat dilakukan. Monitoring pada kualitas air yang dilakukan secara *real time*, *in-situ* dan terdistribusi dapat menghemat waktu, biaya dan tenaga.

Kelemahan sensor konvensional tersebut diatas dapat diatasi dengan mengunakan sensor serat optik. Kelebihan sensor serat optik dibandingkan dengan sensor yang lainnya adalah ukurannya yang kecil dan ringan serta tahan terhadap gangguan elektromagnetik. Selain itu, sensor serat optik juga tahan pada temperatur dan tekanan tinggi, operasi jarak jauh, kinerja yang sangat baik seperti sensitivitas tinggi dan bandwith yang lebar (Li et al., 2012). Sensor optik telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi seperti untuk pengukuran temperatur, tekanan, dan juga untuk sensor kimia seperti pH dan kelembaban. Kelebihan sensor optik adalah bahwa sensor optik tidak dipengaruhi oleh interferensi elektromagnetik, kompak, dapat digunakan untuk sensor jarak jauh, pengukuran *real time* serta dapat disusun dalam sistem terdistribusi dan termultipleks.

Sensor optik untuk mendeteksi ion logam telah dikembangkan dengan berbagai metode seperti reflektansi (Yusof & Ahmad, 2003; Guillemain et al., 2009), fluoresensi (Mayra et al., 2008; Achatz et al., 2011) dan absorbsi (Balaji et al., 2006; Prabhakaran et al., 2007). Kelemahan dari metode reflektansi adalah desain yang kompleks dan tidak cocok untuk digunakan dalam sistem sensor termultipleks. Metode fluoresensi dilakukan dengan cara melapisi serat optik dengan material yang memiliki sifat fluoresensi. Metode ini cukup menarik karena sensitivitasnya yang tinggi. Namun metode fluoresensi memiliki kelemahan diantaranya proses fabrikasi yang rumit dan biaya yang tinggi.

Metode absorbsi memiliki kelebihan diantaranya proses fabrikasi yang sederhana, namun metode ini memiliki kelemahan dalam hal sensitivitas. Prinsip

sensor optik dengan metode absorbsi ini didasarkan pada fenomena absorbsi gelombang *evanescent* pada batas inti dan mantel serat optik. Ketika kadmium terserap oleh material pengganti mantel maka material tersebut bertambah ukurannya karena pori-pori material terisi kadmium sehingga indeks biasnya akan berubah. Perubahan indeks bias mantel akan menentukan kedalaman penetrasi medan *evanescent*. Penurunan indeks bias mantel akan meningkatkan kedalaman penetrasi sehingga intensitas medan *evanescent* akan menurun (Maddu et al., 2007). Metode absorbsi memiliki kelemahan dalam hal sensitivitas yang rendah. Untuk meningkatkan sensitivitas sensor optik ini digunakan sensor *bent-optical fiber*. Kelebihan sensor *bent-optical fiber* beberapa diantaranya yaitu waktu respon yang cepat, linier, *reversibility* yang bagus dan sensitivitas yang tinggi (Mathew et al., 2012).

Salah satu material yang sensitif terhadap ion logam berat adalah kitosan. Kitosan merupakan suatu amina polisakarida hasil proses deasetilasi kitin. Senyawa ini merupakan biopolimer alam yang penting dan bersifat polikationik sehingga dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti adsorben logam, penyerap zat warna tekstil, bahan pembuatan kosmetik serta agen antibakteri. Sifat biokompatibel, *biodegradable* dan nontoksik yang dimiliki kitosandapat dimanfaatkan di industri ramah lingkungan. Kitosan dapat digunakan sebagai adsorben yang dapat menyerap logam-logam berat, seperti seng (Zn), Cd, tembaga (Cu), timbale (Pb), magnesium (Mg) dan besi (Fe). NH_3^+ dalam kitosan mampu mengabsorbsi logam-logam berat

melalui mekanisme pembentukan khelat dan atau penukar ion (Wiyarsi & Erfan, 2008).

Berdasarkan uraian di atas, dilakukan penelitian tentang sensor serat optik yang dilapisi kitosan untuk mendeteksi ion logam berat di dalam air yang terkontaminasi limbah dengan judul *"Optimasi Sensitivitas Sensor Bent-Optical Fiber dengan Pelapisan Kitosan untuk Deteksi Ion Kadmium"*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah fabrikasi sensor ion logam berat dengan menggunakan *bent-optical fiber*?
2. Bagaimanakah pengaruh variasi ketebalan *coating* terhadap sensitivitas *bent-optical fiber* untuk sensor ion kadmium ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari kesalahan penafsiran terhadap permasalahan dalam penelitian ini, maka perlu diberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Serat optik yang digunakan pada penelitian ini adalah serat optik ragam jamak 50/125 µm
2. Material pengganti mantel adalah kitosan
3. Ion logam berat yang dideteksi yaitu ion kadmium.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan desain sensor ion logam berat yang memiliki sensitivitas tinggi dengan menggunakan *bent-optical fiber.*

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut

1. Bagi Mahasiswa
   a. Memberikan pengalaman tentang sensor *bent-optical fiber*.
   b. Memberikan pengetahuan mengenai proses fabrikasi sensor *bent-optical fiber*.
2. Bagi Industri

   Manfaat dari penelitian ini bagi industri adalah dapat memberikan alternatif dalam monitoring kualitas air.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

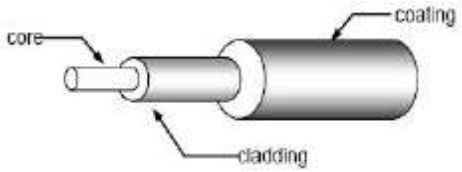
2.1. Sensor Optik

Kelebihan sensor serat optik yaitu tahan pada temperatur dan tekanan tinggi, operasi jarak jauh, sensitivitas tinggi dan *bandwith* yang lebar (Li et al., 2012). Keuntungan lain dari sensor serat optik adalah mudah diaplikasikan dalam beberapa bentuk ukuran kecil berbentuk silinder, sensitivitas tinggi dan mampu untuk konduksi arus (Ghetia et al., 2013).

