

KARAKTERISASI MATERIAL SENSOR KELEMBABAN BERBASIS POLIMER POLIMETIL METAKRILAT

Siska Titik Dwiyati¹, Bambang Ariwahjoedi²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta

²Program Studi Ilmu dan Teknik Material, Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Kinerja sensor kelembaban sangat dipengaruhi oleh pemilihan material, disain, dan proses pembuatannya. Ketiga hal tersebut beserta karakterisasi material yang digunakan menjadi fokus pada penelitian ini. Sensor kelembaban yang dirancang bertipe kapasitif dengan struktur berlapis dengan aluminium sebagai elektroda dan polimetil metakrilat sebagai material dielektriknya. Polimetil metakrilat memiliki tetapan dielektrik yang rendah dan akan meningkat apabila polimer tersebut mengadsorpsi uap air. Perubahan nilai kapasitansi ini menjadi dasar pengukuran kelembaban. Ikatan silang pada polimer dan adanya celah adsorpsi pada permukaan elektroda atas memungkinkan proses adsorpsi-desorpsi berlangsung dengan baik, sehingga kepekaan dan waktu respon sensor dapat ditingkatkan. Pengukuran kinerja sensor kelembaban pada rentang kelembaban 10-100 %RH diperoleh kepekaan 0,23 pF/%RH dan waktu respon 5,67 detik. Selanjutnya karakteristik tersebut dibandingkan dengan sensor kelembaban komersial.

Kata kunci: polimer, disain, sensor, respon

Pendahuluan

Sejalan dengan perkembangan jaman, saat ini penggunaan sensor kelembaban tidak hanya terbatas pada bidang meteorologi didalam menentukan dan memprediksi kondisi cuaca saja[1]. Akan tetapi, juga dimanfaatkan pada bidang kehidupan lainnya seperti pertanian, medis, peralatan rumah tangga hingga industri massal, dimana kelembaban menjadi salah satu parameter yang menentukan kualitas produk yang dihasilkan [2].

Kondisi ini tidak terlepas dari kemajuan pengukuran kelembaban udara yang kini dapat dengan mudah dilakukan secara digital. Salah satu bagian terpenting dari alat pengukur kadar uap air elektronik ini adalah sensor kelembaban yang berfungsi mendeteksi kadar uap air dengan output suatu besaran elektrik[3].

Berbagai studi dan penelitian mendalam pada sensor kelembaban telah dilakukan baik dari segi material maupun struktur sensor. Ohring [4] memaparkan berbagai jenis material yang terlibat pada pembuatan sensor kelembaban, baik bersifat isolator, konduktor maupun semikonduktor. Perbedaan antara masing-masing material tersebut, terletak pada besarnya jarak antara pita energi valensi dengan pita energi hantarnya. Semakin besar jarak tersebut maka nilai hantaran listriknya menjadi kecil.

Penelitian terhadap material yang mengalami perubahan karakteristik sebagai fungsi kelembaban telah dilakukan oleh Yamazoe [5], antara lain elektrolit, polimer, keramik (oksida logam) dan karbon. Pada tipe sensor kapasitif, material pendeksi kelembababan tersebut diaplikasikan sebagai material dielektrik.

Material dielektrik merupakan suatu bahan yang dapat menyimpan energi listrik ketika berada pada medan listrik. Energi tersebut dapat dikeluarkan kembali setelah medan tersebut dihilangkan. Material dielektrik merupakan isolator sehingga dapat memisahkan dua konduktor tanpa terjadi aliran listrik di antaranya. Sebagian besar polimer dapat digunakan sebagai material dielektrik karena tidak tersedianya sejumlah besar elektron bebas yang berperan pada proses hantaran [6].

Karakterisasi polimer sebagai material dielektrik pada sensor kelembaban, menurut Matsuguchi [7] dapat ditingkatkan dengan adanya ikatan silang antar molekul. Adanya ikatan silang menyebabkan volume bebas di sekitar gugus polar bertambah banyak. Selain itu, ikatan silang juga menjadikan struktur polimer lebih kompak (rigid) dan sensor menjadi stabil untuk waktu penggunaan yang lama [8].

