

PENGEMBANGAN PROBE SENSOR KELEMBABAN SERAT OPTIK DENGAN CLADDING GELATIN

Akhiruddin Maddu¹, Kun Modjahidin¹, Sar Sardy², dan Hamdani Zain²

1. Departemen Fisika, FMIPA, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

2. Program Optoelektroteknika dan Aplikasi Laser, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta 10430, Indonesia

E-mail: akhirmaddu@ipb.ac.id

Abstrak

Telah dikembangkan probe sensor kelembaban menggunakan serat optik dengan *cladding* gelatin. Pada probe sensor kelembaban ini, *cladding* asli serat optik diganti dengan lapisan gelatin sebagai *cladding* sensitif kelembaban. Untuk menguji respon sensor serat optik yang dibuat, dilakukan pengukuran intensitas cahaya yang ditransmisikan pada probe serat optik untuk setiap variasi perlakuan kelembaban berbeda. Respon probe sensor serat optik ini diukur dari kelembaban 42% hingga 99% RH, hasilnya memperlihatkan kurva transmisi optik bervariasi terhadap nilai kelembaban relatif (RH). Transmisi optik di dalam probe serat optik meningkat terhadap kenaikan nilai RH pada suatu rentang panjang gelombang spesifik, yaitu pada spektrum pita hijau hingga merah (500 nm - 700 nm), dengan variasi signifikan pada rentang 600 nm sampai 650 nm atau dalam pita spektrum kuning hingga merah. Panjang gelombang dimana intensitas maksimum transmisi optik terjadi pada panjang gelombang 610 nm. Dengan demikian, probe sensor kelembaban serat optik ini dapat merespon kelembaban dari 42 %R hingga 99%H dengan respon terbaik pada rentang kelembaban 60%RH hingga 72%R yang memiliki linieritas dan sensitifitas yang cukup baik.

Abstract

Development of Fiber-Optic Humidity Sensor Probe with Gelatin Cladding. Humidity sensor based on optical fiber with gelatin cladding has been developed. In this humidity sensor probe, the origin cladding of optical fiber is replaced by gelatin coating as humidity sensitive cladding. Testing of the optical fiber sensor probe was conducted by measuring of light intensity transmitted on the optical fiber probe for each variation of different humidity treatments. Response of the optical fiber sensor probe measured from 42%RH to 99%RH, the results show an optical transmission curve varied with relative humidity (RH). Optical transmission in the optical fiber probe increase with RH value at a specific wavelength range, that is from green to red spectrum bands (500 nm – 700 nm), where a significant variation from 600 nm to 650 nm in yellow to red spectrum bands. Wavelength where is a maximum intensity of optical transmission occurs at 610 nm. Therefore, the optical fiber humidity sensor probe could response humidity form 42%RH to 99%RH with the best response in humidity range of 60%RH to 72%RH that is have a good linearity and sensitivity.

Keywords: humidity sensor, fiber-optic sensor, gelatin, swelling

1. Pendahuluan

Ukuran jumlah uap air di udara diistilahkan sebagai kelembaban udara. Jumlah uap air mempengaruhi proses-proses fisika, kimia dan biologi di alam, dengan demikian juga mempengaruhi kenyamanan manusia begitupun terhadap lingkungan [1]. Jika besarnya kandungan uap air melebihi atau kurang dari kebutuhan yang diperlukan, maka akan menimbulkan gangguan dan kerusakan. Sebagai contoh, bahan makanan dan obat-obatan yang disimpan dalam gudang penyimpanan memerlukan kondisi kelembaban tertentu agar tidak cepat rusak.

Berbagai teknik dan material telah dikembangkan dan digunakan sebagai sensor kelembaban dengan kekurangan dan kelebihannya. Sensor kelembaban resistif dan kapasitif telah banyak digunakan dengan menggunakan berbagai jenis bahan yang sensitif terhadap kelembaban. Sensor resistif didasarkan pada perubahan sifat konduksi listrik material sensor terhadap kelembaban, sedangkan sensor kapasitif didasarkan pada perubahan nilai kapasitansi material terhadap kelembaban [1]. Sensor kelembaban resistif biasanya menggunakan bahan-bahan oksida keramik seperti TiO₂ [2,3], sedangkan sensor kelembaban kapasitif menggunakan bahan-bahan polimer seperti PMMA [4].

