
SENSOR SERAT OPTIK DENGAN CLADDING POLIANILIN NANOSTRUKTUR UNTUK MENDETEKSI UAP HCl

Akhiruddin Maddu¹, Sar Sardy², Hamdani Zain²

¹Departemen Fisika FMIPA, Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680

²Program Studi Optoelektroteknika dan Aplikasi Laser, Fakultas Teknik

Universitas Indonesia, Depok

Email: akhirmaddu@ipb.ac.id

ABSTRAK

Telah dikembangkan sistem sensor serat optik untuk mendeteksi uap HCl, dengan polianilin nanostruktur (nanofiber) sebagai cladding sensitif pengganti cladding asli serat optik. Mekanisme transduksinya didasarkan pada perubahan sifat optik cladding polianilin nanostruktur ketika berinteraksi dengan uap HCl, sehingga absorpsi gelombang evanescent berubah. Polianilin nanostruktur berbentuk nanoserat disintesis dengan metode polimerisasi interfasial. Sifat optik polianilin memperlihatkan perubahan spektrum absorpsi spesifik terhadap perlakuan uap HCl. Pasta polianilin dilapiskan pada bagian inti serat optik plastik sepanjang 2 cm yang telah dilepas cladding aslinya, sebagai elemen pengindera. Uji respon sensor serat optik terhadap uap HCl dilakukan dengan mengukur intensitas cahaya yang melewati elemen sensor (probe), data intensitas diambil terhadap waktu secara real-time berbasis komputer. Kurva siklus respon sensor diperoleh dengan cara memasukkan dan mengeluarkan bagian sensing ke dalam wadah uap HCl secara berulang. Hasil uji respon berupa kurva siklus nilai intensitas terhadap waktu menampilkan karakteristik bagian respon dan pemulihan (recovery). Dari kurva siklus respon tersebut diperoleh waktu respon dan waktu pemulihan yang sangat singkat yaitu sekitar 18 detik. Sensor serat optik ini memiliki kemampuan pembalikan (reversibility) dan pengulangan (repeatability) yang baik pula.

Kata kunci: Sensor serat optik, gelombang evanescent, polianilin nanostruktur, uap HCl.

ABSTRACT

Fiber-optic sensor for detection of HCl vapor has been developed, where the origin cladding of fiber-optic was replaced with nanostructure polyaniline as sensitive cladding. Transduction mechanism was based on changes of optical properties of nanostructure polyaniline cladding when interacts with HCl vapor, so the absorption of evanescent wave was changes. Nanostructure polyaniline in nanofiber form was synthesized by interfacial polymerization. Optical properties of polyaniline show a change of specific optical absorption when exposed with HCl vapor. Polyaniline paste was coated onto core surface of uncladded fiber optic as long 2 cm, as a sensing element. Sensor response to HCl vapor was tested by measuring intensity of light transmitted through sensing element, intensity versus time was real-time acquired using computer. Cyclic response curve of the sensor was obtained by inserting and withdrawing the sensing element into and out from HCl vapor container repeatedly. The test result of response be a cyclic curve of intensity versus time shows a set of response and recovery region. Regarding the curve of the response cycle was determined a response and recovery time very short time, it about of 18 second. The sensor has a good reversibility and repeatability.

Keywords: Fiber-optic sensor, evanescent wave, nanostructure polyaniline, HCl vapor