Karakteristik tersebut sangat penting agar sensor dapat digunakan pada berbagai macam aplikasi. Di samping itu, karakteristik lain yang juga diperlukan adalah kepekaan yang tinggi pada rentang kelembaban yang lebar, respon yang cepat, linieritas yang baik, stabil terhadap temperatur, dan tahan kontaminan serta yang tak kalah penting harganya relatif murah.

Di dalam makalah ini akan dibahas mengenai analisa material dan proses pembuatan sensor kelembaban, yang dimulai dari tahap perancangan sampai pengukuran karakteristik sensor yang dihasilkan. Dalam analisa material akan diamati pengaruh variasi derajat ikatan silang polimetil metakrilat serta modifikasi lapisan elektroda atas terhadap kepekaan dan waktu respon sensor. Hasil yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan produk komersial.

Perancangan Sensor Kelembaban

Perancangan merupakan salah satu tahap yang menentukan kinerja sensor kelembaban. Perancangan yang dilakukan meliputi aspek material, struktur dan dimensi sensor.

Perancangan Material

Material Dielektrik

Material dielektrik yang digunakan pada sensor kelembaban ini adalah polimetil metakrilat (PMMA) yang berikatan silang dengan etilen glikol dimetakrilat (EGDMA). Pemilihan PMMA berdasarkan karakteristiknya yaitu:

- kemampuan adsorpsi dan desorpsi yang cepat, sehingga waktu respon dari sensor yang dihasilkan juga akan cepat.
- bersifat *low hydrophilicity* sehingga tidak larut pada kelembaban tinggi.
- perubahan konstanta dielektrik yang cukup linier untuk rentang perubahan RH yang lebar
- kemampuan untuk di proses dengan fabrikasi IC standar dan dapat dibentuk menjadi film tipis.
- ketersediaanya, dalam hal kemudahan untuk mendapatkannya dan kemampuan fasilitas untuk melakukan seluruh rangkaian proses yang diperlukan.

Pada polimer PMMA, dilakukan pembentukan ikatan silang untuk memperkecil ruang diantara gugus fungsi polimer, sehingga molekul uap air yang telah teradsorpsi dapat lebih mudah terdesorpsi.

Material Substrat

Dalam kaitannya dengan penerapan teknologi SoC (*system on chip*) pada sensor kelembaban, maka sebagai substrat digunakan wafer silikon yang bersifat semikonduktor. Pada teknologi SoC, perangkat subsistem sensor diintegrasikan dengan pengolah sinyal dan suatu aktuator atau perangkat transmisi, ke sistem yang lebih besar dalam satu keping semikonduktor tunggal. Silikon merupakan semikonduktor intrinsik dengan elektron dan lubang (hole) terdapat dalam jumlah yang sama. Konsentrasi elektron dan lubang per unit volum didefinisikan sebagai:

$$n = p = n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ elektron/cm}^3. \quad (1)$$

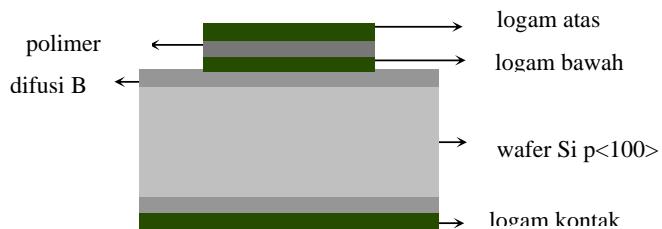
Konsentrasi pembawa muatan intrinsik ini sangat rendah untuk digunakan pada aplikasi devais. Untuk itu konsentrasi pembawa muatan ditingkatkan dengan menambahkan impuritas (doping) menjadi semikonduktor ekstrinsik. Pada penelitian ini digunakan wafer silikon tipe-p, yang diperoleh dengan melakukan difusi atom boron, galium atau indium pada wafer silikon. Sehingga kontak yang terbentuk antara silikon dan elektroda logam, merupakan kontak ohmik dengan resistansi parasitik yang kecil.

Material Elektroda

Sebagai elektroda pada sensor kelembaban relatif tipe kapasitif yang difabrikasi, dipilih aluminium. Pemilihan aluminium terutama didasari oleh sifat hantaran listrik dan kestabilan pada kondisi lingkungan dengan tingkat kelembaban yang bervariasi.

