

# Industri

Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi

**Karakterisasi Unjuk Kerja Sistem Injeksi Bertingkat  
pada Ruang Bakar Toroidal dengan Bahan Bakar Biodiesel**  
Bambang Sudarmanta, Arif Hardiyanto, Soeharto, Sampurno

**Modeling of An Engine Mount System Based Parameter Identification Technique**  
Dwi Esti Kusumandari, Arjon Turnip

**Penerapan Peralatan dan Metode Proses Produksi Berbasis IPTEKS di UKM Pande Besi**  
Nur Husodo, Mahirul Mursid, Eddy Widiyono, Hari Subiyanto

**Pengembangan Katalis Pd/HZSM-5 untuk Proses Perengkahan Minyak Sawit**  
Danawati Hari Prajitno, Achmad Roesyadi, Kusno Budhikarjono,  
Ignatius Gunardi dan Agus Budianto

**Pemanfaatan Selulosa Eceng Gondok untuk Produksi Etanol  
Melalui Perubahan Struktur Sel Hasil Perlakuan Autoklaf-Impregnasi**  
Octovianus SR Pasanda, Vilia Darma Paramita

**Transesterifikasi Refined Palm Oil Menggunakan Katalis  $K_2PO_4$   
Berdukung Abu-Layang**  
Ratna Ediati, Prihartini Retno Wulan, Samik

**Karakterisasi Sensor pH Serat Optik Berbasis Lapisan Sol-Gel  
untuk Pengukuran Secara Real Time**  
Katherin Indriawati, Agus M. Hatta, Lizda Johar M.

**Pemodelan Fouling pada Penukar Panas Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan**  
Totok R Biyanto, Bambang L Widjiantoro, Ridho Bayuaji

**Practical Assessment Konsep Project Reliability**  
Yudha Andrian Saputra, Stefanus Eko Wiratno, Whendy Pamungkas

INDUSTRI

Volume 11

Nomor 2

Halaman  
57 - 131

Juni  
2012

# Industri

Jurnal ilmiah sains dan teknologi

ISSN 1693-0533

Volume 11 Nomor 2 Juni 2012

Terakreditasi : SK Dirjen Dikti  
No. 83/DIKTI/Kep/2009

**Pimpinan Umum :**

Dr. Bambang L Widjiantoro, ST., MT.

**Ketua Penyunting :**

Dr. Ir. Sumarno, M. Eng.

**Penyunting Ahli :**

Prof. Dr. Ir. Sutardi, M. Eng. (ITS)  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. (ITS)  
Prof. Ir. Ali Altway, MS. (ITS)  
Dr. Dhany Arifianto, S.T., M. Eng (ITS)  
Prof. Dr. Ir. Udisubakti Ciptomulyono,  
M. Eng., Sc. (ITS)  
Dr. Ir. Sungging Pintowantoro, MT. (ITS)  
Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA. (UI)  
Ir. Dwiwahju Sasongko, M. Sc. Ph. D. (ITB)  
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA. (UGM)  
Dr. Ir. Ari Samadhi (ITB)  
Ir. Rukmi Sari Hartati, MT. Ph. D. (Udayana)

**Penyunting Pelaksana :**

Prof. Dr. Ir. Mahfud, DEA. (ITS)  
Ir. Sudjud Darsopuspito, MT. (ITS)

**Sekretariat Pelaksana :**

Drs. Ec. Mochamad Takrip  
Eko Priyambodo  
Nanang Setio Utomo  
Hafidah Khoiriah  
Soetrisno  
Sumardi

**Alamat Penerbit :**

Fakultas Teknologi Industri - ITS  
Gedung Rektorat ITS Lantai III  
Kampus ITS Sukolilo - Surabaya  
Telp. (031) 5947843, 5922938  
Fax. (031) 5947843, 5933228  
E-mail : fti@its.ac.id

## EDITORIAL

Jurnal industri merupakan forum/wahana publikasi hasil-hasil penelitian sains dan teknologi dibidang kimia, kelistrikan, fisika, mekanik, industri, dan material. Semua paper dalam terbitan kali ini merupakan pengembangan teori dan eksperimen, yang berguna bagi pengembangan riset lanjutan maupun terapan di industri. Komunikasi lanjut antara peneliti/penulis, pembaca, dan para praktisi di industri sangat perlu untuk dilaksanakan.

Kami menyampaikan ucapan terima kasih atas kesediaan para penulis/peneliti mengirimkan artikel. Redaksi senantiasa membuka kesempatan kepada penulis untuk mempublikasikan artikel (review) atau hasil penelitian guna dimuat pada Jurnal "Industri". Kami berharap artikel-artikel dimaksud memberikan kontribusi pada pengembangan sains dan teknologi serta dapat menjawab tantangan pengembangan iptek pada masa mendatang.

Redaksi

INDUSTRI, Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi, diterbitkan setiap bulan Februari, Juni dan Oktober oleh Fakultas Teknologi Industri ITS. Penanggung Jawab : Dekan FTI - ITS. Terbit pertama Oktober 2002. Redaksi mengundang para peneliti, praktisi dan profesional di bidang ilmu teknik, khususnya Teknik Mesin, Teknik Elektro, Teknik Kimia, Teknik Fisika, Teknik Industri dan Teknik Material untuk menyumbangkan hasil penelitiannya ke dalam jurnal ini. Bagi para pembaca yang berminat untuk mendapatkan terbitan jurnal INDUSTRI secara teratur, dapat menghubungi redaksi.

## Daftar Isi

**Karakterisasi Unjuk Kerja Sistem Injeksi Bertingkat pada Ruang Bakar Toroidal dengan Bahan Bakar Biodiesel**

Bambang Sudarmanta, Arif Hardiyanto, Soeharto, Sampurno

**Modeling of An Engine Mount System Based Parameter Identification Technique**

Dwi Esti Kusumandari, Arjon Turnip

**Penerapan Peralatan dan Metode Proses Produksi Berbasis IPTEKS di UKM Pande Besi**

Nur Husodo, Mahirul Mursid, Eddy Widiyono, Hari Subiyanto

**Pengembangan Katalis Pd/HZSM-5 untuk Proses Perengkahan Minyak Sawit**

Danawati Hari Prajitno, Achmad Roesyadi, Kusno Budhikarjono, Ignatius Gunardi dan Agus Budianto

**Pemanfaatan Selulosa Eceng Gondok untuk Produksi Etanol Melalui Perubahan Struktur Sel Hasil Perlakuan Autoklaf-Impregnasi**

Octovianus SR Pasanda, Vilia Darma Paramita

**Transesterifikasi *Refined Palm Oil* Menggunakan Katalis  $K_3PO_4$  Berpendukung Abu-Layang**

Ratna Ediati, Prihartini Retno Wulan, Samik

**Karakterisasi Sensor pH Serat Optik Berbasis Lapisan Sol-Gel untuk Pengukuran Secara *Real Time***

Katherin Indriawati, Agus M. Hatta, Lizda Johar M.