I. PENDAHULUAN

Uap-uap kimia telah dikenal sebagai komponen pencemar udara, khususnya di dalam ruang-ruang tertentu seperti laboratorium kimia dan industri-industri kimia. Beberapa uap kimia bersifat beracun dan dapat membahayakan (hazards) bagi makhluk hidup dalam konsentrasi diatas ambang, seperti uap-uap asam, hidrokarbon, dan bahan-bahan organik lainnya. Secara khusus, uap-uap kimia seperti amonia, alkohol, asam-asam kuat, kloroform, hidrazin, dsb. dapat sangat membahayakan kesehatan manusia [1,2]. Karena aspek bahaya yang dapat ditimbulkan oleh uap-uap kimia tersebut, maka pengembangan sistem pendeteksian uap-uap kimia pada tempat-tempat berbahaya perlu dilakukan. Metode deteksi uap kimia yang biasa digunakan meliputi metode spektroskopi dan kromatografi, namun metode ini relatif mahal dan tidak *real-time*, tidak *in-situ*, dan butuh waktu lama dalam proses pendeteksian. Metode lain adalah dengan sistem sensor menggunakan bahan-bahan yang sensitif uap-uap kimia yang akan dideteksi, baik dengan metode optik maupun metode elektronik termasuk elektrokimia, metode-metode ini dapat dirancang untuk pengukuran *real-time* dan *in-situ*. Metode optik diyakini lebih menguntungkan karena beberapa hal, diantaranya lebih presisi, noise rendah, dan dapat dirancang untuk pengukuran jarak jauh (remote) diantaranya dengan menggunakan serat optik [2].

Sejauh ini berbagai penelitian tentang sensor optik telah dikembangkan untuk mendeteksi uap-uap kimia berbahaya, prinsip dan konfigurasinya sangat variatif, diantaranya berbasis serat optik. Pengembangan sensor uap kimia berbasis serat optik memiliki kelebihan diantaranya pengukuran (pendeteksian) dapat dilakukan pada jarak jauh (remote), *real-time*, *in-situ*, serta yang paling penting adalah sinyal optik yang digunakan tidak terganggu oleh medan elektromagnet sehingga noise lebih rendah.

Pada penelitian ini dikembangkan sistem sensor serat optik untuk mendeteksi uap kimia HCl berdasarkan fenomena absorpsi gelombang *evanescent* pada bidang batas (interface) inti-*cladding* serat optik. Untuk tujuan ini dilakukan modifikasi *cladding* pada elemen sensing dengan mengganti *cladding* asli serat optik dengan *cladding* baru yang sensitif uap kimia yang akan dideteksi. Dalam rancangan ini digunakan bahan polianilin yang sensitif uap HCl sebagai *cladding* pengganti. Seperti telah umum diketahui bahwa polianilin sebagai bahan polimer konduktif memiliki karakteristik yang unik, yaitu dapat mengalami perubahan sifat listrik dari keadaan isolator (non-konduktif) menjadi konduktor (atau semikonduktor) berdasarkan tingkat protonasi pada bahan polianilin tersebut. Seiring perubahan sifat listrik (konduktivitas) juga mengalami perubahan sifat optik (indeks bias dan absorpsivitas) berdasarkan kondisi protonasi dan perubahan struktur kimianya [3]. Sejauh ini bahan

polianilin telah banyak dikembangkan sebagai sensor amonia [2,3], H₂S [4,5], HCl [6,7] dan klorin [8].

Dalam penelitian ini digunakan bahan polianilin dengan struktur nano (nanostructure) berbentuk serat-serat nano (nanofiber) sebagai cladding pengganti pada sistem sensor serat optik. Penggunaan polianilin nanostruktur ini secara signifikan dapat meningkatkan sensitivitas dan responsivitas sensor. Hal ini karena dengan struktur serat nano (nofiber), proses difusi molekul-molekul uap atau gas ke dalam struktur polianilin akan berlangsung lebih efektif jika dibanding dengan struktur *bulk*[7]. Akibatnya interaksi antara molekul uap (gas) dengan struktur polianilin akan berlangsung lebih cepat dan optimal.