2.1.1. Penjalaran Gelombang dalam Serat Optik

Serat optik adalah sebuah kaca murni yang panjang dan tipis serta berdiameter dalam ukuran mikro (Setiono,2012). Serat optik terdiri dari 2 bagian, yaitu mantel dan inti seperti pada Gambar 2.1. Mantel merupakan lapisan selubung inti yang mempunyai indeks bias lebih rendah daripada inti, dimana mantel berfungsi memantulkan kembali cahaya yang mengarah keluar dari inti kembali kedalam inti. Cahaya di dalam serat optik sulit keluar karena indeks bias dari kaca lebih besar dari indeks bias udara.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



Gambar 2.1. Bagian-bagian serat optik (Pratomo, 2011)

Serat optik merupakan pemandu gelombang dielektrik yang beroperasi pada frekuensi optis. Serat pemandu gelombang inti berbentuk silinder yang melewatkan energi elektromagnet dalam bentuk cahaya dan memandunya paralel terhadap sumbu serat. Karakteristik struktur serat menentukan kapasitas serat dalam membawa informasi dan mempengaruhi respon pemandu gelombang.

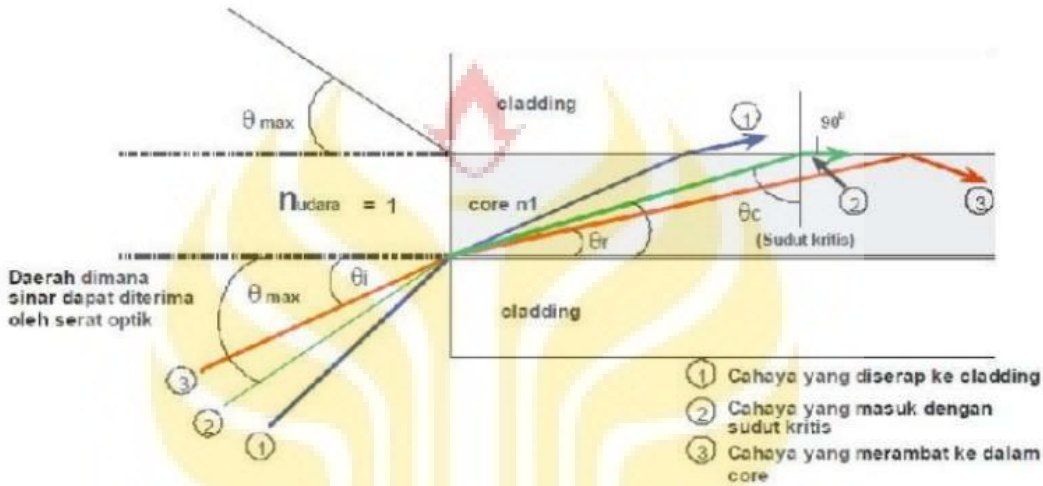
Propagasi cahaya sepanjang pemandu gelombang dapat dideskripsikan sebagai susunan gelombang elektromagnet yang terpandu atau disebut mode pemandu gelombang. Setiap mode merupakan pola garis-garis medan listrik dan medan magnet yang terulang secara interval panjang gelombang sepanjang serat (Surjono, 1993).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Prinsip kerja serat optik adalah pembiasan cahaya yang dijelaskan dalam Hukum Snellius,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \tag{2.1}$$

dimana $n_1$adalah indeks bias inti, θ_1 sudut datang, n_2 indeks bias mantel dan θ_2 sudut pantul. Secara skematis perjalanan seberkas cahaya dalam serat optik dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skematis perjalanan cahaya dalam serat optik

Sebagian sinar yang mengenai bidang batas antara medium satu dengan medium dua akan mengalami pembiasan dan pemantulan. θ_c adalah sudut kritis (persamaan 2.2), sehingga berkas cahaya yang masuk dengan sudut datang lebih besar dari θ_c akan dipantulkan secara sempurna dalam inti. Kondisi inilah yang dipertahan dalam pengiriman cahaya dalam serat optik (Surjono, 1993):

$$\theta_c = arc \sin \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{2.2}$$

Selanjutnya persamaan sinar masuk dari udara menuju ke serat optik sesuai dengan hokum Snellius :

$$n \sin\theta_{max} = n_1 \sin\theta_r \tag{2.3}$$

n adalah indeks bias udara=1.

$$\sin\theta_{max} = ({n_1}^2 - {n_2}^2)^{1/2} \tag{2.4}$$

sin θ_{max} pada serat optik disebut celah numeris atau *numerical aperture* (NA).

Teori gelombang elektromagnetik harus dipertimbangkan untuk memperoleh model propagasi cahaya dalam serat optik. Dasar untuk mempelajari propagasi gelombang elektromagnetik adalah persamaan Maxwell yang secara rinci dapat dilihat pada lampiran 2. Penjalaran gelombang dalam serat optik dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\nabla^2\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} \tag{2.5}$$

Penyelesaian dasar dari persamaan gelombang adalah sebuah gelombang sinus seperti pada persamaan berikut:

$$\psi = \psi_0 \exp \mathrm{j}(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathrm{r}) \tag{2.6}$$

dimana ω adalah frekuensi anguler medan, t adalah waktu, **k** adalah vektor propagasi yang memberikan arah propagasi dan kecepatan perubahan fase terhadap jarak, komponen r khusus titik koordinat di medan yang ditinjau. Persamaan 2.5 untuk

pandu gelombang dalam silinder homogen dapat ditulis dalam bentuk persamaan gelombang skalar sebagai berikut:

$$\frac{\mathrm{d}^2\psi}{\mathrm{d}r^2} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}r} + \frac{1}{r^2}\frac{\mathrm{d}^2\psi}{\mathrm{d}\phi^2} + (n_1^2k^2 - \beta^2)\psi = 0 \tag{2.7}$$

dimana ψ adalah medan (**E** atau **H**), n_1 adalah indeks bias inti serat optik, **k** adalah konstanta propagasi cahaya dalam ruang vakum, serta r dan ϕ koordinat silinder. Konstanta propagasi dari *guided modes* β dalam rentang:

$$n_2k < \beta < n_1k \tag{2.8}$$

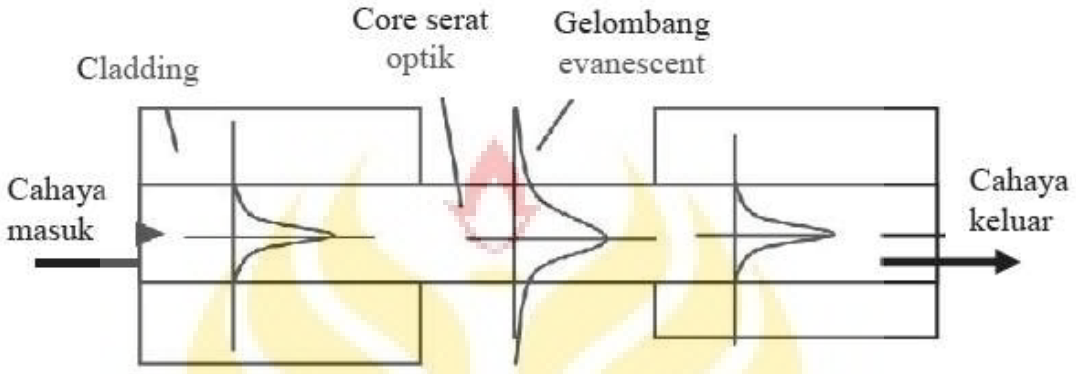
dimana n_2 adalah indeks bias mantel serat optik. Penyelesaian dari persamaan gelombang untuk serat silinder adalah sebagai:

$$\psi = E(r)\left\{\frac{\cos l\phi}{\sin l\phi}\exp(\omega t - \beta z)\right\} \tag{2.9}$$

2.1.2. Prinsip Kerja Sensor Optik Berbasis Gelombang *Evanescent*

Penjalaran sinar dalam serat optik berdasarkan pada prinsip pemantulan internal total (Tanjung, 2013). *Total Internal Reflection* (TIR) adalah fenomena optik saat cahaya sinar menembus batas inti dan mantel dengan sudut datang lebih besar daripada sudut kritis saat ia mengenai batas (Rufaida & Abraha, 2011). Saat terjadi TIR maka gelombang elektromagnetik terbiaskan atau memasuki mantel pada jarak yang kecil dan membentuk medan elektromagnetik yang disebut sebagai gelombang

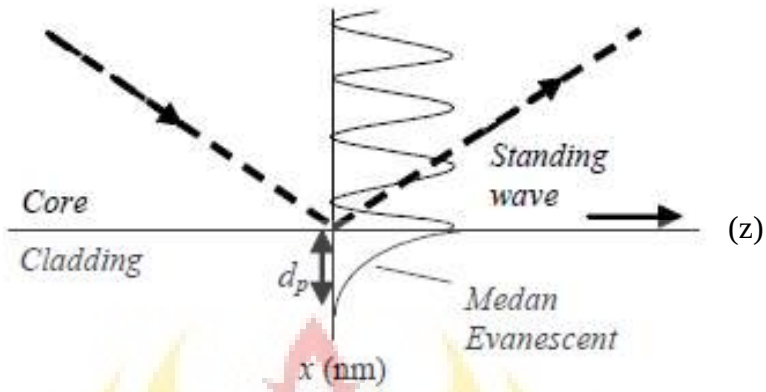
evanescent (Tanjung, 2013). Peristiwa gelombang *evanescent* pada serat optik dapat terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Peristiwa gelombang *evanescent* pada serat optik (Maddu, 2007)

Prinsip sensor serat optik berbasis absorpsi gelombang *evanescent* dijelaskan berikut ini. Medan elektromagnetik tidak mendadak jatuh ke nol pada bidang batas inti-mantel ketika berkas cahaya berpropagasi dalam serat optik. Sebagian kecil berkas cahaya tersebut menembus mantel dan meluruh cepat dalam arah tegak lurus bidang batas. Medan ini dikenal dengan medan *evanescent*. Skema medan *evanescent* pada batas inti-mantel pada serat optik dapat dilihat pada Gambar 2.4.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



Gambar 2.4. Skema medan *evanescent* pada batas inti-mantel

Intensitas medan *evanescent* akan meluruh secara eksponensial dari batas antara inti dan mantel yang dirumuskan sebagai berikut (Tanjung, 2013):

$$I_z = I_0 \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) \tag{2.10}$$

keterangan :I_z = intensitas medan evanescent (W/m^2)

z = jarak penjalaran sinar (µm)

I_0 = intensitas mula-mula (W/m^2)

d_p = *penetration depth*/ kedalaman penetrasi gelombang (µm)

Kedalaman penetrasi medan *evanescent* berhubungan dengan panjang gelombang radiasi λ, sudut datang θ_1 pada bidang batas, dan n adalah n_2 dibagi dengan n_1. Hal ini ditunjukkan pada persamaan berikut (Tanjung, 2013):

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(n_1{}^2 sin^2\theta - n_2{}^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{2.11}$$

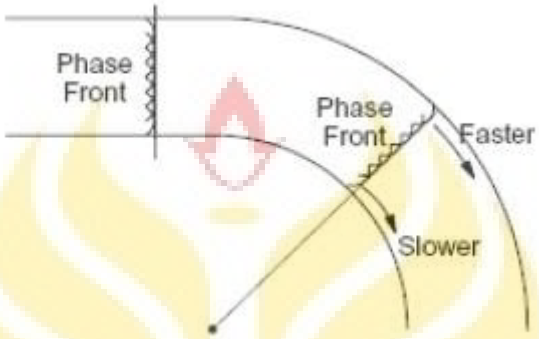
Gelombang cahaya yang memasuki mantelsepanjang d_p akan berkurang secara eksponensial (Tanjung, 2013). Pada persamaan (2.11) dapat diketahui bahwa kedalaman penetrasi gelombang *evanescent* bergantung pada nilai indeks bias mantel relatif terhadap indeks bias inti. Semakin dalam nilai *penetration depth* gelombang *evanescent* semakin kecil nilai intensitas cahaya yang ditransmisikan dalam serat optik (Maddu et al., 2006). Indeks bias mantel berubah ketika mantel menyerap ion logam berat. Perubahan indeks bias mantel akan menentukan kedalaman penetrasi medan *evanescent*. Peningkatan indeks bias mantel akan menurunkan kedalaman penetrasi, sehingga intensitas medan *evanescent* akan menurun (Maddu et al., 2007).