Struktur Sensor

Sensor kelembaban yang dirancang memiliki struktur berlapis di atas permukaan wafer silikon, seperti terlihat pada gambar 1.

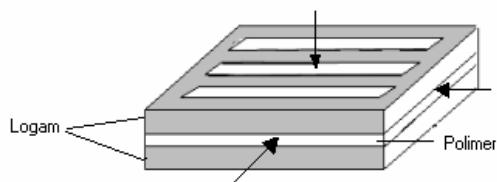


Gambar 1. Penampang samping sensor kelembaban tipe kapasitif

Pada struktur sensor di atas, lapisan logam kontak dan logam bawah sensor dirancang untuk saling terhubung dengan resistansi parasitik antara kedua lapisan tersebut sekecil mungkin. Lapisan logam kontak berfungsi sebagai interkoneksi sensor dengan kemasan. Sedangkan lapisan logam bawah, diperlukan untuk menghindari polarisasi muatan pada silikon yang digunakan sebagai substrat, sehingga ketika sensor tersebut dihubungkan dengan sumber arus atau tegangan, polarisasi muatan hanya terjadi pada material dielektriknya. Pada sistem ini nilai kapasitansi dari sensor tidak akan terpengaruh oleh tegangan yang diberikan.

Berbeda dengan lapisan logam bawah, maka pada lapisan logam atas faktor ketebalan sangat menentukan. Logam yang dideposisikan harus cukup tipis sehingga molekul air dapat dengan mudah menembusnya. Namun terdapat masalah yaitu jika lapisan logam tersebut terlalu tipis maka nilai resistansi menjadi lebih besar sehingga pada akhirnya akan mempengaruhi efek parasitik sensor.

Untuk itu perlu dilakukan modifikasi, antara lain dengan membuat lubang-lubang adsorpsi pada elektroda atas dengan teknik fotolitografi. Sehingga, walaupun logam yang terdepositi cukup tebal, namun proses adsorpsi-desorpsi dapat berlangsung dengan baik melalui permukaan atas sensor. Hal ini penting agar siklus penyerapan dan pelepasan uap air tidak terbatas dari sisi samping saja. Jika penyerapan hanya terbatas dari sisi samping sensor, maka hanya sebagian kecil dari material dielektrik yang efektif berperan dalam pengidraan uap air.



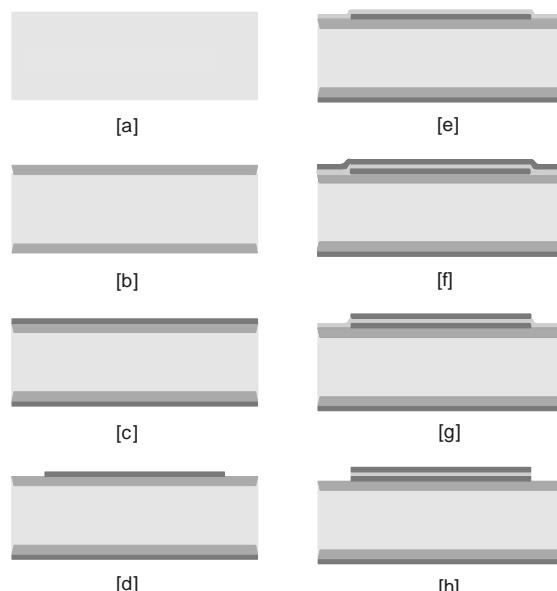
Gambar 2. Sisi penyerapan uap air pada sensor kelembaban

Akan tetapi pada modifikasi ini, perlu diperhitungkan mengenai efek penurunan kapasitansi dan nilai kapasitansi efektif yang diperoleh. Dengan mengasumsikan luas lubang adsorpsi tersebut sangat kecil dibandingkan dengan luas total bidang kapasitor, maka kapasitor masih dianggap ideal.