Sensor serat optik yang dikembangkan dalam penelitian ini didasarkan pada perubahan absorpsi gelombang *evanescent* yang bergantung pada perubahan nilai indeks bias cladding relatif terhadap indeks bias inti (core) serat optik. Dalam hal ini, perubahan sifat serapan optik atau nilai indeks bias *cladding* disebabkan oleh interaksi uap HCl dengan cladding pengganti polianilin. Prinsipnya, ketika berkas cahaya berpropagasi sepanjang serat optik, medan elektromagnet tidak mendadak jatuh ke nol pada bidang batas inti-*cladding*, namun sebagian kecil menembus cladding dan meluruh (decays) cepat dalam arah tegak lurus bidang batas, medan ini dikenal sebagai medan *evanescent* [2,9]. Intensitas medan *evanescent* meluruh secara eksponensial terhadap jarak tegak lurus (z) bidang batas menurut persamaan (1),

$$I_z = I_0 \exp \left(- \frac{z}{d_p} \right) \quad (1)$$

dengan I_0 adalah intensitas radiasi datang. Kedalaman penetrasi (d_p) medan *evanescent* berhubungan dengan sudut datang (θ) pada bidang batas, indeks bias inti (n_1) dan indeks bias cladding (n_2), serta panjang gelombang radiasi (λ), yang diekspresikan oleh persamaan (2) [2,9,10],

$$d_p = \frac{\lambda}{(2\pi) \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (2)$$

Perubahan indeks bias cladding akan menentukan kedalaman penetrasi medan *evanescent*. Peningkatan indeks bias cladding akan meningkatkan kedalaman penetrasi, sehingga intensitas medan *evanescent* akan meningkat pula. Berdasarkan fenomena ini dikembangkan sistem sensor serat optik berbasis absorpsi medan *evanescent* dengan mengganti cladding asli dengan cladding pengganti yang dapat mengalami perubahan sifat optik (indeks bias dan absorpsivitas) terhadap perlakuan fisik, kimia atau biokimia.

Gelombang *evanescent* dapat berinteraksi dengan gelombang lain jika *cladding* dilepaskan. Jika gelombang *evanescent* (EW) ini diserap oleh spesis-spesis penyerap di sekitar inti serat optik yang berinteraksi dengan medium sensing, maka akan menghasilkan fenomena pelemahan refleksi total (*attenuated total reflection*) sehingga daya keluaran serat optik akan menurun. Transmisi daya di dalam sensor serat optik diberikan oleh hukum Beer-Lambert termodifikasi, yaitu [11]

$$P(l) = P_0 \exp(-\gamma L) \quad (3)$$

dimana L adalah panjang bagian serat optik yang tanpa *cladding*, P_0 adalah daya yang ditransmisikan melalui sensor serat optik tanpa kehadiran spesis penyerap, dan γ adalah koefisien absorpsi gelombang *evanescent*.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Bahan dan Peralatan

Bahan-bahan yang digunakan adalah monomer anilin, HCl sebagai dopan, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ sebagai oksidan, toluene, dan akuades. Peralatan yang dipergunakan adalah bundel serat optik bifurkasi (Ocean Optics), *patchcord* serat optik plastik, gelas-gelas kimia, USB2000 Spektrophotometer (Ocean Optics), Tungsten-Halogen light source (Ocean Optics), *Science Workshop 750 Interface* (PASCO), *High Sensitivity light Sensor* (PASCO), dan komputer (PC) beserta Software DataStudio (PASCO).

Persiapan serat optik

Kabel *patchcord* serat optik plastik multimoda dengan diameter inti 960 μm dan diameter *cladding* 1000 μm sepanjang 2 m dipotong menjadi dua, sehingga diperoleh kabel serat optik dimana salah satu ujungnya dilengkapi dengan konektor SMA dan ujung lainnya bebas (tanpa konektor). Sekitar 3 cm dari ujung bebas serat optik ini, sepanjang 2 cm dilepas *cladding* aslinya dengan metode etsa kimia menggunakan larutan aseton. Bagian tanpa *cladding* ini akan dijadikan elemen sensing dengan *cladding* pengganti lapisan polianilin nanostruktur. Tepat di ujung serat ini dilapisi cat perak sebagai reflektor.