Sensor kelembaban lainnya didasarkan atas perubahan sifat optik bahan terhadap perubahan kelembaban [1], salah satunya dengan menggunakan hidrogel yang mengalami pembengkakan saat menyerap uap air. Bahan-bahan hidrogel meliputi *polyvinyl alcohol* (PVA), *polystyrene* (PS) dan gelatin [5,6].

Gelatin adalah salah satu bahan hidrogel dari polimer alami yang dapat mengalami pembengkakan ketika menyerap air. Gelatin merupakan protein alami yang diekstrak dari tulang dan kulit berbagai jenis binatang. Gelatin tidak berwarna (transparan), tidak berbahaya, tidak berasa, mampu menyerap air 5-10 kali bobotnya, membentuk gel pada suhu 35-40°C dan larut dalam air panas, membengkak (*swelling*) dalam air dingin, dapat berubah secara *reversible* dari sol ke gel dan dapat melindungi koloid [6].

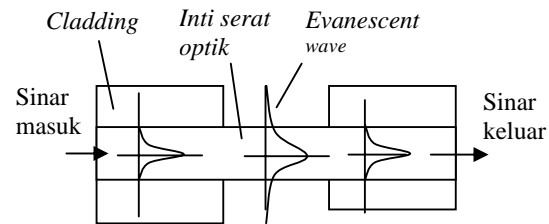
Penggunaan bahan hidrogel untuk sensor kelembaban telah banyak dilakukan, baik tipe resistif atau kapasitif. Untuk sensor kelembaban optik menggunakan bahan hidrogel juga banyak dilakukan, termasuk dengan gelatin sebagai hidrogel alami. Prinsipnya, bahan hidrogel gelatin mengalami pembengkakan ketika menyerap air sehingga kerapatannya berkurang yang mengakibatkan sifat optiknya juga berubah, yaitu nilai indeks bias optiknya berkurang terhadap jumlah air yang diserap [6-8].

Polimer seperti gelatin membengkak karena air mengisi rongga-rongga pada polimer (diameter rongga membesar), akibatnya akan mengurangi indeks bias polimer, sehingga indeks bias polimer akan mendekati indeks bias air [7]. Gelatin memiliki pori yang relatif lebih besar dibandingkan polimer-polimer sintesis [6].

Perubahan sifat optik (indeks bias) polimer gelatin ketika menyerap uap air dapat dimanfaatkan sebagai material sensor kelembaban optik [7,8]. Dalam makalah ini gelatin digunakan sebagai *cladding* pengganti bagi serat optik untuk aplikasi probe sensor kelembaban relatif (RH).

Pada penelitian ini probe kelembaban dibuat pada bagian tengah serat optik dengan mengganti *cladding* aslinya dengan lapisan gelatin. Ketika cahaya dilewatkan pada probe serat optik, intensitas yang ditransmisikan bergantung pada nilai indeks bias *cladding* lapisan gelatin yang sensitif kelembaban. Karena nilai indeks bias lapisan gelatin berubah terhadap nilai kelembaban sekelilingnya melalui fenomena *swelling*, maka intensitas yang ditransmisikan melalui probe serat optik akan berubah pula.

Prinsip kerja sensor kelembaban serat optik ini didasarkan pada fenomena absorpsi gelombang *evanescent* pada antarmuka inti serat optik dan *cladding* gelatin. Perubahan nilai indeks bias *cladding*



Gambar 1. Gelombang *evanescent*

gelatin akan menentukan besarnya intensitas gelombang *evanescent* yang terserap, sehingga juga menentukan intensitas gelombang optik yang terpandu atau ditransmisikan melalui inti serat optik.

Fenomena gelombang *evanescent* diperlihatkan pada Gambar 1. Pada saat sinar cahaya menyalur pada serat optik, sebagian gelombang terserap ke dalam *cladding* dan energi gelombang tersebut menghilang secara eksponensial, gelombang *evanescent* diberikan oleh persamaan [9,10]

$$E_z = E_0 \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) \quad (1)$$

dimana z adalah jarak penjalaran sinar, E_0 adalah medan gelombang mula-mula dan d_p disebut *penetration depth* yang dirumuskan sebagai

$$d_p = \frac{\lambda}{\left(2\pi/n\right)\sqrt{\sin^2 \theta - n^2}} \quad (2)$$

yang menyatakan kedalaman gelombang memasuki *cladding* dan berkurang secara eksponensial, dimana $n = (n_{clad} / n_{core})$. Dari persamaan di atas tampak bahwa kedalaman penetrasi gelombang *evanescent* bergantung pada nilai indeks bias *cladding* relatif terhadap indeks bias inti. Semakin dalam penetrasi gelombang *evanescent* semakin kecil intensitas cahaya yang terpandu (ditransmisikan) melalui probe serat optik.