**Pemodelan *Fouling* pada Penukar Panas Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan**

Totok R Biyanto, Bambang L Widjiantoro, Ridho Bayuaji

***Practical Assessment* Konsep *Project Reliability***

Yudha Andrian Saputra, Stefanus Eko Wiratno, Whendy Pamungkas



## KARAKTERISASI SENSOR PH SERAT OPTIK BERBASIS LAPISAN SOL-GEL UNTUK PENGUKURAN SECARA REAL TIME

Katherin Indriawati, Agus M. Hatta, Lizda Johar M

Jurusa Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo Surabaya, 60111 Indonesia  
Email: katherin@ep.its.ac.id

**Abstract:** The lack of a pH sensor types that can be used in real time and online is a problem that must be solved. This paper presents the characterization of pH sensor based on the plastic optical fiber (POF) with sol-gel coated in order to establish a pH measurement system in real time. The first step is making some pH sensors which have pH range of 5 – 7. pH indicator as a sensitif material to pH of acid - neutral liquid, i.e. bromophenol blue, is created as film layer in fiber optic by using sol-gel immobilization technique. The characteristics observed are bending radius, linearity, output voltage, output span, and lifetime. The simulation results of the sensor model using Matlab show that the best bending radius in delivering sensitivity is 10 mm. The made pH sensors have linear relation between pH and output voltage (determinat coefficient of 0.8). The best linear relationship occurs in pH 6 – 7. Furthermore, it is also proved that the pH sensors have measurement span in milivolt scale so the sensitivity of the pH sensors is in milivolt order. The fotodetector circuit used can affect on the output voltage value but can not affect significantly on the output span. In the operational lifetime test experiment, by using dying condition at pH 5 and 40°C, it is concluded that the lifetime of the pH sensors is 3 days.

**Keywords:** Fiber optic pH sensor, sol-gel immobilization technique, lifetime, real time

**Abstrak:** Sedikitnya jenis sensor pH yang dapat digunakan secara real time dan online menjadi masalah yang harus dipecahkan. Pada makalah ini ditunjukkan karakterisasi sensor pH berbasis serat optik plastik yang dibuat dengan metode sol-gel dalam rangka membangun sistem pengukuran pH secara real time. Sebagai langkah awal adalah membuat sensor pH yang memiliki jangkauan pengukuran pH 5 – 7. Indikator pH sebagai bahan yang sensitif terhadap pH larutan asam – netral yaitu bromophenol blue dijadikan lapisan film pada serat optik plastik dengan menggunakan teknik sol-gel immobilization. Karakteristik yang ditinjau adalah jari-jari lekukan sensor, linieritas sensor, tegangan output sensor, span output sensor, dan umur / lifetime sensor. Hasil simulasi model sensor pH berbasis serat optik dengan menggunakan Matlab menunjukkan bahwa jari-jari lekukan yang paling baik dalam menghasilkan sensitivitas pengukuran adalah 10 mm. Sensor pH yang telah dibuat memiliki hubungan pH - tegangan output yang cenderung linier dengan koefisien determinan lebih besar dari 0,8. Hubungan pH - tegangan output dari sensor paling linier di daerah pH 6 – 7. Selain itu juga dibuktikan bahwa sensor pH memiliki span (rentang) pengukuran output dalam skala milivolt, sehingga sensitivitas sensor pH adalah dalam orde milivolt. Rangkaian fotodetektor dapat mempengaruhi nilai tegangan output yang dihasilkan namun tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap span output sensor. Pada percobaan operational lifetime test, dengan menggunakan kondisi celupan pada pH 5 dan temperatur 40 °C diperoleh kesimpulan bahwa umur atau lifetime dari sensor pH serat optik adalah 3 hari.

**Kata kunci:** Sensor pH serat optik, teknik sol-gel immobilization, lifetime, real time.

atalis padat  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , Katalis tersebut dibuat dengan mencampur kalsium asetat dan alumina

### PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, monitoring secara kontinyu terhadap nilai pH dibutuhkan pada hampir seluruh bidang aplikasi proses, seperti proses kimia, biomedik, dan lingkungan. Selain itu, perkembangan sistem kontrol otomatis yang signifikan pada bidang aplikasi proses membutuhkan tersedianya data pH secara *real time* untuk kondisi proses yang beragam.

Saat ini, sensor pH *on-line* yang paling umum digunakan adalah elektroda kaca (*glass electrode*). Karakteristik elektroda kaca adalah sangat bergantung pada temperatur lingkungan, sehingga

dapat terjadi penyimpangan nilai pH terukur akibat perubahan temperatur lingkungan. Selain itu, elektroda kaca memiliki banyak kekurangan lainnya, seperti harganya mahal, memiliki nilai resistansi tinggi sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang sangat kecil, mudah rusak secara mekanik, akurasi berkurang jika pemakaian dilakukan terus menerus tanpa pembersihan, dan konstanta waktu yang relatif besar (Morris, 2001). Oleh karenanya, pengembangan sensor pH dengan menggunakan metode lain terus dilakukan hingga saat ini.



Sensor pH serat optik adalah salah satu metode pengukuran pH yang dapat digunakan dalam rangka menggantikan elektroda kaca. Sensor pH berbasis serat optik menawarkan banyak keuntungan seperti kebal terhadap interferensi elektromagnetik, ukurannya lebih kecil dan ringan, harga lebih murah dengan akurasi tetap baik, mudah perawatannya, dan kemungkinan dapat digunakan untuk penginderaan jarak jauh serta pengukuran di tempat (*in vivo*) (Lin, 2000; Lee, 2003).

Sensor pH serat optik biasanya dibangun dengan menetapkan (*immobilize*) bahan celupan indikator pada pinggiran pemandu gelombang yang berupa serat optik (Sheppard dan Guiseppi-Elie, 1999). Serat optik digunakan untuk menghubungkan cahaya dari sumber laser dengan indikator. Ada tiga metode yang digunakan secara luas untuk imobilisasi indikator pH di dalam substrat padat: adsorpsi, ikatan kovalen dan jebakan. Dalam metode jebakan, indikator pH terperangkap dalam pori-pori substrat polimer; ini cukup mudah dan dapat diandalkan, tetapi lambatnya pencucian indikator dapat menjadi masalah. Salah satu metode jebakan yang paling sering digunakan adalah sol-gel (Lin, 2000; Gupta dan Sharma, 1998).

Penggunaan serat optik untuk pengukuran pH telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Rayss dan Sudolski (2002); Lehman dkk (1995), serta Sharma dan Gupta (2003). Namun ketiganya belum mengarah pada pengukuran pH secara *real time*. Dalam makalah ini dipaparkan hasil penelitian tentang karakterisasi sensor pH serat optik yang dibuat dengan teknik sol-gel dalam rangka penggunaan sensor tersebut pada pengukuran secara *real time*. Untuk pengukuran secara *real time*, sensor harus dicelupkan ke dalam larutan uji secara terus-menerus. Berkaitan dengan hal ini, sensor pH diuji kehandalannya melalui *operational lifetime test*.

## METODE

### Perancangan Sensor pH berbasis POF Secara Simulasi

Tahap awal dalam penelitian ini adalah melakukan simulasi untuk keperluan merancang sensor pH berbasis POF. Simulasi dimaksudkan

untuk mengetahui jari-jari lekukan serat optik yang menghasilkan daya hilang paling kecil. Informasi ini dibutuhkan pada tahap implementasi sensor pH pada plant secara *real-time* dimana pemasangan sensor pH yang lebih efektif tidak mungkin lurus menembus wadah larutan uji dari dua sisi yang berbeda. Sensor lebih mudah dan efisien untuk dipasang pada satu bagian sisi wadah saja.

Perancangan sensor berbasis POF dilakukan dengan metode analitis dan metode numeric (Boechat dkk, 1991) untuk pemodelan perambatan cahaya di dalam struktur POF dengan menggunakan bantuan *software* Matlab. Pada daerah yang ditentukan, bagian *cladding* POF nantinya akan dikupas untuk digantikan dengan lapisan film indikator pH (sebagai bahan celupan). Daerah tersebut nantinya akan menjadi bagian POF yang sensitif terhadap pH larutan yang diukur. Secara simulasi, hal ini diwakili dengan melakukan perubahan nilai indeks bias pada bagian *cladding* POF yang dikupas sebagai representasi perubahan nilai pH dari larutan yang diukur. Dengan demikian, daya luaran sensor POF hasil simulasi menjadi fungsi pH larutan terukur. Nilai pH yang ditinjau adalah 4,5 – 13.