Penyiapan dan Pelapisan bahan Polianilin

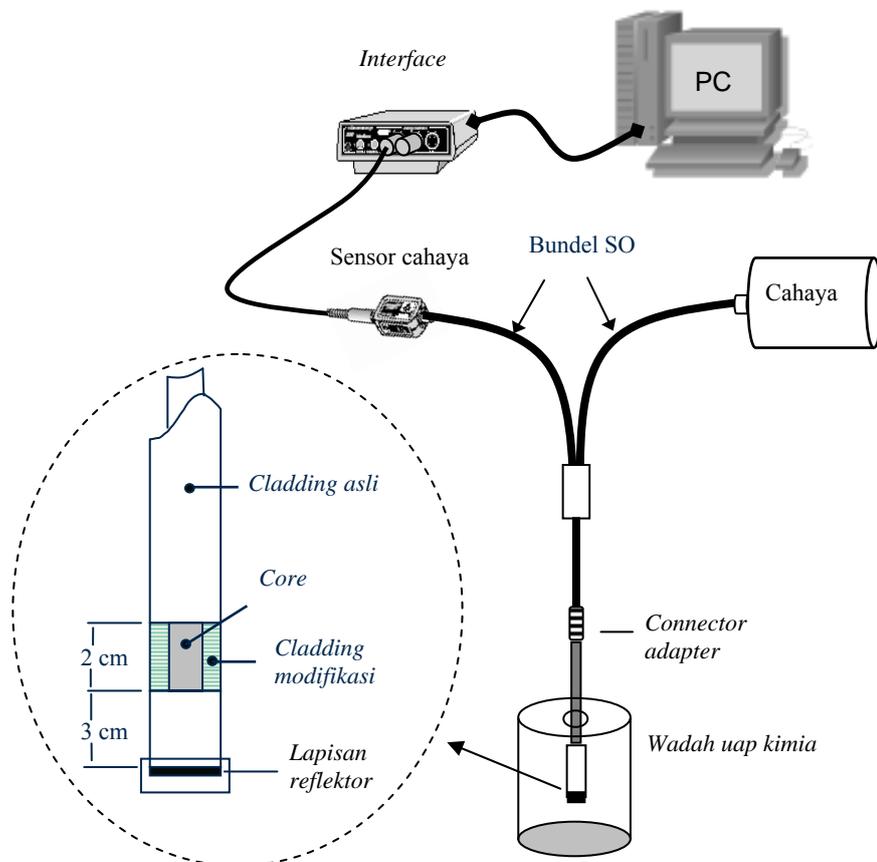
Polianilin nanostruktur (nanofiber) disintesis dengan metode polimerisasi interfasial yang dilakukan di dalam sistem dua fasa larutan organik/air (aqueous). Langkah-langkah yang dilakukan

adalah membuat dua larutan campuran, yaitu larutan campuran monomer aniline di dalam toluene sebagai fasa organik dan larutan campuran oksidan $(\text{NH})_4\text{S}_2\text{O}_8$ dengan dopan HCl sebagai fasa air (aqueous). Kedua larutan campuran ini dicampur ke dalam satu gelas *beaker* tanpa diaduk, kedua larutan terpisah karena berbeda fasa. Sesaat setelah pencampuran, dengan cepat mulai terbentuk polianilin pada bidang batas (interface) dua fasa larutan dan dengan lambat berdifusi ke dalam lapisan air di sebelah bawah. Pada saat yang sama, warna lapisan organik di sebelah atas berubah warna menjadi oranye kemerahan akibat pembentukan oligomer aniline. Proses ini dibiarkan sepanjang malam untuk memberikan waktu terjadi polimerisasi lengkap. Produk berupa endapan polianilin dikumpulkan dan dimurnikan melalui filtrasi dan selanjutnya dibilas dengan akuades beberapa kali. Untuk keperluan karakterisasi optik dan foto SEM (scanning electron microscopy), pasta polianilin dilapiskan pada kaca preparat dengan teknik penyapuan (casting). Kemudian, pasta polianilin juga dilapiskan pada inti serat optik tanpa cladding dengan teknik yang sama. Karakterisasi optik dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer Vis-NIR untuk melihat karakter serapan bahan polianilin.

Set up dan Prinsip Sensor Serat Optik

Set up pengujian sensor serat optik ditunjukkan pada Gambar 1, terdiri dari bundel serat optik bifurkasi (bentuk Y), probe serat optik plastik yang telah dibuat, sumber cahaya, detektor cahaya, interface, dan komputer (PC) yang telah diinstal program DataStudio (PASCO) untuk akuisisi dan pengolahan data. Probe serat optik yang telah dibuat dihubungkan ke salah satu ujung bundel serat bifurkasi dengan adapter konektor SMA-SMA (lihat Gambar 1), sedangkan ujung lainnya dimana terdapat elemen sensing dibiarkan bebas.

Prinsip sistem sensor serat optik ini dijelaskan berikut ini. Berkas cahaya dari sumber dimasukkan melalui salah satu lengan bundel serat bifurkasi dan dipandu menuju bagian sensing selanjutnya dipantulkan oleh reflektor di ujung probe kemudian dikembalikan ke lengan lain bundel fiber bifurkasi dimana terdapat detektor cahaya. Berkas cahaya ini mengalami interaksi dengan bagian sensing sebanyak dua kali yaitu ketika datang dan saat dipantulkan balik oleh reflektor di ujung probe serat optik. Berkas cahaya yang dideteksi oleh sensor cahaya dikirim ke komputer melalui interface untuk diolah, proses ini berlangsung secara otomatis dengan menggunakan program (DataStudio) di dalam komputer. Data yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk kurva respon sensor serat optik, yaitu kurva perubahan intensitas transmisi cahaya yang melewati sistem sensor serat optik terhadap waktu. Untuk mendapatkan kurva respon dalam bentuk siklus, data diambil secara kontinyu dengan mencelupkan dan menarik bagian sensing secara bergantian dan berulang ke dalam wadah uap HCl.



Gambar 1. Set-up pengujian sensor serat optik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Polianilin

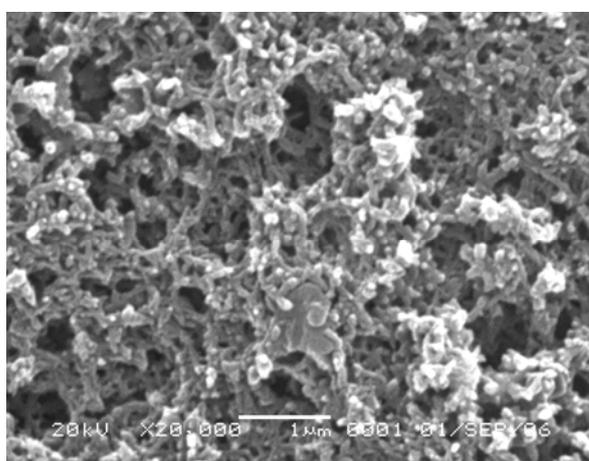
Polianilin yang diperoleh dengan metode polimerisasi interfasial dikarakterisasi sebelum digunakan sebagai cladding pengganti pada sistem sensor serat optik. Karakterisasi yang dilakukan adalah dengan SEM (scanning electron microscopy) untuk melihat morfologi permukaan polianilin dan dengan spektrofotometer Vis-NIR untuk mengetahui sifat optik berdasarkan karakteristik absorbansinya.

Hasil foto SEM lapisan polianilin pada substrat kaca preparat ditunjukkan pada Gambar 2. Tampak pada foto SEM, sampel polianilin yang dihasilkan melalui polimerisasi interfasial memiliki

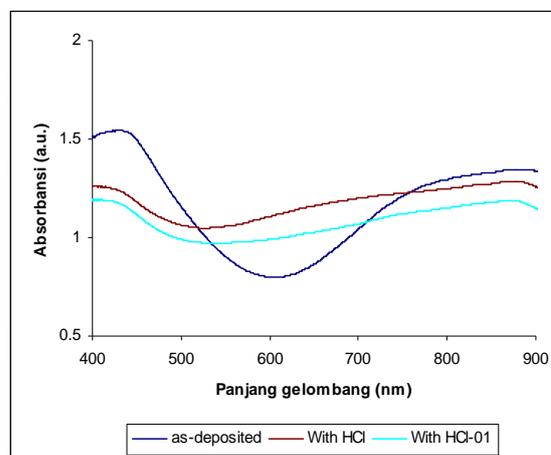
morfologi berpori dengan serat-serat sangat dominan. Serat-serat berukuran belasan nanometer (nanofiber) tampak saling bersilangan di dalam bahan polianilin. Dengan struktur berpori dan serat ukuran nano, polianilin memiliki luas permukaan yang besar sehingga dapat meningkatkan difusi molekul HCl ke dalam struktur nanoserat polianilin dan secara signifikan memberikan performa lebih baik dalam sensitivitas dan responsivitas sensor.

Karakterisasi spektroskopi Vis-NIR dimaksudkan untuk melihat karakteristik absorbansi polianilin. Gambar 3 memperlihatkan spektra absorpsi spesifik dari film polianilin pada substrat kaca preparat, masing-masing sebelum dan setelah perlakuan uap HCl.

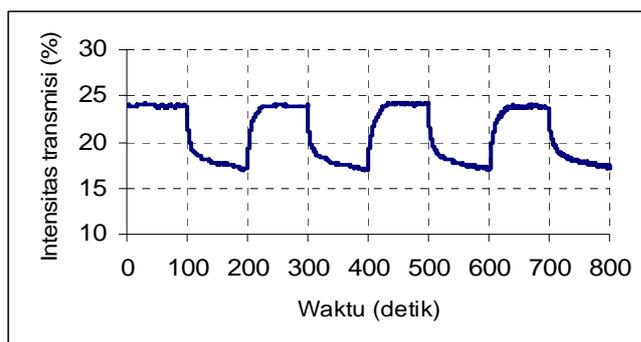
Tampak pada kurva bahwa polianilin menyerap dengan kuat spektrum biru (sekitar 430 nm) dan spektrum merah yang lebar (sekitar 800 nm), sebaliknya tidak menyerap spektrum hijau hingga kuning (antara 500 – 600 nm). Hal ini bersesuaian dengan warna polianilin hasil preparasi, yaitu hijau muda (emeraldine salt), dengan doping HCl sebagai sumber proton (H^+). Ketika diberi uap HCl, tingkat protonasi film polianilin berubah sedemikian sehingga sifat optiknya juga berubah, yaitu absorbansinya meningkat pada daerah spektrum merah. Adanya perubahan spektra absorbansi terhadap perlakuan uap HCl mengindikasikan bahan polianilin dapat dimanfaatkan sebagai bahan sensor optik uap HCl.



Gambar 2. Morfologi polianilin dengan SEM.



Gbr 3. Karakteristik absorbansi polianilin tanpa dan dengan perlakuan uap HCl.



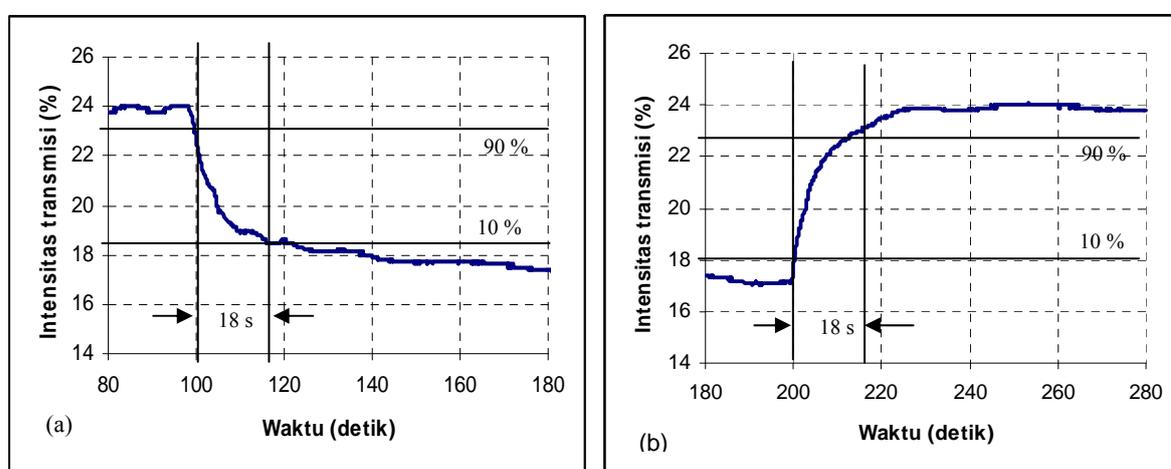
Gambar 4. Kurva respon sensor uap HCl.

Respon sensor serat optik

Untuk mengetahui waktu respons, waktu pemulihan (recovery), kemampuan pembalikan (reversibility) dan kemampuan pengulangan (repeatability), maka dilakukan karakterisasi respon sensor serat optik. Gambar 4 memperlihatkan kurva respon empat siklus yang merepresentasikan perubahan intensitas transmisi terhadap waktu ketika dimasukkan dan dikeluarkan dari wadah uap kimia secara berulang. Perubahan intensitas transmisi ini diakibatkan oleh perubahan absorbansi optik cladding polianilin nanostruktur akibat interaksinya dengan uap HCl yang mengakibatkan perubahan tingkat protonasi polianilin sehingga indeks biasnya juga berubah. Sebelum dimasukkan ke dalam wadah uap kimia, intensitas transmisi sensor serat optik tetap pada suatu nilai stasioner awal. Namun, sesaat setelah probe dimasukkan ke dalam wadah, intensitas cahaya transmisi menurun cepat dan menuju keadaan stasioner lainnya. Selanjutnya ketika probe dikeluarkan dari wadah uap, intensitas transmisi dengan cepat meningkat menuju nilai stasioner awal lagi.

Kurva siklus yang diperoleh merupakan representasi dari perubahan sifat optik cladding polianilin ketika berinteraksi dengan uap HCl, dalam hal ini indeks bias dan absorbansi meningkat ketika diberi perlakuan uap HCl akibat terjadinya protonasi tambahan dan kembali ke kondisi protonasi awal ketika dibebaskan dari uap HCl. Implikasinya adalah absorpsi gelombang evanescent pada batas cladding-inti serat optik meningkat saat dimasukkan ke dalam wadah uap akibat kenaikan nilai indeks bias cladding polianilin, sehingga intensitas cahaya yang dilewatkan melalui sistem sensor serat optik jatuh (drop). Sebaliknya, ketika probe dikeluarkan dari wadah uap indeks bias dan absorbansi cladding polianilin kembali pulih (recovery) ke nilai yang sama sebelum dimasukkan ke dalam wadah uap, akibatnya intensitas transmisi meningkat cepat menuju nilai stasioner awal, seperti ditunjukkan pada kurva siklus respon (Gambar 4).

Untuk menentukan waktu respon dan waktu pemulihan (*recovery*), maka diambil kurva rinci bagian respon dan *recovery* pada kurva respon. Caranya dengan menentukan waktu yang dibutuhkan dalam penurunan intensitas transmisi hingga 90 % dihitung dari 10% awal (Gambar 5a). Sedangkan waktu pemulihan (*recovery time*) ditentukan dari waktu yang dibutuhkan probe sensor untuk pulih kembali ke nilai stasioner awal hingga 90% intensitas transmisi dari intensitas transmisi terendah (Gambar 5b). Berdasarkan kurva rinci bagian respon dan *recovery* diperoleh waktu respon dan waktu *recovery* yang cukup singkat yaitu sekitar 18 detik. Waktu yang singkat ini menyatakan probe sensor serat optik yang dirancang ini memiliki respon yang cepat demikian juga sebaliknya memiliki pemulihan yang sama cepatnya.



Gambar 5. Kurva waktu respon dan waktu pemulihan (*recovery*).

Interaksi antara bahan polinilin dengan uap HCl terjadi secara difusi kedalam struktur polianilin yang lajunya ditentukan oleh struktur polianilin. Dengan struktur polianilin dalam ukuran nano (nanostruktur), seperti nanofiber, maka proses difusi uap HCl ke dalam struktur polianilin berlangsung jauh lebih efektif dan optimal dibandingkan struktur *bulk*. Dengan demikian secara signifikan meningkatkan responsivitas probe sensor serat optik. Hal ini ditunjukkan oleh kurva respon dimana perubahan intensitas transmisi berlangsung sangat singkat untuk mencapai nilai stasioner, baik saat dimasukkan maupun dikeluarkan dari wadah uap. Kurva respon juga memperlihatkan kemampuan balik (*reversibility*) dan kemampuan pengulangan (*repeatability*) yang baik pula, walaupun hanya diambil empat siklus saja.

KESIMPULAN

Telah dirancang dan dikembangkan sensor uap HCl berbasis serat optik plastik berdasarkan absorpsi gelombang *evanescent* menggunakan cladding polianilin nanostruktur. Karakteristik film polianilin nanoserat memperlihatkan variasi spektrum absorbansi terhadap perlakuan uap HCl. Probe sensor serat optik dirancang dengan mengganti cladding asli serat optik dengan lapisan polianilin nanostruktur (nanoserat) sebagai cladding modifikasi yang sensitif uap HCl. Pengujian respon sensor memperlihatkan responsivitas yang cukup baik dengan waktu respon yang sangat singkat sekitar 18 detik dan waktu pemulihan (recovery) juga sekitar 18 detik. Respon yang cukup cepat ini diyakini akibat difusi molekul HCl ke dalam struktur nanofiber polianilin yang lebih efektif dan optimal. Dari kurva siklus respon sensor yang dirancang memperlihatkan kemampuan balik (reversibility) dan kemampuan ulang (repeatability) yang cukup baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cesar Elosua, Candido Bariain, Ignacio R. Matias, Francisco J. Arregui, Asuncion Luquin, and Mariano Laguna, Volatile alcoholic compounds fiber optic nanosensor, *Sensors and Actuators B*, 2006, 115, 444-449.
2. Wenqing Cao, Yixiang Duan, Optical fiber-based evanescent ammonia sensor, *Sensors and Actuators*, 2005, B 110, 252-259.
3. Zhe Jin, Yongxuan Su, Yixiang Duan, Development of a polyaniline-based optical ammonia sensor, *Sensors and Actuators*, 2001, B 72, 75-79.
4. S. de Marcos, N. Alcubierre, J. Galbin, and J.R. Castillo, Reagentless system for sulphite determination based on polyaniline, *Analytica Chimica Acta*, 2004, 502, 7-13.
5. Shabnam Virji, Jesse D. Fowler, Christian O. Baker, Jiaying Huang, Richard B. Kaner, and Bruce H. Weller, Polyaniline Nanofiber Composites with Metal Salts: Chemical Sensors for Hydrogen Sulfide, *Small*, 2005, (6), 624-627.
6. Jiaying Huang, Shabnam Virji, Richard B. Kaner, and Bruce H. Weller, Polyaniline Nanofibers: Facile Synthesis and Chemical Sensors, *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, 125, 314-315.
7. Jiaying Huang, Shabnam Virji, Bruce H. Weller, Richard B. Kaner, Nanostructured Polyaniline Sensors, *Chem. Eur. J.*, 2004, 10, 1314-1319.
8. Xiaoxuan Li, Ming Ju, Xingwei Li, Chlorine ion sensor based on polyaniline film electrode, *Sensors and Actuators*, 2004, B 97, 144-147.

9. Archenault, H. Gagnaire, J.P. Goure, N. Jaffrezic-Renault, A simple intrinsic optical fibre chemical sensor, *Sensors and Actuators B* 8, 1992, pp. 161-166.
10. Lalitkumar Bansal, Development of a Fiber Chemical Sensor for Detection of Toxic Vapors, PhD Thesis, Drexel University, 2004.
11. P.K. Choudhury and Toshihiko Yoshino, On the fiber-optic chlorine sensor with enhanced sensitivity based on the study of evanescent field absorption spectroscopy, *Optik* 115, 2004, (7), 329-333.