2.1.3. Perambatan Gelombang Cahaya dalam *Bent-Optical Fiber*

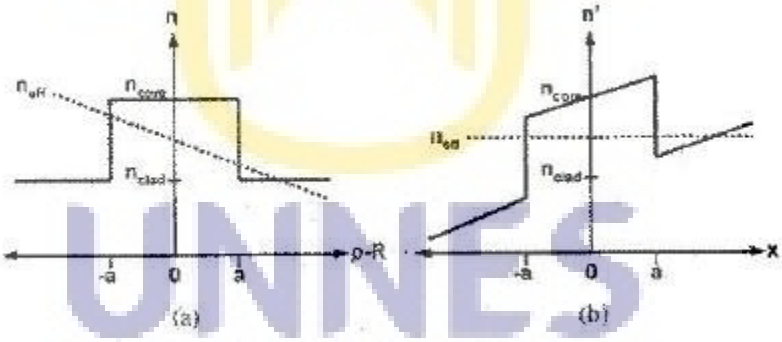
Gelombang cahaya yang merambat didalam inti serat optik akan terdistorsi bila seratnya dilengkungkan (Gambar 2.5). Nilai indeks bias inti serat pada bagian lengkung lebih kecil bila dibandingkan saat serat dalam keadaan lurus. Semakin kecil jari-jari kelengkungan maka nilainya semakin mendekati nilai indeks bias mantel sehingga makin banyak cahaya yang keluar dari inti serat. Profil indeks bias serat saat dilengkungkan berbeda dengan saat serat dalam keadaan lurus dapat dilihat pada Gambar 2.6, nilainya dinyatakan dalam persamaan berikut (Waluyo dkk, 2009):

$$n_{material} = n\left[1 - \frac{n^2 x}{2R}\left(P_{12} - v(P_{11} + P_{12})\right)\right] \qquad (2.12)$$

dengan R adalah jari-jari kelengkungan, x posisi pada arah lengkungan, n nilai indeks bias serat pada saat lurus, v nilai perbandingan Poisson bahan serat, P_{11} dan P_{12} adalah koefisien photoelastik serat.



Gambar 2.5. Perambatan cahaya pada serat optik lengkung



Gambar 2.6. Profil indeks bias serat optik ragam jamak step index dalam keadaan (a) lurus (b) dilengkungkan.

Bila ,*P(0)* adalah daya optis sebelum serat dilengkungkan maka besarnya daya yang keluar dari serat optik yang dilengkungkan sepanjang L adalah (Waluyo dkk, 2009):

$$P(L) = P(0)e^{-\gamma L} \tag{2.13}$$

Dengan γ menyatakan koefisien rugi untuk serat optik ragam tunggal jenis step index yang nilainya dapat didekati oleh persamaan (Waluyo dkk, 2009):

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2\rho}\sqrt{\frac{\rho}{R_c}}\frac{U^2}{V^2 W^{\frac{3}{2}} K_1(W)^2} exp\left\{-\frac{4}{3}\frac{R_C}{\rho}\frac{W^3\Delta}{V^2}\right\} \quad (2.14)$$

Dengan ρ adalah jari-jari inti serat, R_C jari-jari lengkungan serat, Δ parameter beda indeks bias inti dan mantel serat, $K_1(W)$ fungsi Bessel orde pertama untuk nilai W; yang mana W, U, dan V merupakan parameter-parameter serat optik ragam tunggal yang dinyatakan oleh persamaan (Waluyo dkk, 2009):

$$U = \rho[k^2 {n_{co}}^2 - \beta^2]^{1/2} \quad (2.15)$$

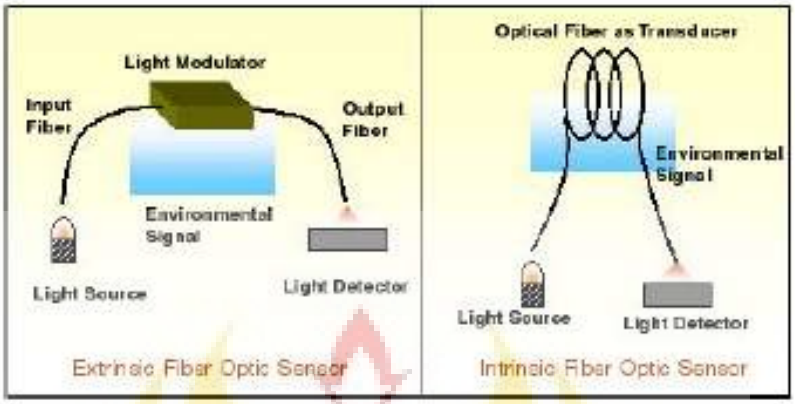
$$V = k\rho n_{co}\sqrt{2\Delta} \quad (2.16)$$

$$W = \sqrt{V^2 - U^2} = \rho[\beta^2 - k^2 {n_{cl}}^2]^{1/2} \quad (2.17)$$

Dengan $k = 2\pi/\lambda$, λ adalah panjang gelombang cahaya, β konstanta perambatan cahaya, n_{co} indeks bias inti serat dan n_{cl} indeks bias mantel (Waluyo dkk, 2009).

2.1.4. Klasifikasi Sensor Optik

Sensor optik diklasifikasikan dalam tiga kategori yaitu berdasarkan lokasi pendeteksian, berdasarkan prinsip kerja dan berdasarkan aplikasinya (Ghetia et al., 2013; Fidanboylu &Efendioglu, 2009). Berdasarkan lokasi pendeteksian, sensor optik terbagi menjadi intrinsik dan ekstrinsik.



(a) (b)

Gambar 2.7. Tipe sensor optik (a) ekstrinsik (b) intrinsik

1. Ekstrinsik

Dalam sensor serat optik ekstrinsik (gambar 2.7(a)), serat digunakan untuk membawa cahaya ke dan dari peralatan optik eksternal dimana pendeteksian dilakukan. Dalam kasus ini, serat optik hanya memberikan cahaya ke lokasi pendeteksian (Fidanboylu &Efendioglu, 2009).

2. Intrinsik

Dalam sensor serat optik intrinsik (Gambar 2.7(b)), sifat internal serat optik mengkonversi perubahan sinyal lingkungan kedalam sinyal cahaya (Ghetia et al., 2013).

Berdasarkan prinsip kerja, sensor optik terbagi menjadi sensor optik berbasis intensitas, fase, panjang gelombang dan polarisasi.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

1. Sensor serat optik berbasis intensitas

Sensor serat optik berbasis intensitas dikaitkan dengan beberapa sinyal yang hilang selama proses penjalaran dalam serat optik. Alat ini dibuat untuk mengubah sesuatu besaran menjadi suatu besaran yang terukur saat serat mengalami *bending* yang menyebabkan pelemahan sinyal. Penyebab lain terjadinya pelemahan sinyal yaitu proses *absorpsi* atau *scattering*. Perubahan intensitas dapat terjadi akibat mikrobending serat optik. Pendeteksian mikro *bending* pada suatu lokasi dapat dilakukan dengan menggunakan OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) sehingga dapat diketahui posisi terjadinya *bending* pada serat optik (Pratomo, 2011).