Pada Gambar 1(a) ditunjukkan diagram lekukan POF dengan jejari  $R$  dan jejari core  $a$ . Pada Gambar 1(b) ditunjukkan profil indeks bias *core* dan *cladding*, dimana indeks bias *core*-nya lebih besar dibanding indeks bias *cladding*-nya. POF yang ditinjau memiliki jenis indeks bias *step*. Perambatan cahaya yang mungkin didalam POF ditunjukkan dalam Gambar 1(b). Arah perambatan dibatasi oleh sudut kritis dari total internal reflection dengan nilai:

$$\theta_c = \left[1 - \left(\frac{n_c}{n}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

dengan  $n_c$  adalah indeks bias *cladding* dan  $n$  indeks bias *core*-nya. Jumlah total moda perambatan dalam jejari *core*  $a$  dinyatakan dalam persamaan :

$$m = \frac{1}{2} (akn\theta_c)^2 \quad (2)$$

dengan  $k = 2\pi/\lambda$  adalah konstanta perambatan dalam ruang hampa.

Pada saat serat optik diberikan lekukan, kecepatan fasa dari muka gelombang (*wavefronts*) di sekitar lekukan lebih besar dari pada kecepatan perambatannya di dalam lapisan *cladding*.



Kecepatan perambatan naik ketika menjauhi dari bagian *core*, hingga kecepatannya sama dengan kecepatan lokalnya. Pada titik tersebut, gelombang tidak lagi terpandu dan diradiasikan.

Koefisien atenuasi rugi daya ( $\alpha$ ) pada sudut terpandu  $q$  terhadap sumbu serat optik dinyatakan dengan:

$$\alpha = 2nk(\theta_c^2 - \theta^2) \exp\left[-\frac{2}{3}nkR\left(\theta_c^2 - \theta^2 - \frac{2a}{R}\right)\right]^{1/2} \quad (3)$$

Besar daya yang dilewatkan pada POF setelah jarak  $l$  dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P(\theta) = P_0(\theta) \exp(-\alpha l) \quad (4)$$

dengan  $P_0(\theta)$  adalah daya pada mode  $q$ . Untuk menghitung daya transmisi total dari POF yang ditekuk, dapat dilakukan penjumlahan daya untuk semua moda, sehingga diperoleh persamaan:

$$P = \int_0^{\theta_c} P_0(\theta) \exp(-\alpha l) d\theta \quad (5)$$

Maka, jumlah bagian daya yang hilang akibat

lekukan dapat dinyatakan dengan:

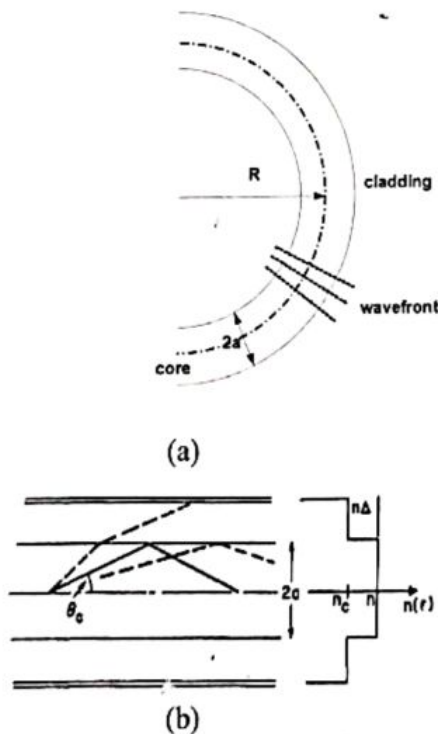
$$P_r = \frac{\int_0^{\theta_c} P_0(\theta) d\theta - \int_0^{\theta_c} P_0(\theta) \exp(-\alpha l) d\theta}{\int_0^{\theta_c} P_0(\theta) d\theta} \quad (6)$$

Dalam simulasi ini ditinjau konfigurasi POF setengah lingkaran (letter U). POF yang digunakan adalah 1 mm *step-index* dengan indeks bias *core*,  $n = 1,492$ . Nilai pH dalam skala 4,5 – 13 diwakili oleh nilai indeks bias *cladding* 1,35 – 1,44. Parameter yang akan dioptimalkan dalam rancangan sensor pH ini adalah jejari lekukan POF. Dalam simulasi ini dihitung nilai  $P_r$  dengan jejari lekukan  $R = 30$  mm, 25 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, dan 5 mm.

### Pembuatan Sensor pH

Langkah-langkah pembuatan dari sensor ini sesuai dengan apa yang dilakukan sebelumnya oleh Gupta dan Sharma (1998). Serat optik plastik berukuran 980/1000 dipotong sepanjang 30 cm. Kemudian bagian tengah dari serat optik plastik, dikupas jaket dan *cladding*nya dengan menggunakan *fiber optic toolkit*. Untuk merapikan sisa – sisa jaket yang tertinggal dapat digunakan *cutter*. Setelah bagian tengah dikupas, maka kedua ujung serat optik harus dihaluskan dengan menggunakan kertas amplas khusus serat optik. Bagian tengah yang sudah dikupas, kemudian dibersihkan dengan menggunakan larutan alkohol. Setelah itu bagian yang sudah tidak ada *cladding*nya direndam dalam larutan  $\text{HNO}_3$  selama 5 menit. Hal ini dikarenakan grup OH yang ada pada permukaan *core* harus diaktivasi dengan perlakuan asam. Grup OH yang sudah diaktivasi pada permukaan *core* akan membentuk ikatan dengan molekul silika pada pori film sol-gel dan membantu film tipis sol-gel untuk menempel pada bagian *core*. Setelah itu, serat optik plastik direndam dalam larutan *deionized distilled water* dan dibersihkan dengan menggunakan alkohol.

Pembuatan film tipis sol-gel dimulai dengan mencampurkan 30 ml TEOS, 30 ml etanol absolute, 2 ml *deionized distilled water*, dan 82 mg *bromophenol blue*. Setelah semua bahan dicampur, campuran diaduk selama 30 menit pada



Gambar 1. (a) Konfigurasi POF letter U dengan lekukan,  $R$  = jejari lekukan,  $a$  = jejari core, (b) Profil indeks bias POF dan kemungkinan arah rambat cahaya di dalamnya



suhu sebesar 60°C dengan menggunakan *hot plate magnetic stirrer*.

Campuran yang sudah diaduk sehingga menjadi homogen, siap untuk dijadikan sebagai bahan pengganti *clackling* pada serat optik plastik. Teknik pelapisan serat optik dengan menggunakan teknik *dip-coating*. Teknik ini dimulai dengan mencelupkan serat optik pada campuran *coating*, kemudian ditarik dengan kecepatan tertentu. Dalam hal ini, kecepatan yang digunakan adalah 10 cm/menit. Sehingga nantinya dapat memberikan ketebalan lapisan sol-gel mendekati 0,15  $\mu\text{m}$ .

Setelah pelapisan selesai, serat optik dibiarkan pada tekanan atmosfer dan pada suhu kamar selama 20 hari. Setelah 20 hari, serat optik direndam dahulu di air sebelum digunakan.