Dimensi Sensor

Ukuran sensor dirancang 3×4 mm yang disesuaikan dengan diameter kemasan. Kemasan berfungsi untuk melindungi sensor, mempermudah dalam perawatan dan pemakaian serta untuk dihubungkan dengan komponen elektronika lain. Interkoneksi sensor dilakukan secara langsung pada kemasan, dimana elektroda bagian bawah sensor dihubungkan dengan kemasan. Cara ini dipilih karena lebih efektif dalam memanfaatkan luas yang tersedia pada kemasan.

Proses Pembuatan Sensor Kelembaban



Gambar 3. Proses pembuatan sensor kelembaban [a]. Persiapan wafer, [b]. Difusi boron, [c]. Sputtering aluminium, [d]. Fotolitografi elektroda bawah, [e]. Pelapisan polimer, [f]. Evaporasi aluminium, [g]. Fotolitografi elektroda atas, [h]. Etsa polimer



Gambar 4. Sensor kelembaban yang telah dikemas

Metode Pengukuran dan Karakterisasi Material

Pengukuran kapasitansi pada rentang kelembaban tertentu, dilakukan dengan menggunakan peralatan kabin uji yang dihubungkan dengan kapasitansimeter Boonton 7200 (dengan rentang kapasitansi yang dapat diukur 0–2000 pF) dan Humidity Meter Lutron Type HT-3005 (yang dapat mengukur kelembaban antara 1–100%RH) dengan tegangan bolak-balik yang diberikan sebesar 30 mV.

Kelembaban udara tertentu pada kabin uji diperoleh dengan mengatur kecepatan dan volume udara yang dihembuskan ke dalam kabin dari dua saluran udara, kering dan basah. Udara kering diperoleh dengan cara melewatkannya atmosferik ke dalam tabung yang berisi nitrogen cair, sehingga uap air membeku dan kadarnya dalam udara tersebut akan berkurang. Sedangkan uap air pada udara basah dihasilkan oleh humidifier.

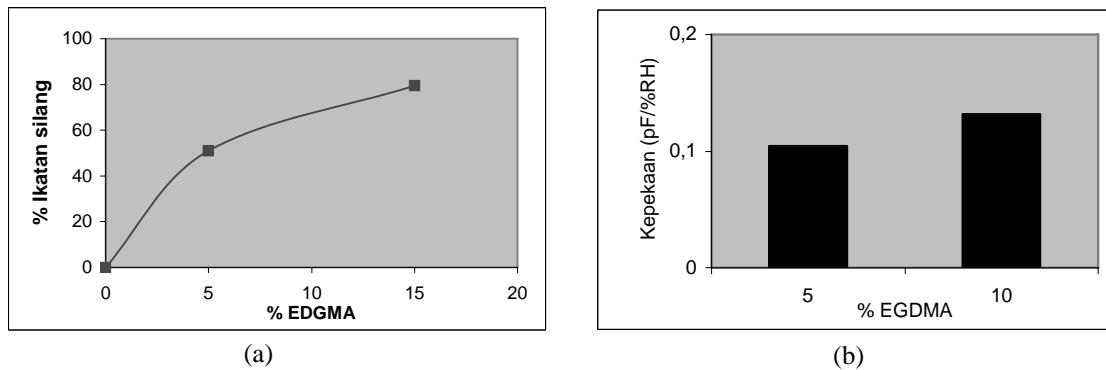
Karakterisasi yang dilakukan menggunakan metode FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), TGA (*Thermogravimetric Analysis*), DTA (*Differential Thermal Analysis*), dan SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy*).

Hasil dan Pembahasan

Ikatan Silang pada PMMA

Data yang dihasilkan dari analisis termal TGA menunjukkan bahwa uap air yang mampu diadsorpsi oleh polimer PMMA pada tingkat kelembaban 50%RH adalah 8,0 gram uap air/gram polimer. Setelah ditambahkan 5%EGDMA maka uap air yang dikandungnya pada kelembaban yang sama, meningkat menjadi 9,8 gram uap air/gram polimer. Dengan demikian terjadi peningkatan kemampuan adsorpsi uap air pada polimer yang berikatan silang pada tingkat kelembaban yang sama.

Pengaruh jumlah EGDMA yang ditambahkan terhadap fraksi ikatan silang yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 5(a). Semakin besar jumlah EGDMA yang ditambahkan, maka semakin banyak fraksi ikatan silang yang terbentuk (untuk temperatur dan waktu polimerisasi yang sama). Pada gambar 5 (b) terlihat pengaruh ikatan silang terhadap kepekaan sensor.



Gambar 5. (a) Fraksi polimer berikatan silang sebagai fungsi jumlah penambahan EGDMA
(b) Pengaruh ikatan silang terhadap kepekaan sensor

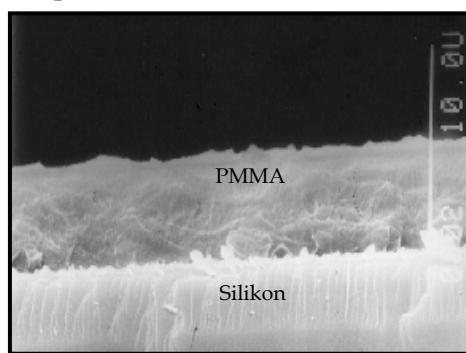
Penentuan titik transisi gelas T_g dari PMMA baik yang berikatan silang maupun tidak, dilakukan dengan analisis termal DTA. T_g merupakan temperatur pada saat polimer berubah dari keadaan mirip gelas (mobilitas rantai terbatas) menjadi keadaan mirip karet (rantai dapat berotasi dan bergerak bebas). PMMA memiliki T_g 104,23 $^{\circ}\text{C}$ dan PMMA-5% EGDMA mempunyai T_g 134,23 $^{\circ}\text{C}$. Nilai T_g pada polimer berikatan silang lebih tinggi dari T_g polimer tanpa ikatan silang. Hal ini disebabkan karena dengan adanya ikatan silang maka mobilitas dan fleksibilitas rantai menjadi berkurang dan diperlukan energi aktivasi yang lebih besar untuk melakukan pergeseran (*sliding*) antar rantai. Hubungan perubahan T_g dengan jumlah ikatan silang dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta T_g = -7 \cdot 10^4 \cdot \beta \quad (2)$$

dengan β : kerapatan ikatan silang (mol ikatan silang per gram polimer)

$$\Delta T_g = 30 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{30}{7 \cdot 10^4} = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ mol ikatan silang per gram polimer} \\ &= 2,57 \cdot 10^{20} \text{ ikatan silang per gram polimer} \end{aligned} \quad (3)$$



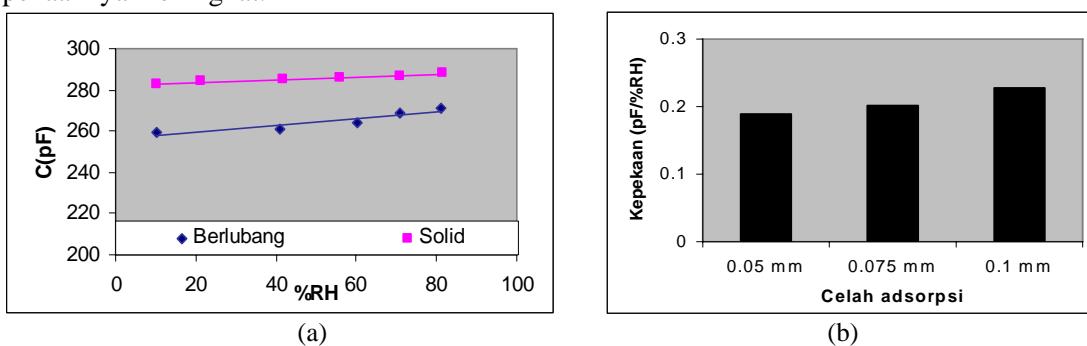
Gambar 6. Morfologi permukaan lapisan polimer

Pengaruh lubang adsorpsi elektroda atas

Adanya lubang adsorpsi pada permukaan elektroda atas dapat meningkatkan kepekaan sensor dari 0,07 pF/%RH menjadi 0,17 pF/%RH untuk ketebalan polimer 1 μm (gambar 7 (a)).