2. Sensor serat optik berbasis panjang gelombang

Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan panjang gelombang cahaya. Jenis sensor berbasis panjang gelombang diantaranya adalah sensor fluoresensi (Elosua et al., 2006), *Bragg grating sensors* (Yulianti, 2013) dan *black body sensors* (Ghetia et al., 2013).

3. Sensor fiber optik berbasis fase

Prinsip kerja dari sensor serat optik ini adalah mendeteksi adanya perubahan fase pada cahaya. Fase optikal cahaya yang melalui fiber optik termodulasi dengan medan untuk mendeteksi parameter yang akan diukur. Modulasi fase ini kemudian dideteksi secara interferometer dengan cara membandingkan fase cahaya dalam sinyal serat terhadap serat acuan. Dalam interferometer, cahaya menjadi dua berkas, satu berkas digunakan sebagai serat acuan. Satu berkas berinterferensi dengan berkas

cahaya lain (Fidanboylu &Efendioglu, 2009). Contoh dari sensor jenis ini yaitu sensor interferometer mach zehnder (Herdiyanto, 2007).

4. Sensor fiber optik berbasis polarisasi

Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip polarisasi. Ada banyak tipe polarisasi seperti linear, eliptikal dan lingkaran. Dalam keadaan polarisasi linear, arah medan listrik selalu pada garis yang sama selama propagasi cahaya. Dalam keadaan polarisasi eliptikal, arah medan listrik berubah selama propagasi cahaya dan jejak dari polarisasi memungkinkan medan listrik akan berbentuk elips (Ghetia et al., 2013).

Berdasarkan aplikasinya, sensor optik terbagi menjadi *chemical sensor*, *physical sensor*, *bio-medical sensor*.

1. *Physical sensors*

Sensor ini digunakan untuk mengukur sifat fisis seperti temperatur (Remouche et al., 2012; Mahdikhani & Bayati, 2008), kelembaban (Maddu et al., 2006; Mathew et al., 2012), stress (Mahdikhani & Bayati, 2008), berat beban berjalan (Setiono, 2013), putaran (Fitalia et al., 2014) dan lain-lain.

2. *Chemical sensors*

Sensor ini digunakan untuk pengukuran pH, uap ammonia (Qazi et al., 2012), studi spektroskopik, analisis gas (Li et al., 2012), dan lain-lain.

3. *Bio-medical sensors*

Sensor ini digunakan dalam pengukuran aliran darah, glukosa (Qiu et al., 2015), dan lain-lain.

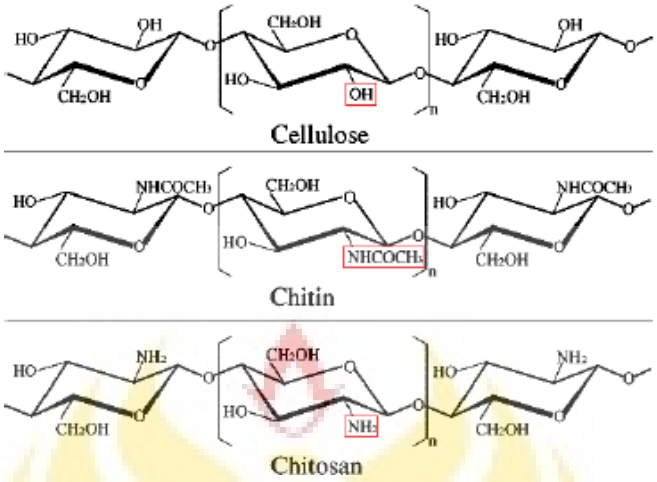
UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2.2. Kitosan

Kitosan adalah turunan dari kitin, merupakan penyusun kulit hewan-hewan krustasea, seperti udang, kerang, dan juga beberapa eksoskaleton dari serangga serta dinding sel dari beberapa jenis fungi. Kitosan sangat mudah didapat dari hewan krustasea seperti kepiting, udang, lobster dan kulit udang karang. Cangkang hewan krustasea mengandung 30-40% protein, 30-50% kalsium karbonat dan kalsium fosfat, dan 20-30% kitin. Asal dari kitin dan kitosan akan mempengaruhi berat molekul, kemurnian dan morfologi kristal kitin dan kitosan tersebut.

2.2.1. Struktur Kimia Kitosan

Struktur kimia kitosan hampir sama dengan struktur kimia selulosa (Wang et al., 2016). Secara kimiawi, kitosan merupakan polisakarida linear yang berupa β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose dimana strukturnya mirip dengan glikosaminoglikan. Secara rinci, kitosan adalah hetero polimer antara glukosamina yang berikatan dengan polimer β-1,4 dan mengandung N-asetil-glukosamina yang lebih sedikit. Sedangkan kitin, terdiri atas rantai linear gugus asetil-glukosamina. Pada Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa selulosa adalah homo-polimer, sedangkan kitin dan kitosan adalah hetero-polimer. Perbedaan ini dapat dilihat pada posisi C-2, dimana kitosan yang memiliki gugus amina ($-NH_2$), kitin yang memiliki gugus $-NHCOCH_3$ dan selulosa yang memiliki gugus hidroksil (-OH).



Gambar 2.8. Struktur kimia dari selulosa, kitin dan kitosan

2.2.2. Sifat Kitosan

Kitosan telah diteliti sebagai penyerap ion logam berat termasuk ion kadmium (Hasan et al., 2006). Kitosan merupakan produk biologis yang bersifat kationik, nontoksik, biodegradabel dan biokompatibel. Kitosan memiliki gugus amino yang relatif lebih banyak dibandingkan kitin sehingga lebih nukleofilik dan bersifat basa. Semakin rendah pH larutan maka kecepatan absorbs akan semakin menurun dan membutuhkan waktu yang lama untuk absorbsi ion logam berat (Delmara &Bianco-Peled, 2015). Kitosan tidak larut dalam air dan beberapa pelarut organik seperti dimetilsulfoksida, dimetilformamida dan piridin. Kitosan larut dalam asam organik encer melalui protonasi gugus amino bebas pada pH kurang dari 6,5. Pelarut yang baik untuk kitosan adalah asam format, asam asetat dan asam glutamat.