2. Metode Penelitian

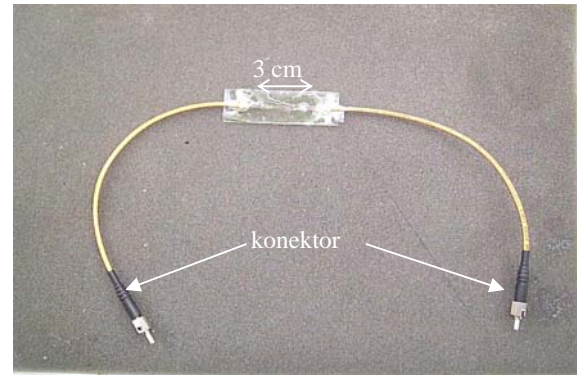
Bahan-bahan yang dipergunakan adalah bubuk gelatin, serat optik *multimode step index* (62,5/125), *ST connector*, *connector adapter* ST-SMA, dan garam-garam ($MgCl_2$, $NaCl$, K_2CO_3) serta air. Peralatan yang digunakan adalah *fiber optic toolkit*, gelas-gelas kimia, pemotong kaca, *hot plate magnetic stirrer*, termometer, *Scanning Digital Monochromator (Optometric)*, *Interface Science Workshop 750* (PASCO), *High Sensitivity light Sensor* (PASCO), *Humidity Sensor* (PACSO), PC (*personal computer*), sumber cahaya, wadah uji kelembaban, *cutter*, dan gunting.

Sepanjang 30 cm serat optik *multimode step index* (62,5/125) dipotong untuk digunakan membuat probe kelembaban. Pada kedua ujung serat optik masing-masing dipasang konektor ST. Tepat pada bagian tengah serat optik, sepanjang 3 cm dibuang *cladding* aslinya menggunakan *toolkit* serat optik sehingga tertinggal intinya saja yang nantinya menjadi probe sensor. Inti serat optik ini dibersihkan dengan alkohol dan dikeringkan, selanjutnya dilapisi dengan gelatin sebagai *cladding* pengganti yang sensitif kelembaban. Untuk pelapisan dengan gelatin, pertama-tama dibuat gel dari bubuk gelatin dengan cara memasukkan sejumlah bubuk gelatin ke dalam air pada suhu 70°C sambil diaduk dengan pengaduk magnetik hingga bubuk gelatin larut merata. Selanjutnya larutan gelatin didinginkan di udara terbuka hingga mencapai suhu 25°C dan larutan gelatin membentuk gel.

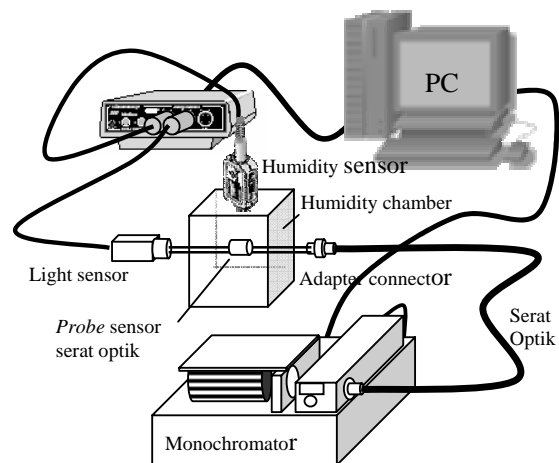
Pelapisan (*coating*) inti serat optik dilakukan dengan teknik *dip-coating* yaitu dengan mencelupkan bagian inti tanpa *cladding* tadi ke dalam gel gelatin kemudian ditarik pelan-pelan keluar dari wadah gel. Selanjutnya probe serat optik ini dibiarkan mengering di udara terbuka selama sehari semalam. Agar pengeringannya lebih cepat, dilakukan di dalam pendingin (*freezer*).

Set-up pengukuran dan pengambilan data ditunjukkan pada Gambar 3. Sebagai sumber cahaya digunakan lampu *tungsten* yang telah tersedia pada monokromator. Keluaran monokromator dihubungkan dengan bundel serat optik yang merupakan kelengkapan dari monokromator. Ujung bundel serat optik ini dihubungkan dengan probe serat optik yang telah dibuat menggunakan adapter konektor ST-SMA, adapter konektor ini digunakan karena kedua ujung serat optik memiliki konektor yang berbeda, yaitu konektor ST pada probe dan konektor SMA pada ujung bundel serat optik dari monokromator. Bagian probe sensor serat optik berada di dalam wadah uji kelembaban (*humidity chamber*), dan ujung lain dari probe ini diarahkan pada sensor cahaya (PASCO) yang terhubung dengan interface. Monokromator dan interface dihubungkan dengan komputer (PC) untuk mengontrol monokromator dan pengambilan data intensitas cahaya dengan sensor cahaya. Jadi di dalam komputer telah dimasukkan dua *software*, masing-masing untuk monokromator dan sensor cahaya.

Pengambilan data berupa spektrum cahaya yang melewati sistem probe sensor serat optik dilakukan melalui pemindaian (*scanning*) panjang gelombang pada monokromator dengan program yang ada di dalam komputer. Setiap nilai panjang gelombang diukur intensitas cahaya dengan sensor cahaya. Pengambilan kedua data harus tepat antara panjang gelombang dengan intensitas yang tercatat, sehingga pengesetan program komputer serta *running* program harus tepat.



Gambar 2. Probe sensor kelembaban serat optik



Gambar 3. Set-up pengujian respon kelembaban

Data yang diambil dalam pengukuran ini adalah spektrum intensitas transmisi serat optik. Pertama-tama, data transmisi diambil sebelum serat optik dilapisi gelatin untuk mendapatkan nilai transmisi acuan (referensi). Transmisi referensi ini digunakan untuk membandingkan nilai intensitas transmisi cahaya yang melewati sensor serat optik akibat adanya perlakuan kelembaban.

Perlakuan kelembaban yang berbeda dilakukan dengan memberikan berbagai macam garam dan air ke dalam wadah uji. Garam-garam yang digunakan diantaranya Magnesium klorida ($MgCl_2$), Kalium karbonat (K_2CO_3), dan Natrium klorida ($NaCl$), juga air digunakan untuk mendapatkan kondisi kelembaban maksimum. Untuk memantau kelembaban wadah uji digunakan sensor kelembaban (PASCO) yang juga terhubung ke *interface* PASCO yang sama.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengondisian kelembaban di dalam wadah diperoleh dengan menggunakan prinsip serapan uap air oleh garam-garam berbeda. Masing-masing garam menyerap jumlah uap air yang berbeda sehingga mengakibatkan variasi nilai kelembaban yang berbeda di dalam wadah uji. Di samping itu variasi nilai kelembaban yang lain diperoleh dengan pemberian air di dalam wadah yang menghasilkan kelembaban tertinggi. Sementara kelembaban dengan atmosfer udara juga diukur dan diambil sebagai satu nilai variasi kelembaban lainnya. Variasi kondisi kelembaban di dalam wadah uji dirangkum pada Tabel 1. Variasi nilai kelembaban yang diperoleh tidak menunjukkan rentang yang teratur namun sudah cukup sebagai variasi perlakuan kelembaban untuk menguji respon sensor serat optik yang dibuat.

Sensor serat optik dibuat dari serat optik multimoda dengan panjang 30 cm, bagian tengah serat optik sepanjang 3 cm diganti *cladding* aslinya dengan *cladding* lapisan gelatin yang sensitif kelembaban. Panjang bagian sensitif kelembaban ini merupakan salah satu faktor yang menentukan respon probe sensor serat optik. Pada penelitian ini dibuat dua buah probe sensor dengan perbedaan pada ketebalan lapisan *cladding* gelatin. Pada probe A pelapisan *cladding* gelatin dilakukan dengan cara pencelupan (*dipping*) hanya sekali, sedangkan probe B dilakukan pencelupan sebanyak dua kali. Dengan demikian probe B memiliki *cladding* gelatin lebih tebal dibandingkan probe A.

Respon probe sensor serat optik terhadap kelembaban diamati melalui spektrum transmisi serat optik untuk setiap variasi nilai kelembaban di dalam wadah uji. Pengukuran spektrum transmisi ini dilakukan dengan menggunakan set-up pada Gambar 3.

Karakteristik spektrum transmisi probe sensor serat optik terhadap variasi kelembaban diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Spektrum transmisi yang dipindai (*scanning*) dari 300 nm hingga 800 nm memperlihatkan daerah respon probe sensor dengan pita spektrum yang lebar dari 500 nm hingga 700 nm, dimana terjadi variasi spektrum transmisi akibat perlakuan kelembaban, yang merupakan spektrum hijau

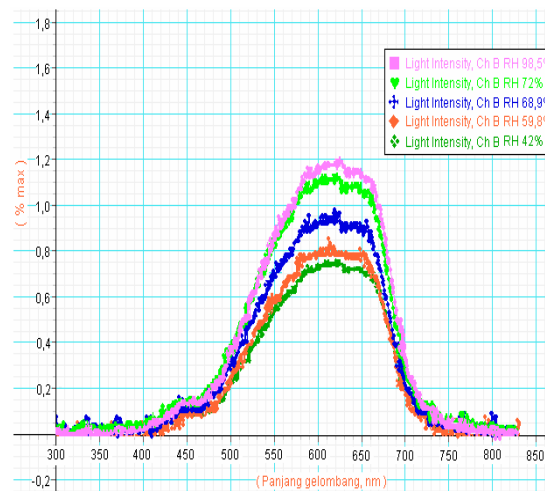
Tabel 1. Kondisi kelembaban berbeda dalam wadah uji

No	Bahan	RH (%)	Suhu (°C)
1	Air	99	29
2	NaCl	72	29
3	Udara	69	29
4	K ₂ CO ₃	60	29
5	MgCl ₂	42	29

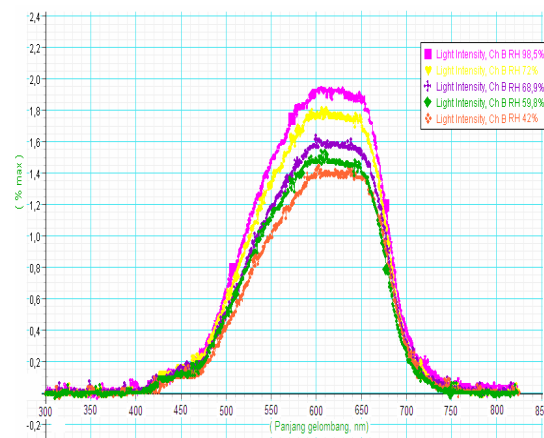
hingga merah. Sedangkan variasi signifikan pada spektrum transmisi terjadi pada rentang yang lebih sempit dari 600 nm – 650 nm (spektrum merah), sebagai daerah respon maksimum probe sensor serat optik ini.

Kedua probe yang dibuat mempunyai karakteristik spektrum transmisi yang sama, perbedaan hanya pada tinggi intensitas transmisinya. Intensitas transmisi A lebih tinggi dibanding probe B, hal ini karena probe A memiliki lapisan *cladding* gelatin lebih tipis dibanding probe B berdasarkan jumlah pencelupan (*dipping*) pada probe pada saat pembuatan probe, probe A sekali pencelupan sedangkan probe dua kali pencelupan.

Perubahan karakteristik transmisi probe sensor serat optik disebabkan adanya perubahan indeks bias *cladding* gelatin akibat pengaruh perubahan nilai kelembaban. Kelembaban udara ditandai oleh jumlah



Gambar 4. Spektrum transmisi probe A



Gambar 5. Spektrum transmisi probe B

uap air di udara. Perubahan nilai indeks bias gelatin ditentukan oleh jumlah uap air yang diserap. Uap air yang diserap oleh lapisan gelatin akan memasuki rongga-rongga di dalam gelatin yang menyebabkan gelatin membengkak (*swelling*). Seiring dengan pembengkakan gelatin, kerapatan gelatin akan berkurang yang berakibat indeks biasnya mengecil. Perubahan indeks bias gelatin terhadap konsentrasi uap air yang diserap diberikan oleh persamaan berikut [11]

$$n_{ps} = \{n_{pu} x(1 - f_{H_2O})\} + \{n_{H_2O} x f_{H_2O}\} \quad (3)$$

dengan

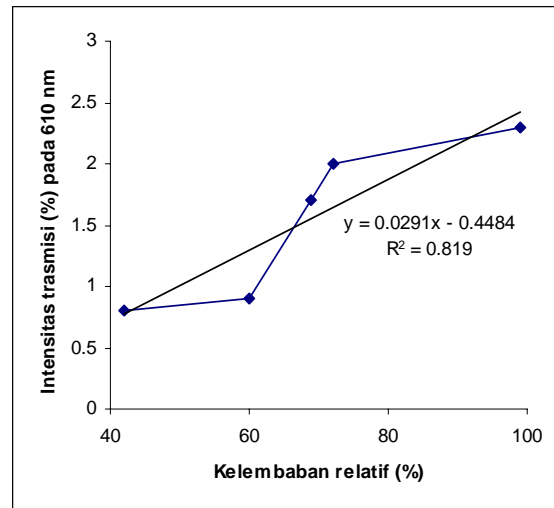
$$f_{H_2O} = \frac{\{(d_{ps} / d_{pu})^3 - 1\}}{(d_{ps} / d_{pu})} \quad (4)$$

dimana n_{ps} adalah indeks bias polimer saat *swelling*, n_{pu} indeks bias sebelum *swelling*, n_{H_2O} indeks bias air, d_{ps} diameter rongga saat *swelling*, d_{pu} diameter rongga sebelum *swelling*, dan f_{H_2O} fraksi uap air yang diserap.

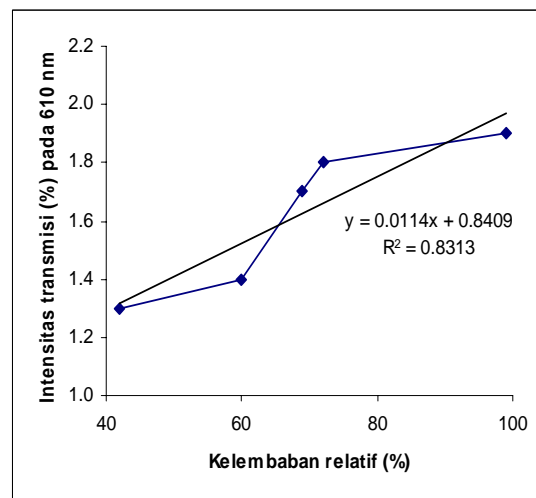
Perubahan indeks bias pada *cladding* akibat *swelling* menyebabkan berubahnya sudut kritis pada pemantulan internal total di dalam inti serat optik (*core*), akibatnya sebagian energi cahaya terserap oleh *cladding* keluar dari inti serat secara eksponensial sebagai gelombang *evanescent*. Penyerapan cahaya yang disebabkan oleh perubahan indeks bias *cladding* berpengaruh terhadap besarnya intensitas cahaya yang ditransmisikan, besarnya perubahan intensitas cahaya yang ditransmisikan secara tidak langsung akibat perubahan kelembaban. Besarnya energi cahaya yang terserap oleh *cladding* sebagai gelombang *evanescent*, dijadikan sebagai indikasi adanya perubahan kelembaban dan menjadi prinsip kerja dari sistem sensor serat optik dengan *cladding* berbasis polimer gelatin ini.

Berdasarkan variasi spektrum transmisi probe sensor serat optik terhadap kelembaban (Gambar 4 dan 5), diketahui bahwa lapisan *cladding* gelatin pada serat optik dapat merespon kelembaban udara di sekitarnya. Untuk melihat lebih jelas respon probe sensor serat optik, maka dibuat kurva antara nilai intensitas transmisi pada panjang gelombang respon maksimum (610 nm) terhadap variasi kelembaban, diperoleh kurva seperti pada Gambar 6 dan 7. Tampak pada Gambar 6 dan 7 bahwa kenaikan nilai kelembaban (RH) mengakibatkan kenaikan nilai intensitas transmisi pada panjang gelombang 610 nm. Hal ini terjadi karena nilai indeks bias lapisan *cladding* gelatin menurun terhadap kenaikan kelembaban sehingga semakin sedikit gelombang cahaya (*evanescent wave*) yang terserap ke dalam lapisan *cladding* gelatin tersebut, akibatnya intensitas cahaya yang ditransmisikan meningkat. Perubahan intensitas cahaya yang ditransmisikan disebabkan oleh perubahan sudut kritis pada antarmuka *cladding-core* serat optik akibat perubahan indeks bias *cladding* gelatin.

Kurva-kurva yang diperoleh tidak cukup linier untuk rentang nilai kelembaban yang diujikan, yaitu dari 42 %RH hingga 99%RH, seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7. Namun demikian, pada kurva-kurva tersebut tampak ada bagian yang cukup linier dengan variasi respon yang cukup signifikan, yaitu pada rentang kelembaban 60%RH hingga 72%RH. Karakteristik ini mirip untuk kedua probe yang dibuat. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa probe sensor serat optik yang dibuat memiliki respon terbaik pada rentang 60%RH – 72%RH.



Gambar 6. Kurva intensitas transmisi vs kelembaban relatif (%RH) pada 610 nm



Gambar 7. Kurva intensitas transmisi vs kelembaban relatif (%RH) pada 610 nm

Sensitivitas pada rentang kelembaban antar 60%RH hingga 72%RH dapat dihitung menggunakan hubungan berikut

$$S = \frac{\Delta T_{610}}{\Delta \% RH} \quad (5)$$

dengan ΔT_{610} adalah perubahan intensitas transmisi pada panjang gelombang 610 nm dan $\Delta \% RH$ adalah variasi kelembaban yang diujikan. Diperoleh nilai sensitivitas yang berbeda untuk kedua probe, yaitu sekitar 0,1 untuk probe A dan 0.03 untuk probe B. Nilai sensitivitas ini menyatakan besarnya variasi intensitas transmisi optik pada 610 nm untuk setiap kenaikan 1%RH, dalam hal ini diambil untuk rentang kelembaban dari 60 %RH hingga 72 %RH sebagai rentang respon terbaik dari probe sensor yang dibuat.

Sensitivitas probe A lebih baik daripada probe B, hal ini disebabkan karena ketebalan lapisan *cladding* gelatin pada probe A lebih tipis dibanding pada probe B, sedemikian sehingga proses *swelling cladding* gelatin pada probe A lebih optimal.

Dalam beberapa artikel, probe sensor serat optik dikembangkan dengan menggunakan *cladding* gelatin yang doping CoCl_2 untuk meningkatkan sensitivitas probe sensor terhadap kelembaban [7,8].

4. Kesimpulan

Berdasarkan karakteristik probe sensor kelembaban serat optik dengan *cladding* gelatin yang dihasilkan, maka dapat disimpulkan bahwa lapisan gelatin dapat merespon perubahan kelembaban udara melalui fenomena *swelling* ketika menyerap uap air. Daerah respon optik gelatin diketahui pada spektrum hijau hingga merah (500 nm - 700 nm), dengan respon signifikan pada pita merah (600 nm - 650 nm). Probe

sensor kelembaban serat optik ini dapat merespon kelembaban dari 42 %R hingga 99%H dengan respon terbaik pada rentang kelembaban 60%RH hingga 72%R. Sensitivitas probe sensor serat optik dipengaruhi oleh ketebalan lapisan *cladding* gelatin, dimana probe dengan lapisan *cladding* gelatin lebih tipis memiliki sensitivitas lebih baik karena proses *swelling* lebih optimal pada lapisan yang lebih tipis.

Daftar Acuan

- [1] P. Gaikwad, PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Mississippi State Engineering, USA, 2003.
- [2] A. Bearzotti, A. Bianco, G. Montesperelli, E. Travesa, Sensors and Actuators B, 18-19 (1994) 525.
- [3] F.D. Anggraini, Skripsi Sarjana, Departemen Fisika, FMIPA, Institut Pertanian Bogor, Indonesia, 2002.
- [4] A.R.K. Ralston, J.A. Tobin, S.S. Bajikar, D.D. Denton, Sensor and Actuators B 22 (1994) 139.
- [5] M. Chaplin, Gelatin. www.wikipedia.org, 2003
- [6] P.W.K. Anggraini, Skripsi Sarjana, Departemen Fisika, FMIPA, Institut Pertanian Bogor, Indonesia, 2003.
- [7] S. Otsuki, K. Adachi, J. of Applied Polym. Sci. 48 (1993) 1557.
- [8] C.M. Tay, K.M. Tan, S.C. Tjin. C.C. Chan, H. Rahardjo, Microwave and Optical Technology Letters 43 (2004) 387.
- [9] M. Ahmad, Larry L. Hench, Biosensors & Bioelectronics 20 (2005) 1312.
- [10] S.K. Khijwania, Kirthi L. Srinivasan, Jagdish P. Singh, Sensors and Actuators B 104 (2005) 217.
- [11] M.T.V. Rooney, W.R. Seitz, Analyt. Commun. 36 (1999) 267.