Dengan melakukan variasi terhadap ukuran celah adsorpsi yang dibuat, dapat diamati adanya peningkatan kepekaan sensor dengan semakin luasnya celah adsorpsi, seperti yang terlihat pada gambar 7(b). Hal ini disebabkan permukaan polimer yang bersentuhan langsung dengan

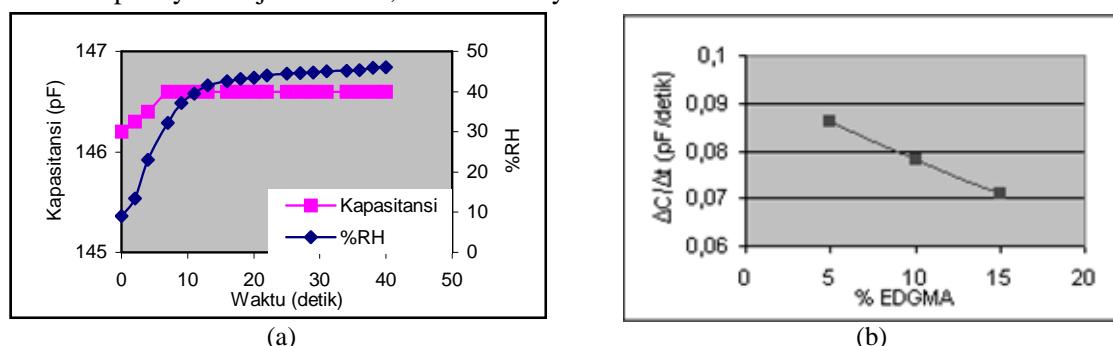
lingkungan dan berperan pada proses adsorpsi-desorpsi uap air semakin besar sehingga kepekaannya meningkat.



Gambar 7. (a) Pengaruh adanya lubang terhadap kepekaan sensor 5% EGDMA (b) Pengaruh ukuran celah adsorpsi terhadap kepekaan sensor 5% EGDMA (jumlah lubang = 6 lubang)

Waktu respon

Waktu respon yaitu waktu yang dibutuhkan oleh uap air untuk terdesorpsi dari polimer. Waktu respon PMMA- 5%EGDMA terlihat pada gambar 8(a). Pada sensor kelembaban, waktu respon merupakan fungsi dari waktu difusi uap air masuk dan keluar lapisan polimer untuk mencapai kesetimbangan, yang ditentukan oleh jenis ikatan yang terbentuk antara molekul uap air dengan polimer. Semakin kuat ikatan tersebut maka molekul uap air akan sulit terlepas sehingga waktu responnya menjadi lambat, dan sebaliknya.



Gambar 8. (a) Waktu respon desorpsi uap air pada PMMA-5%EGDMA (b) Hubungan perubahan kapasitansi setiap detik dengan %EGDMA untuk interval kelembaban 10-50 % RH pada temperatur 23°C

Waktu respon juga dipengaruhi oleh arsitektur polimer tersebut. Pada PMMA berikatan silang, semakin tinggi derajat ikatan silang maka akan semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh molekul air untuk terdesorpsi dari permukaan polimer. Hal ini disebabkan ukuran volume bebas polimer yang semakin kecil sehingga menghambat molekul uap air untuk lepas dari permukaan polimer dan waktu responnya menjadi naik.

Pada gambar 8(b) terlihat bahwa dengan bertambahnya konsentrasi EGDMA maka perubahan nilai kapasitansi setiap detik ($\Delta C/\Delta t$) akan menurun. Hal ini berarti, untuk menghasilkan perubahan kapasitansi yang sama, maka waktu yang dibutuhkan oleh PMMA-5% EGDMA lebih cepat dibandingkan dengan PMMA10% EGDMA dan PMMA-15% EGDMA, walaupun jenis ikatan yang terbentuk tetap sama yaitu interaksi van der waals dan ikatan hidrogen.

Analisis Komparatif dengan Sensor Kelembaban Komersial

Perbandingan kinerja sensor dengan sensor kelembaban komersial terdapat pada tabel 1.

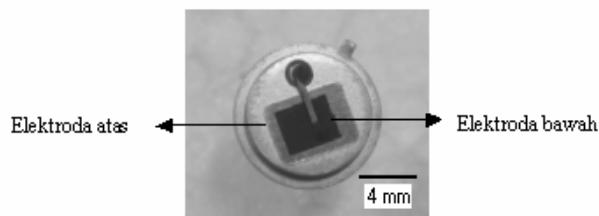
Tabel 1. Perbandingan kinerja sensor yang dihasilkan dengan produk komersial

Parameter	Produk Komersial	Sensor yang dibuat
Kepakaan	0,34	0,23
Respon waktu	5 detik *	5,67 detik **

* Waktu respon (33% -76%RH dengan kriteria 63%)

** Waktu respon (10% - 50% RH dengan kriteria 63%)

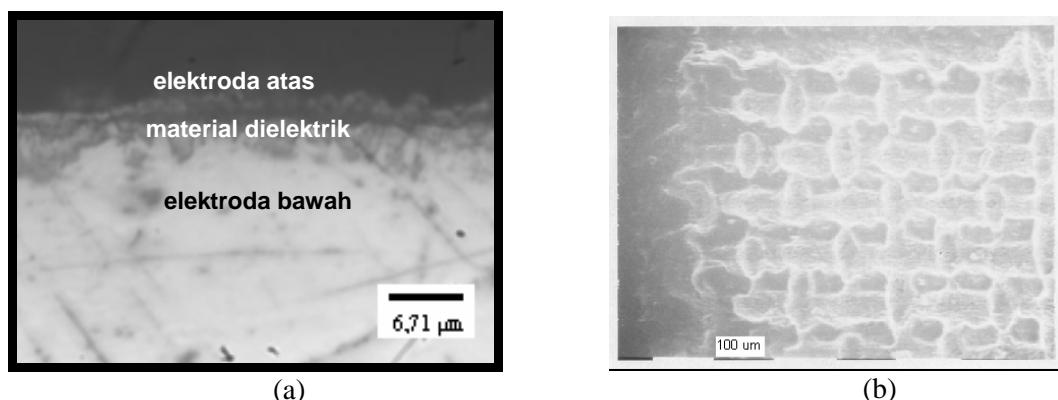
Perbedaan kinerja antara sensor yang dibuat dengan produk komersial, dijelaskan melalui analisis produk sensor kelembaban komersial.



Gambar 9. Tampak atas sensor kelembaban komersial

Gambar 10(a) merupakan penampang samping dari sensor kelembaban komersial yang dilihat dengan menggunakan mikroskop optik. Seperti struktur sensor kelembaban yang dibuat, produk komersial ini juga bertipe kapasitif dan memiliki struktur berlapis dengan susunan elektroda atas–material dielektrik-elektroda bawah. Dari hasil pengukuran diperoleh ketebalan dielektrik $\pm 1\mu\text{m}$, masih dalam rentang yang sama dengan ketebalan dielektrik pada sensor kelembaban yang dibuat.

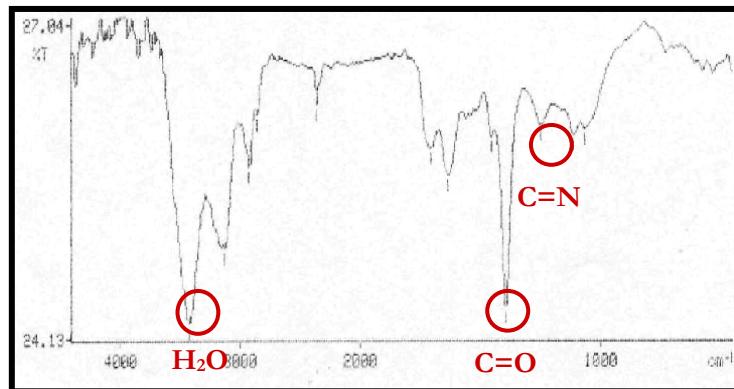
Permukaan bagian atas dari sensor dianalisis dengan menggunakan SEM dan diperoleh struktur seperti yang terlihat pada gambar 10(b). Terlihat bahwa material dielektrik dari sensor tersebut memiliki struktur seperti anyaman. Struktur ini dapat menjelaskan kepekaan yang tinggi dan waktu respon yang lebih cepat pada sensor kelembaban komersial dibandingkan dengan sensor yang dibuat. Dengan struktur berbentuk anyaman, maka luas efektif material dielektrik yang berperan dalam proses penginderaan uap air akan lebih besar. Proses adsorpsi-desorpsi dapat berlangsung baik. Struktur anyaman dapat dianalogikan dengan ikatan silang pada PMMA, namun dalam skala yang lebih makroskopik.