2.3. Logam Berat Kadmium

Logam berat adalah unsur unsur kimia dengan bobot jenis lebih besar dari 5 gr/cm^3 mempunyai afinitas yang tinggi terhadap unsur Sulfur (S) dan biasanya bernomor atom 22 sampai 92 (Gumpu et al., 2015). Ion logam berat yang paling banyak ditemui dan merupakan pencemar berbahaya adalah Cd, Pb dan merkuri (Hg). Afinitas yangtinggi terhadap unsur S menyebabkan logam ini menyerang ikatan belerang dalam enzim, sehingga enzim bersangkutan menjadi tak aktif. Kadmium, timbal, dan tembaga terikat pada sel-sel membran yang menghambat proses transformasi melalui dinding sel. Logam berat juga mengendapkan senyawa fosfat biologis atau mengkatalis penguraiannya.

2.3.1. Karakteristik Kadmium

Logam Cd merupakan salah satu jenis logam berat yang berbahaya karena elemen ini beresiko tinggi terhadap pembuluh darah (Damin, 2011). Logam Cd merupakan logam berat yang paling banyak ditemukan pada lingkungan khususnya lingkungan perairan serta memiliki efek toksik yang tinggi, bahkan pada konsentrasi rendah (Rumahlatu, 2012).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2.3.2. Sifat Kimia Kadmium

Kadmium adalah logam berwarna putih perak, lunak, mengkilap, tidak larut dalam basa, mudah bereaksi serta menghasilkan Kadmium Oksida bila dipanaskan. Kadmium umumnya terdapat dalam kombinasi dengan klor atau belerang. Kadmium membentuk ion Cd (Cd^{2+}) yang bersifat tidak stabil. Cd memiliki nomor atom 40,

berat atom 112,4, titik leleh 321^0C, titik didih 767^0C dan memiliki masa jenis 8,65 g/cm^3. Logam Cd memiliki karakteristik berwarna putih keperakan seperti logam alumunium, tahan panas, tahan terhadap korosi. Logam ini banyak digunakan untuk elektrolisis, bahan pigmen untuk industri cat, enamel dan plastik. Logam Cd didapat pada industri alloy, pemurnian Zn, pestisida, dan lain-lain (Istarani & Pandebesie, 2014).

2.3.3. Dampak Negatif Kadmium

Ion logam berat dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan kanker, bahaya sistem syaraf pusat dan sebagainya (Wang et al., 2016). Cd merupakan salah satu ion logam berat yang sangat berbahaya untuk kesehatan manusia karena elemen ini beresiko tinggi terhadap pembuluh darah. Waktu paruh Cd 10-30 tahun. Akumulasi pada ginjal dan hati 10-100 kali konsentrasi pada jaringan yang lain (Widaningrum dkk, 2007). Cd dapat menyebabkan berbagai macam penyakit diantaranya kanker pankreas (Schwartz & Reis, 2000), kerusakan ginjal dan pembengkakan paru-paru (Purnomo & Purwana, 2008). Gejala yang timbul akibat terpapar Cd berupa mual, muntah, diare, kram otot, anemia, dermatitis, pertumbuhan lambat dan degenerasi *testicular*. Batas dosis maksimal sekitar 500 mg/kg berat badan untuk manusia dewasa dan efek dosis akan nampak jika terabsorbsi 0,043 mg/kg per hari. Gejala akut kercunan Cd berupa sesak dada, nafas terengah-engah bahkan dapat diikuti dengan kematian (Widaningrum dkk, 2007).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

BAB 5

PENUTUP

5.1 Simpulan

Sensor *bent-optical fiber* untukdeteksi ion kadmium telah difabrikasi dengan mengganti bagian mantel serat optik. Kitosan adalah material pengganti mantel yang sensitif terhadap ion kadmium. Pelapisan kitosan dilakukan dengan menggunakan teknik *dip coating*. Sensor *bent-optical fiber* dibuat dengan empat variasi ketebalan *coating* yaitu 103,2 µm, 246,6 µm, 479,29 µm dan 553,59 µm.

Berdasarkan hasil karakterisasi, nilai sensitivitas *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 103,2 µm adalah 15,92 dBm/ppm dengan koefisien korelasinya sebesar 93,6 %. Selanjutnya, nilai sensitivitas sensor dengan ketebalan *coating* 246,6 µm adalah 13,08 dBm/ppm dengan koefisien korelasi 91,6 %. Nilai sensitivitas sensor dengan ketebalan *coating* 479,29 µm adalah 10,7 dBm/ppm dengan koefisien korelasinya sebesar 96,9 %. Sementara itu, sensor dengan ketebalan *coating* 553,59 µm memiliki sensitivitas 8,145 dBm/ppm dengan koefisien korelasi 89,4 %. Semakin tipis lapisan *coating*, sensitivitas sensor *bent-optical fiber* semakin tinggi.

Waktu respon sensor *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 103,2 µm lebih cepat dibandingkan sensor *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 246,6 µm yaitu 52,58 detik sampai 126,74 detik. Pada konsentrasi 0,1 ppm, sensor *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 479,29 µm memerlukan waktu 186 detik untuk

mencapai keadaan stabilnya. Semakin tebal lapisan *coating* maka semakin lama waktu respon sensor mencapai keadaan stabilnya.

Dengan menggunakan OPM yang beresolusi 0,02 dBm dapat diketahui resolusi setiap sensor. Sensor dengan ketebalan *coating* 103,2 µm dapat mendeteksi kadmium mulai dari 125×10^{-5} ppm. Sedangkan sensor dengan tebal *coating* 246,6 µm memiliki resolusi 153×10^{-5} ppm. Sensor dengan tebal *coating* 479,29 µm dan 553,59 µm masing-masing memiliki resolusi 187×10^{-5} ppm dan 245×10^{-5} ppm. Sensor *bent-optical fiber* dengan ketebalan *coating* 103,2 µm memiliki resolusi yang paling tinggi karena dapat mendeteksi kadmium dari konsentrasi125×10^{-5} ppm. Batas maksimum kadar kadmium dalam air minum menurut *World Health Organization* adalah 500×10^{-5} ppm, sehingga sensor *bent-optical fiber* yang telah difabrikasi dapat berfungsi dengan baik.