### **Pembuatan Kurva Karakteristik**

Hubungan antara pH dan tegangan yang terukur perlu diketahui untuk memberikan pembacaan nilai pH pada monitor komputer saat sensor dicelupkan pada larutan yang tidak diketahui kandungan asamnya. Pembuatan kurva karakteristik dilakukan dengan peralatan yang disusun seperti pada gambar 2. Sumber cahaya berupa *light emitting diode* (LED) *super bright* warna merah. Sebuah wadah gelas bening diisi air, kemudian pH air tersebut diukur menggunakan pH meter digital. Tegangan listrik pada fotodiode selaku detektor diukur dengan menggunakan AVO meter. Selanjutnya keasaman air dalam wadah ditambah dengan meneteskan cuka ke dalam wadah. Setiap kali penambahan cuka, nilai pH larutan air cuka tersebut diukur dengan pH meter digital dan nilai tegangan listrik pada fotodiode diukur dengan AVO meter. Percobaan dihentikan saat kandungan larutan air cuka mencapai pH 5.

Data pembacaan pH dan tegangan yang diperoleh pada percobaan di atas selanjutnya digunakan untuk membuat sebuah kurva, dengan nilai pH pada sumbu x dan nilai tegangan pada sumbu y. Kurva ini disebut sebagai kurva karakteristik sensor pH. Kurva karakteristik adalah grafik yang menyatakan hubungan antara pH dengan tegangan listrik output sensor. Selanjutnya dengan teknik regresi linier, diperoleh hubungan antara pH dan tegangan listrik dalam bentuk persamaan linier.

### **Operational Lifetime Test**

Kondisi teknis pengujian dibuat sama sebagaimana nilai operasional sensor. Pengujian *operational lifetime test* sensor pH ini dilakukan pada suhu 40°C dengan pH larutan uji bernilai 5 dan sumber tegangan sebesar 12 volt DC. Untuk meningkatkan ketepatan analisis, pengujian dilakukan sampai keseluruhan sensor tidak berfungsi. Setelah itu dilakukan analisis statistik untuk memperoleh *lifetime* sensor pH berdasarkan waktu kegagalan sensor pH. Jika parameter sensor pH telah menyimpang jauh dari nilai benarnya atau sensor pH sudah tidak berfungsi lagi, maka sensor dinyatakan telah mengalami kegagalan. Jadi dalam *operational lifetime test* ini sebuah sensor dinyatakan gagal ketika parameternya mengalami penyimpangan dari jangkauan kriteria nilai aslinya.

Rangkaian peralatan yang digunakan untuk melakukan *operational lifetime test* pada dasarnya adalah sama dengan rangkaian peralatan yang digunakan untuk mencari kurva karakteristik sensor pH. Rangkaian ini tetap menggunakan adaptor sebagai sumber tegangan sebesar 12 volt DC, LED *superbright* berwarna merah sebagai sumber cahaya, fotodiode sebagai sensor cahaya yang diteruskan oleh serat optik, dan AVO meter sebagai alat ukur tegangan yang dikeluarkan oleh fotodiode. Selain itu sebagai alat tambahan untuk uji *operational lifetime test* adalah *magnetic stirrer*, yang digunakan untuk mendapatkan setpoint suhu 40°C.

Pengujian dilakukan kepada semua sensor pH yang telah dibuat dengan perlakuan yang sama, baik temperatur yang diterima, besarnya nilai pH larutan, lama perlakuan, dan waktu perlakuan. Berikut ini merupakan langkah-langkah dalam melakukan *operational lifetime test*.

Mula-mula sensor pH yang sudah dipasang pada gelas diberi air dengan pH bernilai 7. Karena nilai pH yang digunakan untuk perlakuan adalah 5, maka sedikit demi sedikit air ditetesi dengan asam asetat hingga diperoleh nilai pH sebesar 5. Setelah itu gelas diletakkan di atas *magnetic stirrer* untuk mendapatkan pemanasan hingga 40°C. Waktu peletakan gelas ke *magnetic stirrer* dicatat dan lama peletakan juga dicatat, hal ini dilakukan agar seluruh sensor pH memperoleh perlakuan yang sama.



Setelah *operational lifetime test* dijalankan, maka dilakukan pengambilan data setiap hari berupa tegangan listrik yang keluar dari fotodiode. Data tegangan listrik ini akan diolah untuk menentukan variabel-variabel yang digunakan sebagai parameter untuk menentukan kegagalan sensor pH.

Variabel yang menjadi parameter kegagalan sensor pH selama menjalani *operational lifetime test* adalah sensitivitas sensor pH ( $\beta$ ) yang didefinisikan sebagai rasio dari tegangan listrik pada pH 7 ( $V_7$ ) dengan tegangan listrik pada pH sampel ( $V_i$ ). Penyimpangan sensitivitas sensor pH yang berkenaan dengan nilai sensitivitas terukur yang pertama direkam dalam kondisi pengukuran tertentu. Sebagai contoh, sebuah sensor menunjukkan sensitivitas  $\beta_0$  pada waktu awal, dan pada waktu tertentu  $n$  sensor menunjukkan nilai  $\beta_n$ , maka perubahan sensitivitasnya adalah:

$$\Delta\beta_n = \beta_n - \beta_0 \quad (7)$$

dengan

$$\beta_n = \beta_{n7} / m_i \text{ dan } \beta_0 = \beta_{07} / \beta_{0i}$$

Sedangkan rasio penyimpangan didefinisikan sebagai:

$$\Delta\beta = D\beta_n / \beta_0 \quad (8)$$

Tegangan listrik pertama yang terukur pada pH = 7 didefinisikan sebagai garis dasar sensor. Penyimpangan garis dasar sensor didefinisikan sebagai perubahan tegangan listrik dari sensor yang sama dari nilai pengukuran awal pada kondisi pengukuran tertentu. Sebagai contohnya, sebuah sensor menunjukkan nilai tegangan listrik  $V_0$  pada waktu awal, dan pada waktu tertentu, sensor menunjukkan nilai tegangan listrik  $V_n$ , sehingga perubahan tegangan listrik adalah:

$$\Delta V_n = V_n - V_0 \quad (9)$$

dengan

$$V_n = V_{n7} - V_{mi} \text{ dan } V_0 = V_{07} - V_{0i}$$

dan rasio penyimpangan didefinisikan:

$$\Delta V = DV_n / V_0 \quad (10)$$

Untuk mengetahui distribusi probabilitas waktu kegagalan yang dimiliki oleh sensor pH berbasis lapisan silika *sol-gel* ini, digunakan bantuan soft-

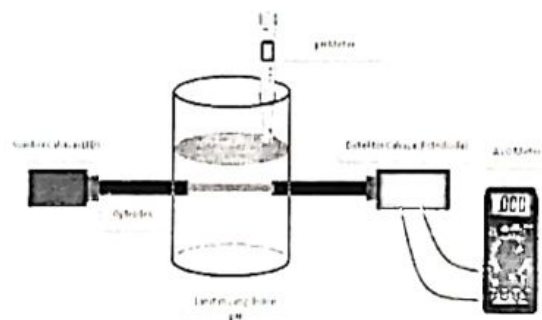
ware *EasyFit 5.2 Professional*. Setelah diperoleh tipe distribusi probabilitas waktu kegagalan dari sensor pH, selanjutnya adalah mencari *lifetime* sensor pH dengan menggunakan formula *mean time to failure* (MTTF).

## DISKUSI

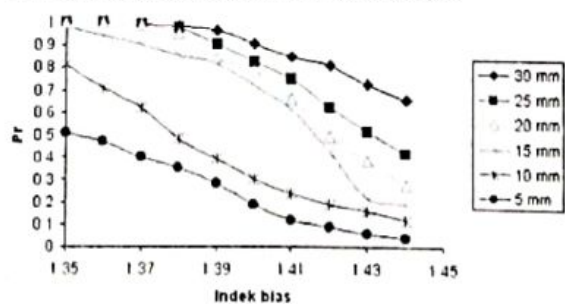
### Hasil Simulasi Pemodelan Sensor pH

Pada gambar 3 ditunjukkan hasil simulasi nilai daya yang hilang akibat lekukan atau  $P_r$  untuk nilai indeks bias 1,35 hingga 1,44 dengan variasi nilai jari-jari lekukan  $R$ . Secara umum dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $R$  maka semakin kecil nilai  $P_r$ -nya. Dengan demikian, jari-jari lekukan sensor tidak boleh terlalu kecil agar daya yang hilang akibat lekukan tidak besar.

Untuk rentang indeks bias rendah (1,35 - 1,39), pada  $R > 15$  mm, dapat dilihat tingkat kemiringan / slope grafik  $P_r$ -nya rendah, sedangkan untuk rentang indeks bias tinggi (1,4 - 1,44), dapat diperoleh nilai slope yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pada  $R > 15$  mm, sensitivitas sensor lebih baik pada rentang indeks bias yang tinggi. Pada  $R = 10$  mm, dapat dilihat grafik respon  $P_r$  memiliki slope yang baik pada seluruh rentang indeks bias, sedangkan pada  $R = 5$  mm memiliki slope yang tajam pada rentang indeks bias rendah,



Gambar 2. Skema peralatan pengukuran pH.



Gambar 3. Pengaruh jari-jari lekukan terhadap nilai  $P_r$  untuk pengukuran indeks bias 1,35 - 1,45



dan nilai slope yang rendah pada rentang indeks bias tinggi. Dari hasil simulasi ini dapat disimpulkan bahwa  $R$  sangat berpengaruh terhadap nilai  $P_r$ . Nilai  $R = 10$  mm dapat memberikan sensitivitas yang baik untuk rentang indeks bias 1,35 – 1,44 yang sebanding dengan nilai pH 3,5 – 11.

### Kurva Karakteristik Sensor pH

Sensor yang digunakan dalam tahap ini ada dua buah. Kedua sensor dibuat tidak dalam waktu yang sama sehingga kondisi proses pembuatan sensor juga dapat dikatakan berbeda. Pengujian terhadap dua sensor bertujuan untuk membandingkan komponen pendukung sensor yaitu fotodiode, bukan untuk membandingkan kondisi proses pembuatan sensor.

Hasil pengujian sensor pertama ditunjukkan pada tabel 1. Dari hasil pengukuran sensor pertama didapatkan range pengukuran tegangan output antara 144 mV - 135 mV dan span output sebesar 7 mV. Span output yang kecil ini menyebabkan sensitivitas dari sensor terdeteksi kecil, yaitu sebesar 3,5 mV/pH. Oleh karena itu, pada pengujian sensor kedua, masalah ini menjadi perhatian yang ingin dipecahkan.

Hubungan antara pH dan tegangan output sensor pertama ditunjukkan pada gambar 4. Kurva pada gambar ini disebut kurva karakteristik sensor. Berdasarkan plot data pada kurva ini, hubungan pH dan tegangan sensor memiliki kecenderungan linier dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,882$ .

Sensor kedua diuji dengan menggunakan fotodiode yang sama tetapi nilai hambatan listriknya diubah agar tegangan keluaran fotodiode menjadi lebih besar. Seperti yang telah dijelaskan di atas, bahwa hal ini bertujuan untuk memperbesar nilai tegangan output sensor sehingga sensitivitas juga menjadi lebih besar. Hasil pengukuran menggunakan sensor kedua ditunjukkan pada tabel 2.

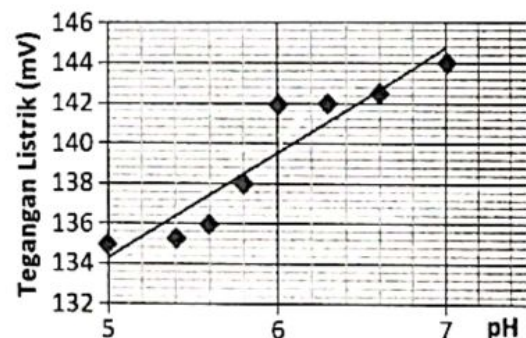
Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada tabel 2, tegangan output berhasil dinaikkan dalam skala volt, yaitu range pengukuran output menjadi 3,340 V - 3,321 V. Namun nilai span dari sensor tetap berskala milivolt, yaitu 19 mV, meskipun nilai ini lebih dari dua kali nilai span sensor pertama. Dengan demikian, sensitivitas dari sensor kedua

Tabel 1. Hasil Pengukuran Sensor Pertama pH Tegangan Listrik (mV)

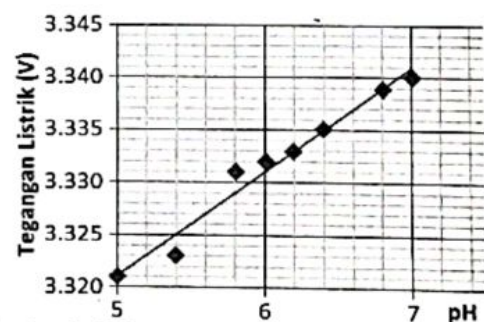
pH	Tegangan Listrik (mV)
7,0	144
6,6	142,5
6,3	142
6,0	141,9
5,8	138
5,6	136
5,4	135,3
5,0	135

Tabel 2. Hasil Pengukuran Sensor Kedua pH Tegangan Listrik (Volt)

pH	Tegangan Listrik (Volt)
7,0	3,340
6,8	3,339
6,4	3,335
6,2	3,333
6,0	3,332
5,8	3,331
5,4	3,323
5,0	3,321



Gambar 4. Hubungan Tegangan Listrik dengan pH untuk Sensor Kesatu



Gambar 5. Hubungan Tegangan Listrik dengan pH untuk Sensor Kedua



adalah 9,5 mV/pH, yang berarti nilainya 2,7 kali sensitivitas sensor pertama.

Hubungan antara pH dan tegangan output sensor kedua ditunjukkan pada gambar 5. Berdasarkan gambar ini, hubungan pH dan tegangan sensor memiliki kecenderungan linier dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,969$ . Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sensor kedua memiliki linieritas yang lebih baik dari pada sensor pertama. Namun hal ini tidak berarti bahwa pembesaran tegangan output (skala volt) menjadi penyebab linieritas sensor lebih baik. Hal ini disebabkan karena kondisi sensor yang diuji tidak identik.

Kesimpulan tentang sifat linieritas dari sensor pH berbasis optik diambil dari data pengujian sensor kedua disebabkan karena sensor ini memiliki koefisien determinasi yang lebih tinggi dari pada sensor pertama. Untuk pH antara 5 – 6, hanya terdapat tiga data sehingga sifat linieritas pada daerah ini belum dapat disimpulkan. Namun jika dari ketiga data ini dibuat persamaan regresi linier, maka diperoleh nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,892$ . Sedangkan untuk pH antara 6 – 7, terdapat 5 data dan persamaan regresi linier dari kelima data ini memiliki koefisien determinasi  $R^2 = 0,989$ . Dengan demikian, dapat ditarik kesimpulan bahwa sensor pH memiliki hubungan pH – tegangan paling linier di daerah pH 6 – 7.

Berdasarkan nilai sensitivitas yang dihasilkan oleh kedua sensor memiliki skala milivolt, dapat disimpulkan bahwa sensitivitas sensor pH berbasis optik yang dibangun dalam penelitian ini mempunyai sensitivitas yang rendah. Setiap kenaikan pH 1 menyebabkan perubahan output skala milivolt. Agar sensor pH ini dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan pH sebesar 0,1, diperlukan rangkaian pengkondisian sinyal yang mampu memperlebar span output.

### Hasil Operational Lifetime Test

Pengujian lifetime sensor pH berbasis optik dilakukan dengan menggunakan 9 buah sensor. Bahan celupan (*dye*) sebagai indikator pH untuk kesembilan sensor ini adalah sama. Namun proses pencelupan tidak dilakukan bersamaan, sehingga tidak menutup kemungkinan ketebalan film dari proses *sol-gel* tidak sama antara satu sensor

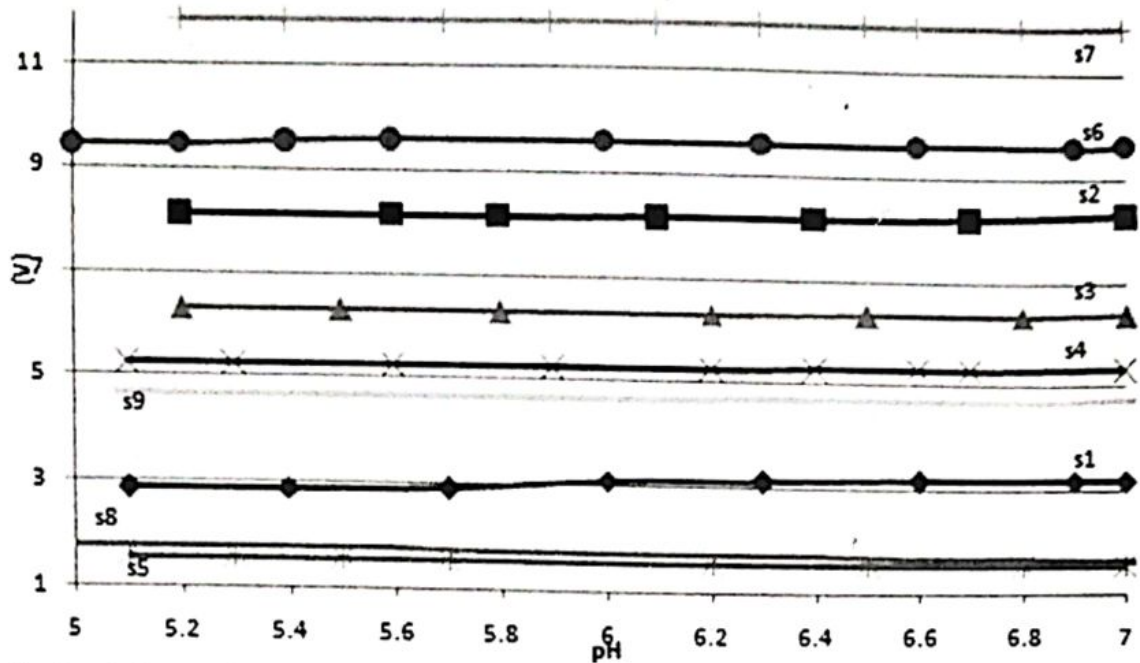
dengan sensor yang lain. Selain itu tebal kupasan *cladding* tidak dijamin sama pada setiap sensor, karena tidak dimilikinya alat kupas yang bisa menghasilkan kupasan dengan ketebalan sesuai seperti yang diinginkan.

Hasil pengujian awal terhadap kesembilan sensor ditunjukkan pada gambar 6. Dari hasil ini terlihat bahwa terjadi perbedaan tegangan awal pada masing-masing sensor. Ada beberapa hal yang dimungkinkan menjadi penyebab terjadinya perbedaan tegangan awal, yaitu pada saat pengupasan jaket dan *cladding* serat optik, karena pada saat pengupasan tersebut bisa saja bagian *core* serat optik ikut terkikis oleh cutter karena tebal *cladding* yang hanya 20  $\mu\text{m}$ . Selain itu, waktu pencelupan ke dalam bahan *sol-gel* yang tidak bersamaan bisa menyebabkan kondisi *sol-gel* yang menempel pada *core* menjadi berbeda untuk masing-masing sensor. Kemudian pada proses pelapisan (*coating*) tidak dilakukan dengan menggunakan alat *dip-coating* karena pembuatan alat ini belum selesai. Sehingga pelapisan secara manual dengan kecepatan 10 cm/menit dimungkinkan belum bisa menghasilkan tebal lapisan yang sama, hal ini mempengaruhi kemampuan lapisan *sol-gel* dalam menyerap cahaya.

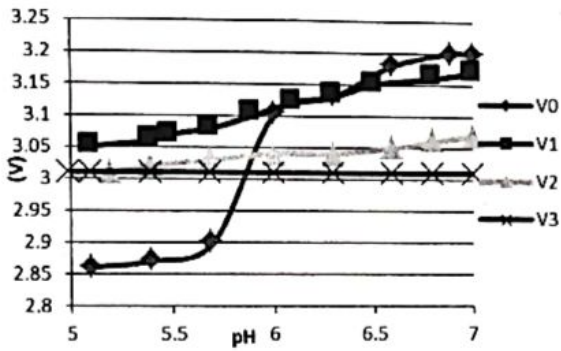
Terjadi satu keanehan pada sensor pH ke delapan (s8) yang ketika nilai pH semakin kecil namun tegangan listrik justru semakin besar, padahal seluruh sensor pH dibuat dengan cara yang sama. Sehingga sensor pH ke delapan ini dinyatakan gagal dan tidak digunakan dalam uji selanjutnya. Sedangkan untuk kedelapan sensor yang lain, dapat digunakan untuk melakukan uji, karena memiliki kecenderungan yang benar dengan nilai koefisien determinasi  $R^2$  di atas 0,8 dan nilai span pada skala puluhan milivolt (span terkecil adalah 21 mV milik sensor kelima atau s5) hingga ratusan milivolt (span terbesar adalah 340 mV milik sensor pertama atau s1).

*Operational lifetime test* dilakukan dengan mengoperasikan sensor pH pada keadaan pH 7 dan suhu 40°C. Sensor digunakan terus menerus hingga semua sensor mengalami kegagalan. Data hasil *operational lifetime test* diambil setiap hari. Hasil uji ini ditunjukkan pada gambar 7-14 untuk masing-masing sensor I – IX kecuali sensor VIII.

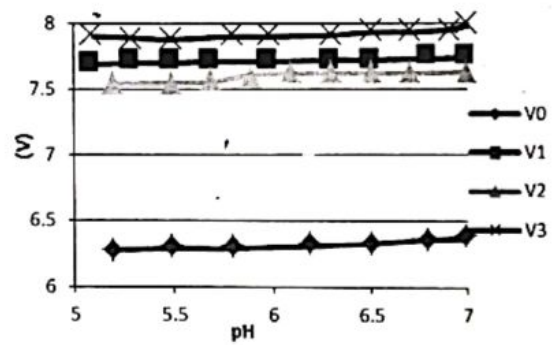




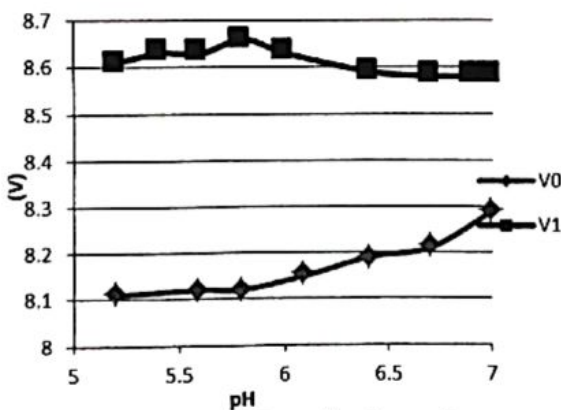
Gambar 6. Kurva Hubungan pH-Tegangan Listrik dari Kesembilan Sensor



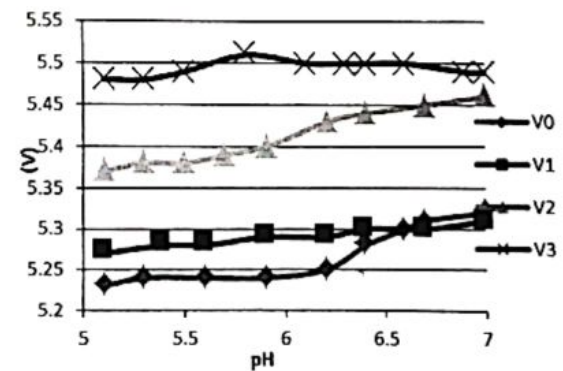
Gambar 7. Kurva Hasil Pengujian Sensor I



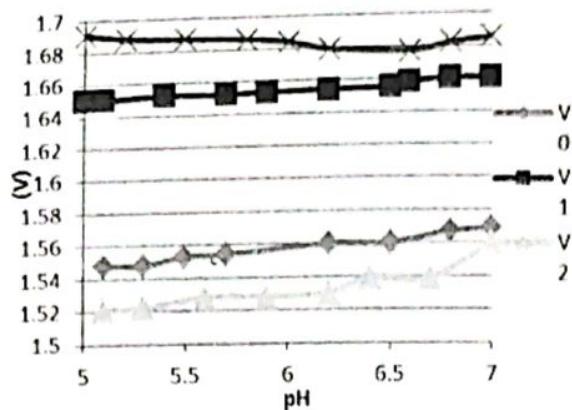
Gambar 9. Kurva Hasil Pengujian Sensor III



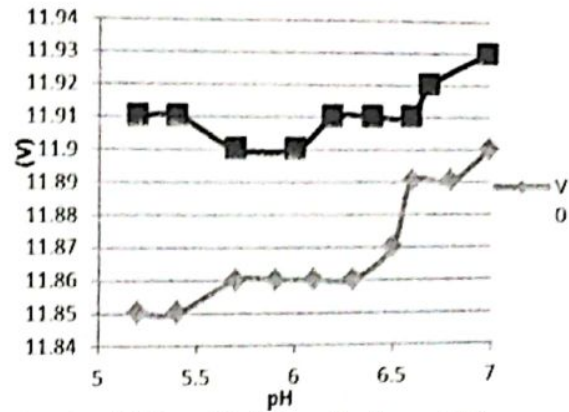
Gambar 8. Kurva Hasil Pengujian Sensor II



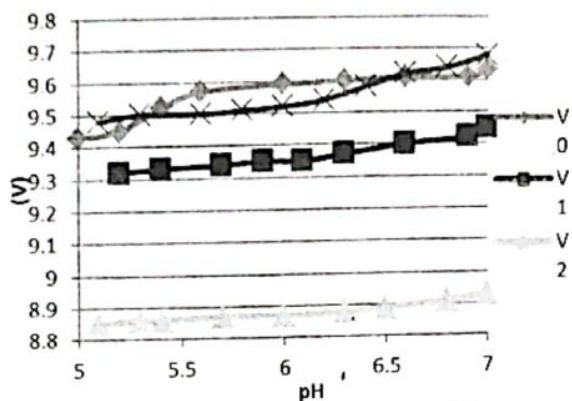
Gambar 10. Kurva Hasil Pengujian Sensor IV



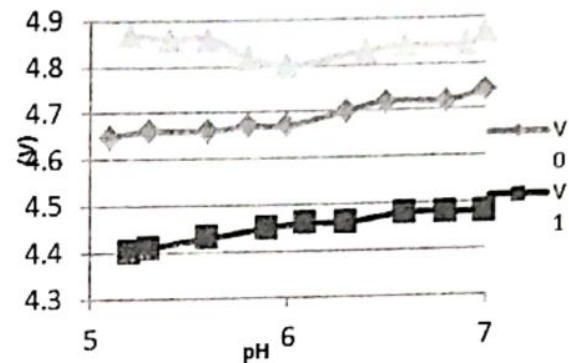
Gambar 11. Kurva Hasil Pengujian Sensor V



Gambar 13. Kurva Hasil Pengujian Sensor VII



Gambar 12. Kurva Hasil Pengujian Sensor VI



Gambar 14. Kurva Hasil Pengujian Sensor IX

V0 merupakan kurva hubungan pH – tegangan dari sensor pada saat awal, V1 merupakan kurva hubungan setelah pengujian hari pertama, dan berturut-turut untuk V2 dan V3 adalah setelah hari kedua dan ketiga.

Dapat dilihat dari gambar 7-14 bahwa nilai tegangan output dan sensitivitas dari semua sensor mengalami perubahan seiring bertambahnya waktu pemakaian. Kegagalan sensor dalam hal ini dinyatakan dari kriteria kegagalan. Jika sensor dikatakan rusak maka pengujian tidak dilanjutkan kembali.

Kriteria yang menjadi parameter kegagalan sensor pH adalah sensitivitas ( $\beta$ ), rasio penyimpangan sensitivitas ( $\Delta\beta$ ), dan rasio penyimpangan tegangan listrik ( $\Delta V$ ). Dari parameter sensitivitas, sensor pH akan dinyatakan gagal apabila dari hasil pengukuran untuk beberapa sampel pH sudah tidak ada perubahan nilai sensitivitas atau perubahan nilai sensitivitas berfluktuasi. Kemudian untuk rasio penyimpangan sensitivitas ( $\Delta\beta$ ) dan rasio penyimpangan tegangan listrik ( $\Delta V$ ), sensor pH akan dinyatakan gagal apabila nilai rasio penyimpangan ( $\Delta\beta$  dan  $\Delta V$ )  $>+0,9$  atau  $<-0,9$ .

Sebagai contoh hasil perhitungan parameter kegagalan ini ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3 merupakan hasil perhitungan parameter kegagalan untuk sensor I. Nilai  $dV1$  merupakan rasio penyimpangan tegangan listrik ( $\Delta V$ ) untuk pengukuran sehari setelah sensor pH menjalani *operational lifetime test*, sedangkan  $dV2$  adalah setelah dua hari, dan  $dV3$  adalah setelah 3 hari. Dengan perhitungan menggunakan persamaan (10), nilai rasio penyimpangan tegangan listrik relatif mendekati nilai -1. Hal ini juga terjadi pada sensor-sensor pH yang lainnya. Sehingga nilai rasio penyimpangan tegangan listrik ( $\Delta V$ ) tidak bisa dijadikan parameter kegagalan sensor pH.

Kolom  $drB1$  menyatakan data rasio penyimpangan sensitivitas ( $\Delta\beta$ ) setelah hari pertama sensor pH menjalani uji *operational lifetime test*, berturut-turut untuk  $drB2$ , dan  $drB3$  adalah setelah hari kedua dan hari ketiga. Dengan menggunakan persamaan (8), nilai penyimpangan sensitivitas untuk sensor I ditunjukkan pada tabel 3, dan diperoleh bahwa sensor pH masih belum mengalami kegagalan hingga pada hari ketiga.



Tabel 3. Hasil Perhitungan Parameter Kegagalan sensor I

pH	dV1	dV2	dV3	dR1	dR2	dR3	B0	B1	B2	B3
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
6,9							1			
6,8								1,003	1,003	1
6,7										
6,6		-1,02	-1	0,0003	-0,006	1,006			1,007	1
6,5								1,006		
6,4										
6,3	-1,04	-1,03	-1	-0,009	-0,012	-0,022	1,022	1,013	1,01	1
6,2										
6,1								1,016		
6		-1,03	-1	-0,022	-0,031	1,032			1,01	1
5,9								1,023		
5,8										
5,7	-1,09	-1,04	-1	-0,067	-0,082	-0,094	1,103	1,029	1,013	1
5,6										
5,5								1,033		
5,4	-1,11	-1,04	-1	-0,071	-0,088	-0,103	1,115	1,036	1,017	1
5,3										
5,2									1,02	
5,1	-1,12		-1	-0,071		-1	1,119	1,039		1
5										1

Tabel 4. Waktu Kegagalan Sensor pH

Sensor	I	II	III	IV	V	VI	VII	IX
Waktu (hari)	3	2	3	3	3	>3	1	2

Kolom B1 menyatakan sensitivitas sensor pH setelah hari ketiga menjalani *operational lifetimetest*, berturut-turut untuk B2, dan B3 adalah setelah hari kedua dan hari ketiga. Dengan menggunakan persamaan (7), nilai sensitivitas untuk sensor I ditunjukkan pada tabel 3. Pada kolom B3 terlihat bahwa nilai sensitivitas tidak mengalami perubahan, atau  $\beta = 1$  untuk setiap sampel pH. Artinya untuk setiap pengukuran sampel pH, sensor pH sudah tidak memberikan perubahan pada nilai keluaran tegangan listrik. Oleh karena itu, sensor pH dinyatakan gagal setelah tiga hari.

Setelah dilakukan *operational lifetime test*, diperoleh data waktu kegagalan sensor pH seperti yang ditunjukkan pada tabel 4. Sebanyak 4 buah sensor pH telah mengalami kegagalan setelah hari ketiga, dua sensor mengalami kegagalan setelah hari kedua, dan satu sensor mengalami kegagalan setelah hari pertama. Sedangkan sensor VI masih belum mengalami kegagalan pada hari ketiga.

Dari data waktu kegagalan sensor pH, dilakukan pencarian distribusi probabilitas yang paling mendekati distribusi probabilitas sensor pH dengan menggunakan software *EasyFit 5.2 Professional*. Karena untuk sensor VI belum mengalami kegagalan setelah hari keempat dan setelah hari kelima juga masih bekerja.



Gambar 15. Foto kondisi lapisan film *sol-gel* setelah pemakaian 57 jam

Diasumsikan sensor pH mengalami kegagalan pada hari keenam. Hasil pencarian distribusi probabilitas waktu kegagalan sensor pH menunjukkan bahwa distribusi probabilitas sensor pH yang paling mendekati adalah lognormal dengan nilai deviasi standar  $\sigma = 0,47844$  dan nilai rata-rata  $\mu = 0,94656$ .

Untuk mencari nilai *lifetime* sensor pH, dapat dilakukan dengan menggunakan rumus *mean time to failure* (MTTF) yang didasarkan pada bentuk fungsi probabilitas terkait yaitu lognormal. Persamaan MTTF yang sesuai dengan data kegagalan sensor pH optik adalah persamaan:

$$E(t) = \exp\left(\mu + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\right) \quad (11)$$

Dengan memasukkan nilai  $\sigma = 0,47844$  dan  $\mu = 0,94656$ , maka didapatkan nilai MTTF  $E(t) = 2,89$  hari. Dengan demikian, *lifetime* dari sensor pH berbasis optik ini adalah 2,89 hari atau dibulatkan menjadi 3 hari.

Faktor yang menyebabkan pendeknya umur sensor pH berbasis optik ini adalah rusaknya film indikator pada serat optik seperti yang ditunjukkan pada gambar 15. Dengan demikian, teknik pelapisan *sol-gel* ternyata tidak cukup mampu membuat lapisan indikator pH bertahan lebih lama pada serat optik. Lebih lanjut, dalam penelitian yang telah dilakukan masih belum diketahui penyebab rusaknya lapisan film indikator pH, apakah pengaruh temperatur atau pengaruh tingkat keasaman larutan uji atau pengaruh keduanya. Percobaan lebih lanjut perlu dilakukan untuk menjawab pertanyaan ini.

Pada pengukuran pH secara *real time*, masalah *lifetime* yang pendek harus bisa diatasi agar umur sensor pH dapat lebih lama saat digunakan secara terus menerus pada larutan uji. Pada penelitian selanjutnya, masalah umur sensor yang rendah akan menjadi salah satu masalah yang dipecahkan agar pengukuran pH secara *real time* dapat tercapai.

## KESIMPULAN

Pada makalah ini telah ditampilkan hasil percobaan karakterisasi sensor pH serat optik yang dibuat dengan proses pelapisan sol-gel dalam rangka membuat pengukuran pH secara *real time*. Pemakaian sensor pH dapat dilakukan dengan bentuk lekukan untuk mempermudah pemasangan sensor. Berdasarkan hasil simulasi, jari-jari lekukan yang paling baik dalam menghasilkan sensitivitas pengukuran adalah 10 mm.

Sensor pH serat optik yang dibuat memiliki hubungan pH - tegangan output yang cenderung linier dengan koefisien determinan lebih besar dari 0,8. Hubungan pH - tegangan sensor paling linier di daerah pH 6 - 7. Selain itu juga dibuktikan bahwa sensor pH memiliki span (rentang) pengukuran output dalam skala milivolt, sehingga sensitivitas sensor pH adalah dalam orde milivolt. Rangkaian fotodetektor dapat mempengaruhi nilai tegangan output yang dihasilkan namun tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap span output sensor.

Pada percobaan *operational lifetime test*, terbukti bahwa parameter rasio penyimpangan tegangan listrik ( $\Delta V$ ) tidak bisa dijadikan parameter kegagalan sensor pH. Parameter kegagalan yang dapat digunakan untuk sensor pH adalah sensitivitas ( $\beta$ ) dan rasio penyimpangan sensitivitas ( $\Delta\beta$ ). Penggunaan sensor pH secara *real time* mengharuskan sensor harus dicelupkan secara terus menerus ke dalam larutan uji. Dengan menggunakan kondisi celupan pada pH 5 dan temperatur 40 C diperoleh kesimpulan bahwa umur atau *lifetime* dari sensor pH optik adalah 3 hari. Selain itu diperoleh kesimpulan bahwa data waktu kegagalan sensor pH optik memiliki distribusi probabilitas berbentuk lognormal dengan nilai mean  $\mu = 0,94656$  hari dan nilai deviasi standar  $\sigma = 0,47844$  hari.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bocchat, Alvaro AP, Daoning Su, Denis R. Hall, and Julian DC Jones. (1991). *Bend loss in large core multimode optical fiber beam delivery systems*, Applied Optics, Vol. 30, No. 3, pp. 321-327.
- Gupta, B.D., S.Sharma. (1998). *A long range fiber optic pH Sensor prepared by dye doped sol-gel immobilization technique*, Optics Communications, Vol.154, p.282-284
- Lehmann, H., Schwotze, r G., Czerney, P., Mohr, G.J. (1995). *Fiber-optic pHmeter using NIR dye*, Sens. Actuators B 29, 392-400.
- Lee, B. (2003). *Review of present status of optical fibre sensors*, Optical Fibre Technology, vol. 9, hal. 57-79.
- Lin, J. (2000). Recent Development and Application of Optical and Fiber Optic pH Sensors. trends in analytical chemistry, vol. 19, no. 9, p.541-552
- Morris, A. S. (2001). *Measurement and Instrumentation Principles*, 3<sup>rd</sup> edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Rayss, J., Sudolski, G. (2002). *Ion adsorption in the porous sol-gel silica layer in the fibre optic pH sensor*, Sens. Actuators B 87, 397-405.
- Sharma, N.K., Gupta, B.D. (2003). *Fabrication and characterization of pH sensor based on side polished single mode optical fiber*, Opt. Commun., 216, 299-303.
- Sheppard, N.F., Guiseppi-Elie A. (1999). *pH Measurement*, pada: John G. Webster (Editor-in-chief), Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase, CRC Press, Boca Raton, FL, chapter 71