Gambar 10. (a) Penampang samping (b) Struktur polimer pada sensor kelembaban komersial

Sebagai elektroda bawah, produk komersial menggunakan stainless steel yang mengandung krom 18,72%. Adanya unsur paduan krom yang cukup tinggi, menyebabkan pada permukaan stainless steel tersebut terbentuk lapisan pelindung Cr_2O_3 . Lapisan oksida ini akan melindungi stainless steel dari korosi lebih lanjut ketika sensor berada pada lingkungan yang memiliki tingkat kelembaban yang tinggi. Sifat perlindungan dari oksida inilah yang menjadi dasar penggunaan stainless steel sebagai elektroda pada sensor komersial dan juga aluminium pada sensor kelembaban yang dibuat. Dari hasil analisis FTIR diperoleh bahwa material dielektrik yang digunakan merupakan polimer, yang memiliki spektrum seperti yang terlihat pada gambar 11.

Pada polimer yang digunakan sebagai material dielektrik sensor komersial, terdapat dua gugus fungsi yang bertanggung jawab terhadap proses adsorpsi-desorpsi uap air yaitu gugus karbonil dan imina. Interaksi yang terjadi antara uap air dengan karbonil dan imina merupakan ikatan hidrogen. Adanya dua gugus fungsi ini menyebabkan kepekaan yang tinggi dari sensor tersebut, jika dibandingkan dengan PMMA yang hanya memiliki gugus karbonil saja.



Gambar 11. Spektrum FTIR polimer yang digunakan sebagai material dielektrik pada sensor kelembaban komersial

Kesimpulan

Dari seluruh rangkaian proses pembuatan dan karakterisasi sensor kelembaban yang dilakukan pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa karakteristik sensor kelembaban dipengaruhi oleh material dan desain sensor yang digunakan. Adanya ikatan silang pada material polimer dan celah adsorpsi meningkatkan kemampuan polimer dalam mengadsorpsi uap air.

Sensor kelembaban yang dibuat, dengan luas permukaan 12 mm^2 , menghasilkan kepekaan $0,23 \text{ pF}/\% \text{RH}$, waktu respon 5,67 detik. Perbedaan yang ada antara kinerja sensor dengan produk komersial, disebabkan oleh adanya perbedaan jenis material dan struktur mikro lapisan polimer yang digunakan sebagai material dielektrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Miller, J.C. Thompson, R.E. Peterson and D.R. Haragan, Elements of Meteorology, 4th edition, Charles E Merrill Publication Co., Ohio, 1983.
- [2] Sakai, Y.; Sadaoka, Y.; Matsuguchi, M., Humidity Sensor Based on Polymer Thin Films, Sensor and Actuators B, 1996, (34), 85-90.
- [3] http://www.ien.it/users/chechs/chechs_site/doc/CHECS_Final/Final Annex3/state_of_art.pdf.
- [4] Ohring, M., Reliability and Failure of electronic Materials and devices, Academic Press, New York , 1998, 42-45 & 55 & 56.
- [5] Yamazoe, N.; Shimizu, Y., Humidity Sensors: Principles and Applications, Sensor and Actuators B, 1986, (10), 379-398.
- [6] Callister, W.D., Material Science and Engineering, third edition, John Willey & Sons, Inc, New York, 1994, 631-623.
- [7] Matsuguchi, M.; Shinmoto; Sadaoka, Y.; Kuroiwa; Sakai, Y., Effect of Degree of Cross-linking on the Characteristics of a PVCA Capacitive-type Humidity Sensor, Sensor and Actuators B, 1996, (34), 349-355.
- [8] Matsuguchi, M.; Shinmoto; Sadaoka, Y.; Kuroiwa; Sakai, Y.; Ito, A., A capacitive-type humidity-sensors using cross-linked poly(methyl methacrylate) thin films, J. Electrochem. Soc. 138 (6) 1991, 1862.