5.2 Saran

Mengacu pada hasil akhir karakterisasi dan pembahasan diatas, penelitian ini masih harus disempurnakan. Oleh karena itu untuk penelitian selanjutnya disarankan dapat diperbaiki pada proses fabrikasi (teknik *coating*), pemasangan konektor dan karakterisasi. Perbaikan sensor perlu dilakukan untuk memperoleh sensor dengan sensitivitas lebih tinggi, *repeatibility* (keberulangan) dan waktu respon yang lebih cepat. Untuk eksperimen selanjutnya dapat dibuat sensor *bent-optical fiber* dengan variasi kelengkungan pada ketebalan *coating* yang sama

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR PUSTAKA

Achatz, D. E., Ali, R., Wolfbeis, O. S. 2011. Luminescent chemical sensing, biosensing, and screening using upconverting nanoparticles. *Top Current Chemistry*, 300: 29 –50.

Assefa, D., E. Zera, R. Campostrini, G. D. Soraru & C. Vakifahmetoglu. 2016. Polymer-Derived SiOC Aerogel with Hierarchical Porosity through HF Etching. *Ceramics International.*

Balaji, T., Sasidharan, M., Matsunaga, H. 2006. Naked eye detection of cadmium using inorganic–organic hybrid mesoporous material. *Analytical Bioanalytical Chemistry*, 384: 488-494.

Boamah, P. O., Huang, Y., Hua, M., Zhang, Q., Liu, Y., Onumah, J., Wang, W., and Song, Y. 2015. Removal of Cadmium from Aqueous Solution Using Low Molecular Weight Chitosan Derivatif. *Carbohydrate Polymers*, 122: 255-264.

Cho, E. S., Kim, J., Tejerina, B., Hermans, T. M., Jiang, H., Nakanishi, H. 2012. Ultrasensitive detection of toxic cations through changes in the tunnelling current across films of striped nanoparticles. *Nature Materials*, 11: 978–985.

Damin, H., Liong,S., dan Kasim, A. H. 2011. *Analisis Logam Berat Timbal dan Kadmium dalam Kerang yang Beredar di Pasar Tradisional Kotamadya Makassar*. Laporan Penelitian. Sulawesi Selatan: Universitas Hasanuddin Makassar.

Delmara, K. & Bianco-Peled, H. 2015. The dramatic effect of small pH changes on the properties of chitosan hydrogels crosslinked with genipin. *Carbohydrate Polymers*, 127: 28-37.

Dong, Z., Wang, L., Xu, J., Li, Y., Zhang, Y., Zhang, S., et al. 2009. Promotion of autophagy and inhibition of apoptosis by low concentrations of cadmium in vascular endothelial cells. *Toxicology in Vitro*, 23: 105–110.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Elosua, C., Matias, I.R., Bariain, C., Arregui, F.J. 2006. Volatile organic compound Optical Fiber Sensors: A Review. *Sensors*, 6:1440-1465.

Fidanboylu, K., and Efendioglu, H.S. 2009. Fiber optic sensors and their applications. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*. Turki: Universitas Karabok.

Fitalia, I., Prasetyo, E., dan Marzuki, Ahmad. Studi awal pembuatan sensor putaran berbasis fibe optik.*Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

Ghetia, Shivang., Gajjar Ruchi. and Trivadi, Pujal. 2013. Classification of fiber optical sensors. *International Journal of Electronics Communication and Computer Technologi (IJECCT)*, 3(4): 442-445.

Ghozali, E.K., Mohtar Yunianto, & Nuryani. 2014. Kajian Rugi-Rugi Akibat *Macrobending* pada Serat Optik Plastik Berbasis PC. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 4(1): 43-54.

Guillemain, H., Rajarajan, M., Sun, T., Grattan, K. T. V. 2009. A self-referenced reflectance sensor for the detection of lead and other heavy metal ions using optical fibres. *Measurement Science Technology*, 20: 045207.

Gumpu, M. B., Sethuraman, S., Krishnan, U. M. and Rayappan, J. B. 2015. A review on detection of heavy metal ions in water- An electrochemical approach. *Sensors and Actuators B*, 213:515-533.

Hanafiah R, Ali. 2006. Teknologi Serat Optik. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 7(1): 87-91.

Hasan, Shameem., Krishnaiah, A., Ghosh, T.K. and Viswanath, D.S. 2006. Adsorption of divalent cadmium Cd(II)) from aqueous solutions onto chitosan-coated perlite beads. *Ind. Eng. Chem. Res*., 45(14): 5066-5077.

Herdiyanto. 2007. Interferometer Mach zehnder sebagai Sensor Serat Optik. *Techne Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 6(1): 17-30.

Indra, A. T. dan Harmadi.2014. Karakterisasi Sistem Sensor Serat Optik Berdasarkan Efek Gelombang *Evanescent*. *Jurnal Fisika Unand*, 3(1): 8-13.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Istarani, F., dan Pandebesie, E. S. 2014.Studi Dampak Arsen (As) dan Kadmium (Cd) terhadap Penurunan Kualitas Lingkungan. *Jurnal Teknik Pomits*, 3(1): 53-58.

Kholilah, R Ayu. 2008. *Study Awal Fiber Optik sebagai Sensor Ph*. Laporan Penelitian. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.

Li, X., Yang, Chao., Yang, S., and Li, Guozheng. 2012. Fiber-optical sensors: basics and applications in multiphase reactors. *Sensors*, 12:12519-12544.

Liu, J., Qu, W., & Kadiiska, M. B. 2009. Role of oxidative stress in cadmium toxicity and carcinogenesis. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238: 209–214.

Maddu, A., Modjahidin, K., Sardy, S., and Zain, Hamdani. 2006. Pengembangan Probe Sensor Kelembaban Serat Optik dengan *Cladding* Gelatin. *MAKARA, TEKNOLOGI*, 10(1): 45-50.

Maddu, A., Zain, H., Aminuddin, A., and Wahyudi, S. T. 2007. Nanoserat Polianilin sebagai *Cladding* Termodifikasi pada Sensor Serat Optik untuk Deteksi Uap Aseton. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 9(3): 220-225.

Mahdikhani, M., and Bayati, Z. 2008. Application and development of fiber optic sensors in civil engineering. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Iran: Universitas Teknologi Amirkabir.

Mathew, J., Semenova, Y., Farrell, G. 2012. A fiber bend based humidity sensor with a wide linear range and fast measurement speed. *Sensors and Actuators A: Physical*, 174:47-51.

Mayra, T., Klimant, I., Wolfbeis, O. S., Werner, T. 2008. Dual lifetime referenced optical sensor membrane for the determination of copper (II) ions. *Analytical ChimicaActa*, 462: 1 - 10.

Muthukrishnan, K., M. Vanaraja, S. Boomadevi, R. K. Karn, V. Singh, P. K. Singh & K. Pandiyan. 2016. Studies on Acetone Sensing Characteristics of ZnO Thin Film Prepared by Sol-Gel Dip Coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 673: 138-143.

Prabhakaran, D., Nanjo, H., Matsunaga, H. 2007. Naked eye sensor on polyvinyl chloride platform of chromo-ionophore molecular assemblies: A smart way

for the colorimetric sensing of toxic metal ions. *Analytical ChimicaActa*, 601: 108 - 117.

Pramono, N.Y., H. Kuswanto, & N. Kadarisman.2012. Pengaruh Lekukan Bertekanan pada Serat Optik Plastik terhadap Pelemahan Intensitas Cahaya. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Pendidikan dan Penerapan MIPA*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

Pratomo, D. 2011. *Pemanfaatan Prinsip Kerja Sensor Serat Optik Pergeseran Mikro untuk Mendesain Alat Ukur Massa*. Skripsi. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.

Purnomo, A. & R. Purwana. 2008. Dampak Cadmium dalam Ikan terhadap Kesehatan Masyarakat. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*, 3(2): 89-96.

Purwanto, A., Ernawati, F., Sajima. 2011. Karakterisasi Elektroda Selektif Ion Kadmium untuk Pengujian Cd dalam Zirkonium. *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*. Yogyakarta: Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN.

Qazi, H.H., Mohammad, A.B., and Akram, Muhammad. 2012. Recent progress in optical chemical sensors. *Sensors*, 12: 16522-16556.

Qiu, H.W., Xu, S.C., Li, Z., Chen, P.X., Gao, S.S., Zhang, C., Feng, D.J. 2015. A novel graphene-based tapered optical fiber sensor for glucose detection. *Applied Surface Science*, 329: 390-395.

Remouche, M., Georges, F., and Meyrueis, Patrick. 2012. Flexible optical waveguide bent loss attenuation effects analysis and modeling application to an intrinsic optical fiber temperature sensor. *Optics and Photonics Journal*, 2: 1-7.

Rufaida, A. S. R., dan Abraha, K. 2011. Pengamatan Fenomena *Surface Plasmon Resonance* (SPR) pada Permukaan Lapisan Tipis Perak Menggunakan Laser dengan Panjang Gelombang Berbeda dalam Konfigurasi Kretschmann. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXV HFI Jateng & DIY*. Yogyakarta: FMIPA Universitas Gajah Mada.

Rumahlatu, D., Intibima, A. D., Amin, M., dan Rachman, F. 2012. Kadmium dan efeknya terhadap ekspresi protein metallothionein pada *Deadema setosum* (Echinoidea; Echinodermata). *Jurnal Penelitian Perikanan*, 1(1): 26-35.

Savitri, E., S.R. Juliastuti, A. Handaratri, Sumarno & A. Roesyadi. 2014. Degradation of Chitosan by Sonication in Very-Low-Concentration Acetic Acid. *Polymer Degradation and Stability*, 110: 344-352.

Schwartz, G. G. and I. M. Reis. 2000. Hypothesis: Is Cadmium a Cause of Human Pancreastic Cancer?. *Cancer Epidemology, Biomarkers & Prevention*, 9: 139-145.

Setiono, A., Hanto, D., dan Widiatmoko, B. 2013. Investigasi sensor serat optik untuk aplikasi sistem pengukuran berat beban berjalan *(Weight in motion system). TELAAH Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 31(1): 81-86.

Setiono, A., Widiyatmoko, B., dan Mulyanto, I. 2012. Kajian Mikrobending sebagsi Sensor Beban Berbasis Serat Optik Ragam jamak. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY*. Tangerang Selatan: Group THz-Photonics, Pusat Penelitian Fisika-LIPI.

Surjono, H. D. 1993. Pemakaian Serat Optik dalam Komunikasi. *Cakrawala Pendidikan tahun XII*, 3: 61-70.

Tanjung, W. 2013. *Pengembangan sensor larutan gula berbasis absorbs gelombang evanescent pada serat optik*. Skripsi. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Waluyo, T.B., Bayuwati, D. dan Widiyatmoko, B. 2009. Karakterisasi Rugi Lengkungan Serat Optik dengan *Optical Time Domain Reflectometer* untuk Penggunaannya sebagai Sensor Pergeseran Tanah. Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia, 9 (2):34-42.

Wang, J., Wang, L., Yu, H., Zain-ul-Abidin, Chen, Y., Chen, Q., Zhou, W., Zhang, H. and X Chen. 2016. Recent Progress on Synthesis, Property and Application of Modified Chitosan: An Overview. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88:333-344.

Widaningrum, Miskiyah dan Suismono.2007. Bahaya Kontaminasi Logam Berat dalam Sayuran dan Alternatif Pencegahan Cemarannya. *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian*, 3: 16-27.

Wiyarsi, Antuni. & Erfan Priyambodo.2008. *Pengaruh Konsentrasi Kitosan dari Cangkang Udang terhadap Efisiensi Penyerapan Logam Berat*. Laporan Penelitian Jurusan Pendidikan Kimia. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

Yulianti, I., Supa'at, A. S. M., Kurdi, O. and Anwar, M. R. S. 2012. Sensitivity improvement of a fibre bragg grating Ph sensor with elastomeric coating. *Measurement Science and Technology*, 23:1-7.

Yusof, N. A., Ahmad, M. 2003. A flow-through optical fibre reflectance sensor for the detection of lead ion based on immobilized gallocynine. *Sensors and Actuators B*,94: 201 – 209.

Zhang, G., Qu, R., Sun, C., Ji, C., Chen, H., Wang, C. and Y. Niu. 2008. Adsorption for Metal Ions of Chitosan Coated Cotton Fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, 110: 2321-2327.

Zhang, L., Zeng, Y. and Z. Cheng. 2016. Removal of Heavy Metal Ions Using Chitosan and Modified Chitosan: A Review. *Journal of Molecular Liquids*, 214: 175-191.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG