

**STUDI FILM KOMPOSIT PVA-PEO-TIO₂ SEBAGAI
MATERIAL SENSITIF TERHADAP KELEMBABAN**



TESIS

SYAFRI ERIZON

6305220386

**PROGRAM PASCASARJANA FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI FILM KOMPOSIT PVA-PEO-TIO₂ SEBAGAI
MATERIAL SENSITIF TERHADAP KELEMBABAN**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh
Gelar Magister dalam Bidang fisika Murni dan Terapan**

SYAFRI ERIZON

6305220386

**FISIKA MURNI DAN TERAPAN
PROGRAM PASCASARJANA FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA**

DEPOK, 2008

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Syafri Erizon
NPM : 6305220386
Program Studi : Magister Fisika
Judul Tesis : Studi Film Komposit PVA-PEO-TiO₂ Sebagai Material Sensitif Terhadap Kelembaban

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Fisika pada Program Pasca Sarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ing. Cuk Imawan :

Pembimbing II : Dr. Yanti Sabarinah S. :

Penguji : Prof. Dr. Rosari Saleh :

Penguji : Dr. Djoko Triyono :

Penguji : Dr. Bambang Soegijono :

Mengetahui
Ketua Program Magister Fisika

Dr. Dedi Suyanto
NIP. 130 935 271

Tanggal Lulus : 30 Mei 2008

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas izin dan kehendakNya penulis dapat menyelesaikan dengan baik tugas akhir pascasarjana ini yang berjudul *Studi film komposit PVA-PEO-TiO₂ sebagai material sensitif terhadap kelembaban*.

Penulis sangat berterima kasih kepada :

Dr.Ing. Cuk Imawan

dan

Dr.Yanti Sabarinah Soebianto

Selaku pembimbing I dan II, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, petunjuk dan saran serta kemudahan lainnya.

Tesis ini tidak mungkin selesai tanpa bantuan berbagai pihak. Oleh sebab itu dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Dr. Dedi Suyanto, sebagai Ketua Program Magister Fisika Program Pasca Sarjana FMIPA Universitas Indonesia.

Kepada para dosen di Departemen Fisika FMIPA UI karena keterbatasan yang ada tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu, penulis juga mengucapkan terima kasih, atas motivasi yang telah diberikan kepada penulis dalam setiap pertemuan membuat penulis dapat tetap memelihara semangat untuk menyelesaikan tesis ini. Ucapan yang sama untuk Bapak Suparman dan seluruh Staf Administrasi Program Magister Fisika FMIPA di Salemba atas pelayanannya yang baik.

Terima kasih juga penulis sampaikan untuk seluruh rekan-rekan mahasiswa Program Magister Fisika FMIPA UI Tahun 2005 khususnya rekan-rekan satu kelompok, yakni Pak Tryono, Bu Siti Holillah, Pak Maurit Jihar, dan Endi P. Sungguh, solidaritas dan kekompakan kita telah menghindarkan penulis dari rasa frustrasi menghadapi tekanan pekerjaan baik dalam mengolah data maupun membangun teori untuk tesis ini.

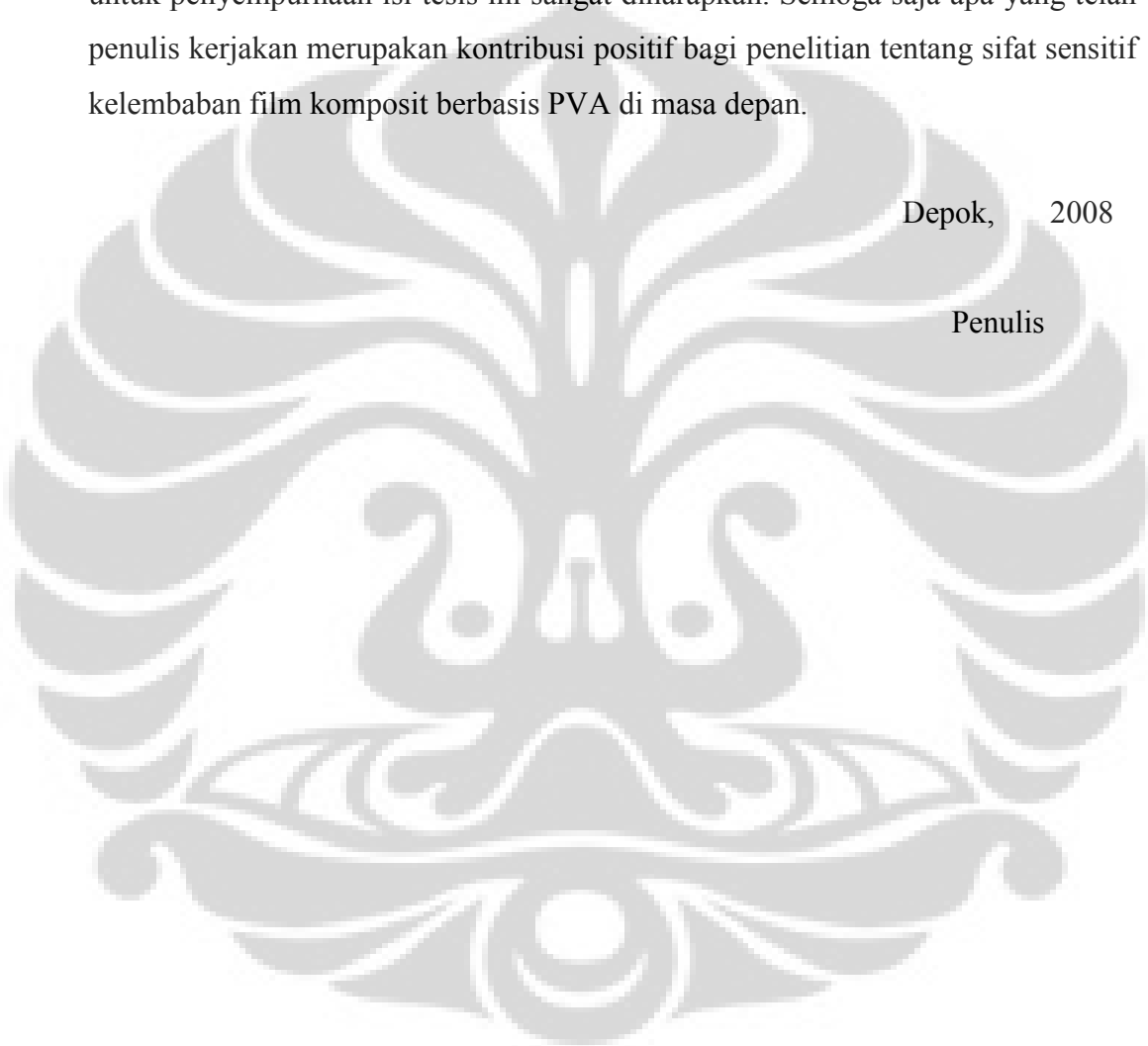
Terima kasih kepada seluruh rekan-rekan di SMAN 84 Jakarta, khususnya Pak Agus Susanto atasan langsung penulis, juga Pak Sosro Kartono, Pak Saruji, Pak Panijan, Bu Sarma, Bu Emmy, Bu Mala, Pak Suwarno, Pak Mansyur R dan

Yusuf Afandi atas segala dukungan dan bantuannya. Terima kasih juga kepada para siswa-siswi SMA Negeri 84 Jakarta yang mau mengerti kondisi penulis saat terpaksa harus meninggalkan kelas sebelum waktunya. Terakhir dan terpenting dari semua, penulis mengucapkan terima kasih kepada isteri penulis yang penuh pengertian mendukung terwujudnya tesis ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan pada tesis ini, kritik dan saran untuk penyempurnaan isi tesis ini sangat diharapkan. Semoga saja apa yang telah penulis kerjakan merupakan kontribusi positif bagi penelitian tentang sifat sensitif kelembaban film komposit berbasis PVA di masa depan.

Depok, 2008

Penulis



ABSTRAK

Film komposit sensitif kelembaban PVA-PEO dan TiO_2 yang dideposisikan pada substrat PCB dengan elektroda berstruktur interdigital dari film Cu yang dilapisi Ag telah berhasil dipreparasi. Film komposit ini dibuat dengan tujuan memodifikasi sifat sensitif kelembaban dari film PVA. Fabrikasi film PVA-PEO- TiO_2 menggunakan teknik *dip-coating*. Amonium peroksodisulfat (APS) digunakan sebagai insiator untuk *crosslinking* PVA. Film yang dimodifikasi telah dikarakterisasi sifat-sifat mekanik, struktur dan sifat listriknya. Parameter fabrikasi yang ikut diteliti berupa tebal film yang divariasi dengan cara difabrikasi secara berlapis dan pengaruh konsentrasi TiO_2 . Penambahan PEO sebesar 40,0 mg pada film PVA dapat menurunkan tingkat swellingnya sebesar 10% dan meningkatkan nilai fraksi gel sebesar 30% relatif terhadap tingkat swelling dan nilai fraksi gel film PVA sendiri. Perubahan sifat ini dapat meningkatkan stabilitas mekanis film. Perbaikan sifat ini diduga disebabkan karena terjadinya IPN antara PVA dengan PEO. Pengujian dengan FTIR menunjukkan bahwa penambahan PEO maupun TiO_2 tidak merubah spektrum film PVA. Hasil ini berarti antara PVA dengan PEO maupun TiO_2 tidak terjadi ikatan kimiawi. Sedangkan topografi film yang diamati melalui SEM menunjukkan TiO_2 tersebar pada permukaan dan di dalam film PVA-PEO. Karakterisasi listrik dilakukan dengan meneliti hubungan antara perubahan impedansi film komposit PVA-PEO- TiO_2 terhadap perubahan kelembaban relatif menggunakan RCL-meter. Penambahan TiO_2 sebesar 1000 mg (96% relatif terhadap massa PVA-PEO) sebagai modifikator memberikan efek penurunan nilai impedansi film sebesar empat orde pada kondisi RH tinggi, sehingga film komposit lebih sensitif.

Sifat sensitif kelembaban film komposit ini dipengaruhi oleh frekuensi ukur, tebal film dan massa modifikator. Frekuensi ukur 1 kHz dan massa modifikator 1000 mg menghasilkan sifat listrik dan sifat sensitif kelembaban yang paling baik untuk film komposit PVA-PEO- TiO_2 . Uji pengaruh lapisan film menunjukkan, film komposit dengan variasi tebal satu lapis memiliki sifat sensing yang lebih baik, sedangkan film PVA dan film PVA-PEO memiliki sifat sensing yang baik pada kondisi film tiga lapis. Sifat sensitif kelembaban film komposit PVA-PEO- TiO_2 diduga merupakan sumbangan dari sifat sensitif PVA dan TiO_2 . Sifat sensitif PVA dimungkinkan karena sifatnya yang hidrofilik. Gugus OH pada rantai molekul PVA dapat menangkap molekul air, sehingga perubahan orientasi dipol air dapat diamati efeknya dengan menggunakan signal ac. Perubahan sifat sensing dari film karena modifikasi TiO_2 diduga muncul saat preparasi film. Saat preparasi diduga APS telah menyebabkan partikel TiO_2 mempunyai kemampuan kemisorpsi terhadap molekul air sehingga saat film berfungsi sebagai material sensitif terhadap kelembaban, permukaan partikel-partikel TiO_2 telah dipenuhi oleh molekul-molekul air yang terkemisorpsi. Selanjutnya molekul-molekul air di udara akan berikatan secara fisisorpsi dengan molekul-molekul air yang ada dipermukaan partikel TiO_2 sehingga menyebabkan penambahan sifat sensitif dari film komposit tersebut.

Reproduksibilitas fabrikasi film diuji dengan melakukan dua kali preparasi dengan menggunakan dua wadah dan perubahan sifat listrik karena efek penuaan selama 60 hari memberikan hasil yang cukup stabil yang bersesuaian dengan hasil dari uji mekanis.

Kata kunci: film sensitif kelembaban, PVA, PEO, TiO_2 , dip-coating

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Material Sensitif Kelembaban.....	4
2.2 Polivinil Alkohol sebagai material sensitif kelembaban..	5
2.3 Polietilen Oksida sebagai material sensitif terhadap kelembaban	7
2.4 Metal Oksida sebagai material sensitif kelembaban	9
2.4.1 Chemisorpsi dan fisisorpsi	9
2.4.2 Mekanisme Sensing Metal Oksida.....	10
2.5 Impedansi film PVA dan Metal Oksida.....	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Fabrikasi Film	13
3.2 Pengkondisian Kelembaban	17
3.3 Karakterisasi Listrik	19
3.4 Karakterisasi Struktur.....	19
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1 Sifat mekanik film PVA-PEO	20
4.2 Struktur film PVA,PVA-PEO,PVA-PEO-TiO ₂	24
4.3 Topografi film PVA,PVA-PEO,PVA-PEO-TiO ₂	27
4.4 Sifat listrik dan sensing kelembaban film komposit PVA-PEO-TiO ₂	28
4.4.1 Pengaruh konsentrasi massa TiO ₂ terhadap impedansi film.....	28
4.4.2 Pengaruh Ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO ₂	32
4.4.3 Pengaruh frekuensi ukur terhadap impedansi Film	37
4.4.4 Model rangkaian ekuivalensi impedansi film	48
4.5 Reprodusibilitas fabrikasi dan stabilitas impedansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂	54
4.5.1 Reprodusibilitas fabrikasi film.....	54
4.5.2 Stabilitas impedansi film.....	55
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	57
DAFTAR ACUAN.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) Monomer vinil alkohol.....	6
	(b) Struktur polivinil alkohol.....	6
Gambar 2.2	Ikatan hidrogen antara uap air dan PVA.....	7
Gambar 2.3	(a) Monomer etilena oksida.....	8
	(b) Struktur molekul PEO.....	8
Gambar 2.4	Model	
	(a) PVA.....	8
	(b) PVA-PEO.....	8
	(c) IPN – PVA – PEO yang dimodifikasi TiO ₂	8
Gambar 2.5	Empat tahapan adsorpsi pada metal oksida.....	10
Gambar 2.6	Struktur banyak lapisan pada kondensasi molekul air	11
Gambar 2.7	Mekanisme Grothuss proton dapat melompat (hopping) dari molekul air yang satu ke molekul air terdekat pada lapisan molekul air yang kontinu	11
Gambar 3.1	Konstruksi modul substrat berelektroda RH berbentuk interdigital dengan 3 pasang elektroda.....	14
Gambar 3.2	(a) Deposisi dengan metode <i>dipcoating</i>	16
	(b) Setelah pencelupan elektroda interdigital terlapisi film PVA	16
Gambar 3.3	Diagram alir preparasi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ ...	17
Gambar 3.4	Chamber kalibrator udara di atas larutan garam jenuh memiliki kelembaban relatif yang sama dengan kelembaban relatif larutan garam jenuh.....	19
Gambar 4.1	Pengaruh penambahan konsentrasi massa PEO terhadap fraksi gel film PVA-PEO	21
Gambar 4.2	Pengaruh massa PEO terhadap <i>swelling</i> film PVA-PEO	22
Gambar 4.3	Pengaruh massa PEO terhadap kekuatan tarik film PVA-PEO.....	23
Gambar 4.4	FTIR film PVA 1000 mg dan PEO 40 mg.....	25

Gambar 4.5	FTIR film PVA dan PVA-PEO.....	25
Gambar 4.6	FTIR film PVA dan PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000 mg) ...	26
Gambar 4.7	FTIR film PVA, PVA-PEO, PVA-PEO-TiO ₂ , dan PEO	26
Gambar 4.8	Foto SEM	
	(a) Film PVA	27
	(b) Film PVA-PEO	27
	(c) Film komposit PVA-PEO-TiO ₂	27
Gambar 4.9	Pengaruh massa TiO ₂ (dalam film PVA-PEO-TiO ₂) terhadap impedansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ untuk berbagai RH pada frekuensi ukur 1 kHz	29
Gambar 4.10	Hubungan antara impedansi dan massa TiO ₂ pada film komposit PVA-PEO-TiO ₂ untuk berbagai kelembaban RH pada frekuensi ukur 1 kHz	30
Gambar 4.11	Pengaruh massa TiO ₂ pada impedansi film PVA-PEO-TiO ₂ untuk berbagai RH dan frekuensi 1 Mhz	31
Gambar 4.12	Pengaruh massa TiO ₂ pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ untuk berbagai RH dan frekuensi 100 kHz	31
Gambar 4.13	Pengaruh massa TiO ₂ pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ untuk berbagai RH dan frekuensi 10 kHz	32
Gambar 4.14	Pengaruh ketebalan pada impedansi film PVA, PVA-PEO, dan film komposit PVA-PEO-TiO ₂ diukur pada frekuensi 1 kHz	33
Gambar 4.15	Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA 1000 mg dan diukur pada frekuensi 1 kHz	34
Gambar 4.16	Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO (PEO 40 mg) dan diukur pada frekuensi 1 kHz.....	35
Gambar 4.17	Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO ₂ diukur pada frekuensi 1 kHz	35
Gambar 4.18	Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000 mg) dan diukur pada frekuensi 1 kHz	36

Gambar 4.19	Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 2000 mg) diukur pada frekuensi 1 kHz	36
Gambar 4.20	Pengaruh perubahan RH terhadap impedansi film PVA untuk berbagai frekuensi ukur.....	37
Gambar 4.21	Pengaruh perubahan RH terhadap impedansi film PVA-PEO pada berbagai frekuensi ukur	38
Gambar 4.22	Pengaruh perubahan RH terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 300mg) pada berbagai frekuensi ukur	39
Gambar 4.23	Pengaruh perubahan RH terhadap film PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000 mg) untuk berbagai frekuensi ukur	39
Gambar 4.24	Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA- PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 300 mg) satu lapis pada berbagai RH	40
Gambar 4.25	Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 300mg) tiga lapis untuk berbagai RH	41
Gambar 4.26	Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000mg) satu lapis untuk berbagai RH	41
Gambar 4.27	Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000mg) tiga lapis untuk berbagai RH	42
Gambar 4.28	Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 33% (PVA 1000 mg, PEO 40 mg)	43
Gambar 4.29	Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 53 %.....	44
Gambar 4.30	Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 75%.....	44
Gambar 4.31	Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 84%.....	45
Gambar 4.32	Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 94%.....	45

Gambar 4.33	Pengaruh RH terhadap kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ 1000 mg tiga lapis untuk berbagai frekuensi ukur.....	46
Gambar 4.34	Pengaruh RH terhadap kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ 300 mg tiga lapis untuk berbagai frekuensi ukur.....	47
Gambar 4.35	Pengaruh RH terhadap kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO ₂ 2000 mg tiga lapis untuk berbagai frekuensi ukur.....	47
Gambar 4.36	Pengaruh RH terhadap resistansi R dan kapasitansi C Film komposit PVA-PEO-TiO ₂ untuk frekuensi trigger 1 kHz.....	48
Gambar 4.37	Pemodelan penangkapan molekul H ₂ O oleh molekul PVA dan mekanisme Grothuss	50
Gambar 4.38	Penangkapan molekul H ₂ O oleh gugus OH molekul PVA tanpa medan listrik luar	51
Gambar 4.39	Reproduksibilitas fabrikasi film komposit	
	(a) PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 300 mg).....	54
	(b) PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000 mg).....	54
Gambar 4.40	Stabilitas film komposit PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000 mg) dengan frekuensi ukur 1 kHz pada RH rendah	55
Gambar 4.41	Stabilitas film komposit PVA-PEO-TiO ₂ (TiO ₂ 1000 mg) pada frekuensi ukur 1 kHz pada RH sedang dan RH tinggi.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi material film untuk meneliti efek konsentrasi Titanium oksida (TiO_2)	14
Tabel 3.2	Nilai % RH larutan garam jenuh yang digunakan sebagai Kalibrator	18



BAB I

PENDAHULUAN

Berbagai penelitian tentang material sensitif terhadap kelembaban telah banyak dilakukan, baik yang berbasis keramik, polimer, maupun elektrolit [1], akan tetapi masih banyak ditemukan kendala pada material sensitif tersebut misalnya reproduksibilitas fabrikasi rendah, drift yang besar, dan kurang stabil terhadap lingkungan dan waktu. Material sensitif berbasis keramik memiliki stabilitas mekanik, termal dan kimia yang baik [3], akan tetapi material sensitif berbasis keramik memiliki masalah karena sensitivitas dan respon sensornya yang tidak reversibel [4] disamping relatif lebih mahal bila dibandingkan dengan material sensitif jenis lain karena fabrikasinya yang membutuhkan sintering [5]. Sebaliknya, meskipun lebih murah dan mudah dalam fabrikasinya, material sensitif berbasis polimer bermasalah dalam hal kestabilan serta tidak terhadap perubahan waktu [7]. Sementara material sensitif berbasis elektrolit yang memanfaatkan konduktivitas ionik sebagai mekanisme sensingnya [8] memiliki respon yang lambat sehingga tidak dapat digunakan pada sistem kontrol otomatis yang membutuhkan respon seketika [9]. Masalah lain material sensitif berbasis elektrolit adalah pada akurasi dan daya tahannya saat dioperasikan pada kelembaban tinggi [10].

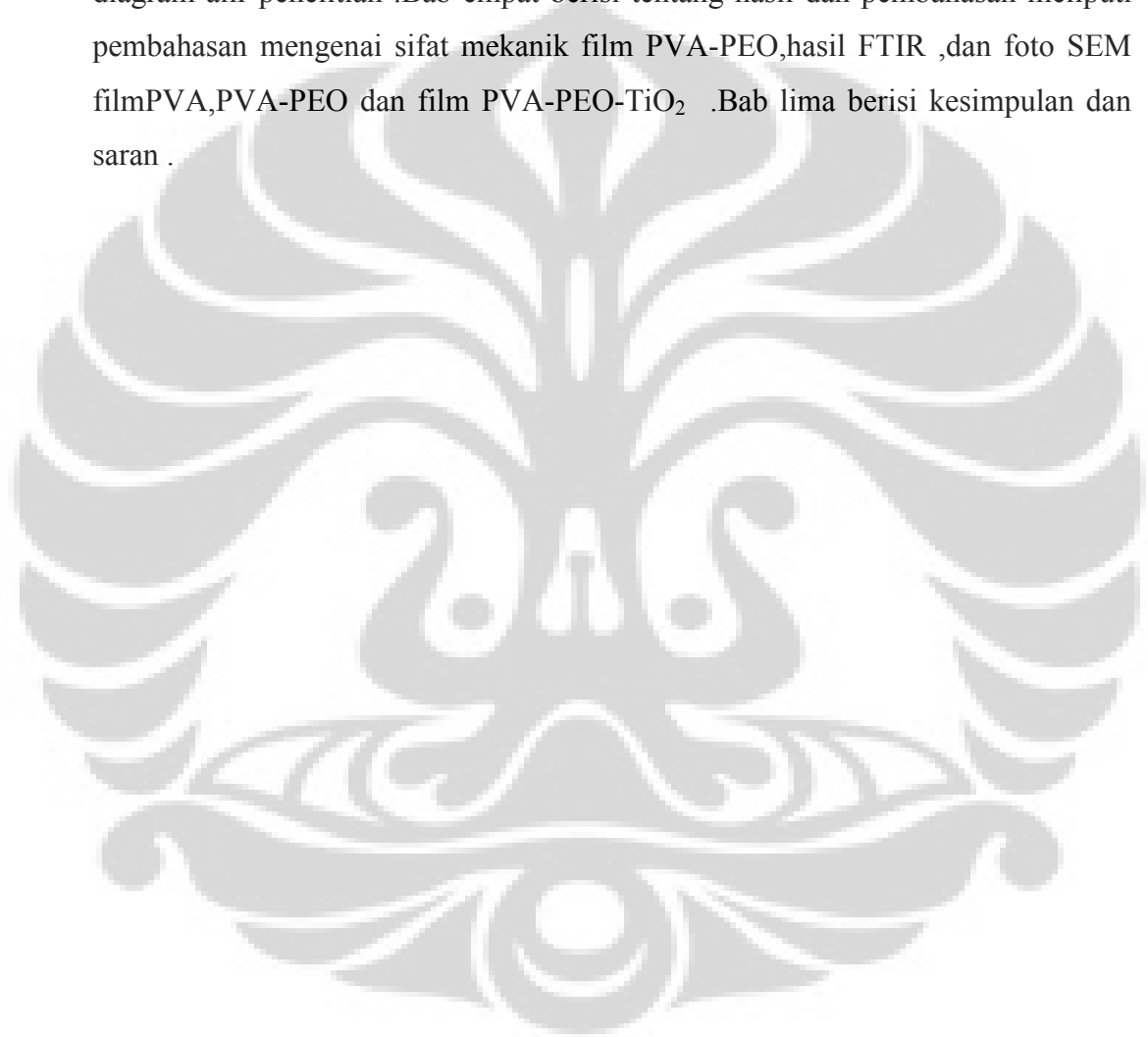
Material sensitif berbasis komposit umumnya menggunakan teknik fabrikasi dan pengukuran yang kompleks serta biaya besar [1, 8, 9]. Oleh karenanya perlu dicari teknik yang lebih sederhana dan lebih ekonomis, namun memiliki sifat-sifat material sensitif terhadap kelembaban yang memenuhi kriteria sebagai material sensitif yang baik seperti sensitivitas yang tinggi, rentang pengukuran yang lebar, stabil terhadap temperatur dan kimia, durasi pemakaian yang lama dan memiliki kurva histerisis yang kecil [10]. Mu Rong Yang dan Ko Shao Chen [10] berhasil membuktikan bahwa polivinil alkohol (PVA) yang didoping dengan elektrolit dapat dijadikan material sensing kelembaban. Namun untuk menstabilkan struktur PVA, digunakan metode radiasi- γ yang relatif mahal agar terjadi *crosslink* atau *pengikatan silang* pada polimer yang hidrofilik (suka air) ini.

Pada tesis ini telah dibuat material sensitif kelembaban dari campuran polimer hidrofilik dengan polimer hidrofilik yaitu PVA dengan PEO yang dimodifikasi dengan TiO_2 . Penggunaan PEO untuk memperbaiki sifat mekanik film yakni untuk menurunkan tingkat swelling yang tinggi dari PVA sekaligus untuk meningkatkan nilai fraksi gel hal ini diharapkan dapat meningkatkan kestabilan film selama efek penuaan. Penggunaan TiO_2 pada film PVA bertujuan untuk memperbaiki sifat kelistrikan film PVA agar menjadi lebih sensitif terhadap perubahan RH hal ini disebabkan karena TiO_2 dapat mengadsorpsi molekul air pada pori-porinya. Studi film komposit PVA-PEO- TiO_2 dapat menjadi alternatif agar dapat dihasilkan sensor kelembaban yang memenuhi kriteria di atas serta dapat dipreparasi dengan mudah. Hal inilah yang menjadi kerja utama penelitian ini, yaitu preparasi dan karakterisasi film komposit PVA-PEO- TiO_2 menggunakan metode deposisi *dip-coating* (pencelupan) untuk digunakan sebagai material sensing sensor kelembaban. Pada penelitian ini pengikatan silang molekul-molekul PVA menggunakan metode kimiawi. Metode ini jauh lebih murah bila dibandingkan dengan metode radiasi- γ [11]. Penelitian ini diharapkan dapat memahami sifat sensitif kelembaban, sifat listrik dan *sensing* film komposit PVA-PEO- TiO_2 .

Karakterisasi struktur dilakukan dengan menggunakan FTIR, untuk mempelajari topografi film komposit PVA-PEO- TiO_2 menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) sedangkan karakterisasi sifat listrik film diteliti menggunakan RCL meter meliputi pengaruh tebal film, pengaruh konsentrasi massa TiO_2 , pengaruh frekuensi ukur, reproduksibilitas, stabilitas impedansi terhadap efek penuaan menggunakan tegangan ac 1 volt dengan frekuensi ukur 1 Khz – 1 Mhz. Karakterisasi listrik dilakukan dalam chamber tertutup rapat dan untuk membuat kondisi kelembaban sesuai dengan % RH yang diteliti digunakan metode larutan garam jenuh.

Jenis penelitian pada tesis ini adalah penelitian terapan, dengan metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Sedangkan tujuannya adalah untuk memodifikasi film PVA agar lebih sensitif terhadap kelembaban dengan menambahkan TiO_2 sebagai modifikator, dengan mempelajari sifat sensing film komposit PVA-PEO- TiO_2 terhadap kelembaban.

Tesis ini terdiri dari lima bab. Bab pertama merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang masalah, jenis penelitian dan tujuan penelitian yang dilakukan. Teori yang mendukung penelitian tesis ini dijelaskan pada bab dua, yang terdiri dari material sensitif kelembaban, polimer sebagai material sensitif terhadap kelembaban, dan mekanisme sensing metal oksida. Pada bab tiga dijelaskan mengenai metodologi penelitian yang terdiri dari lokasi dan bahan penelitian serta diagram alir penelitian. Bab empat berisi tentang hasil dan pembahasan meliputi pembahasan mengenai sifat mekanik film PVA-PEO, hasil FTIR, dan foto SEM film PVA, PVA-PEO dan film PVA-PEO-TiO₂. Bab lima berisi kesimpulan dan saran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Sensitif Kelembaban

Material sensitif kelembaban mendasari prinsip operasi sensor kelembaban relatif (sensor RH). Ada dua prinsip operasi sensor kelembaban, yakni sensor RH *tipe resistif* dan sensor RH *tipe kapasitif*. Sensor RH tipe resistif mendasari prinsip operasinya pada perubahan sifat resistif film terhadap perubahan RH, sedangkan sensor RH tipe kapasitif pada material nonkonduktif yang dapat meningkatkan dielektrik kapasitor. Konstanta dielektrik film berubah saat terjadi absorpsi molekul air sehingga merubah kapasitansi film sebanding dengan besar perubahan RH [15]. Material sensitif kelembaban juga menentukan struktur elektroda sensor RH berupa *interdigital*. Pada struktur interdigital material sensitif kelembaban diletakkan di atas elektroda-elektroda.

Sensor RH berbasis material sensitif keramik atau metal oksida bekerja berdasarkan perubahan konduktivitas akibat adsorpsi air pada permukaan keramik. Kelebihan sensor RH berbasis keramik, adalah pada *mechanical strength*, stabilitas dan daya tahannya terhadap bahan kimia [13]. Namun, sensor RH berbasis keramik memiliki masalah pada sensitivitasnya. Ia harus dibersihkan secara periodik setiap kali habis digunakan agar sensitivitasnya kembali semula. Pembersihan dilakukan dengan cara dipanaskan di atas suhu 400°C. Kekurangan lain adalah pada *respon* sensor yang tidak *reversible* disebabkan kontaminasi pada permukaan keramik oleh kotoran, debu, minyak, asap, alkohol bahan kimia dan sebagainya [4]. Di samping itu, penggunaan material keramik menuntut adanya proses yang menggunakan suhu tinggi sebagai langkah sinteringnya. [16].

Sensor RH berbasis material sensitif polimer telah dikenal secara luas baik yang bertipe kapasitif maupun resistif [1]. Sensor RH tipe kapasitif menggunakan jenis polimer *hydrophobic*, sedangkan sensor RH tipe resistif menggunakan jenis polimer *hydrophilic* [16]. Sensor RH berbasis polimer tipe kapasitif menggunakan material sensitif kelembaban antara lain

cellulose acetate butyrate, *cross-linked poly(methyl methacrylate)* dan *polyimida*. Namun sensor RH ini masih memiliki kelemahan dalam aplikasi praktisnya, khususnya dalam hal stabilitas pada pemakaian yang terus menerus. Berbagai sensor RH tipe resistif berbasis polimer telah dikembangkan, khususnya yang menggunakan polimer polielektrolit. Namun, karena polimer semacam ini umumnya dapat larut dalam air, maka sensor RH yang dihasilkan tidak tahan lama, khususnya bila berhadapan dengan air dan embun. Berbagai cara dicoba untuk mengatasi kelemahan ini, misalnya dengan metode *graft copolymer*. Ketika polimer polielektrolit berikatan secara kimiawi pada film hydrophobic, film graft polimer akan membuat polielektrolit tidak larut dalam air dan tetap mempertahankan kemampuannya melakukan sensing kelembaban. Namun Kelemahan teknik ini adalah dalam hal waktu. Dibutuhkan waktu yang lama bagi uap air untuk melakukan penetrasi masuk maupun keluar dari lapisan film graft polimer, akibatnya waktu respon (*response time*) sensor RH menjadi lambat. [10].

Komposit adalah kombinasi dua atau lebih material yang berbeda sifat kimia dan sifat fisiknya dan tidak saling melarutkan [18]. Struktur komposit terdiri dari *matriks* yang merupakan fase kontinu dan material reinforcement yang disebut *filler*. Berdasarkan matriksnya, komposit digolongkan atas beberapa jenis dan dua diantaranya adalah komposit dengan matriks keramik dan komposit dengan matriks polimer. Dua jenis komposit ini telah banyak diriset orang sebagai material sensitif kelembaban kelembaban. [7, 8, 9, 19]

2.2 Polivinil alkohol sebagai material sensitif kelembaban

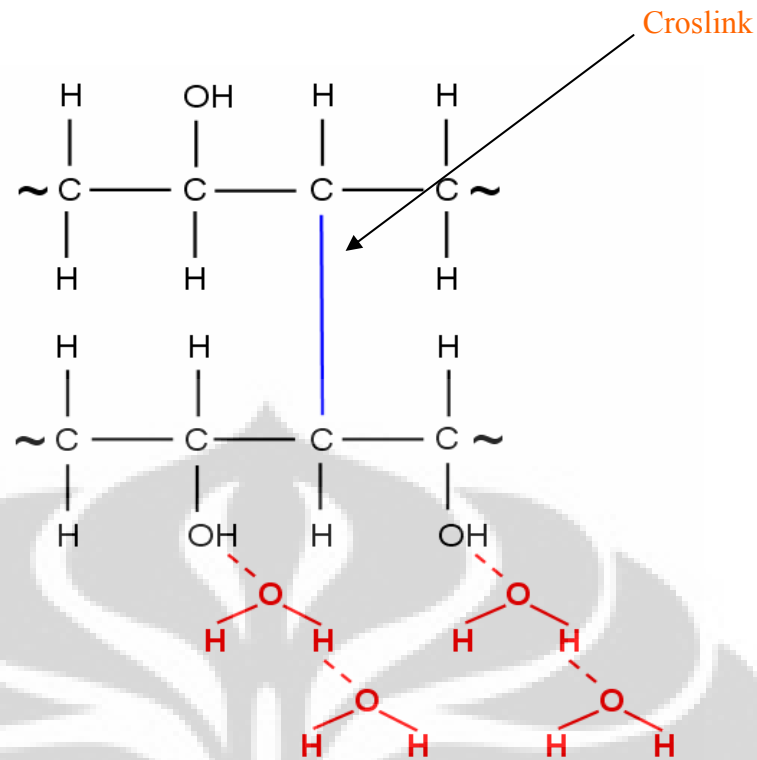
Walaupun resistivitasnya tinggi, yakni antara $3,1 - 3,8 \times 10^7 \Omega\text{cm}$ [20] polivinil alkohol (PVA) dapat digunakan sebagai material sensitif kelembaban sensor RH karena sifatnya yang hidrofilik (suka air). M.R Yang dan K.S. Chen [10] berhasil menurunkan impedansi film PVA dengan cara mencampur polimer yang merupakan hasil polimerisasi monomer *vinilasetat* ini dengan *elektrolit* (PSSD, NaCl dan MBSD). Stabilitas struktur polimer yang mudah *swelling* ini dilakukan dengan *argon plasma treatment* menggunakan sinar γ sehingga terjadi *ikatan silang* (cross-linking) sehingga

terbentuk jaringan matriks dari PVA yang kokoh. Nurlaila dkk. [21] mengganti metode *argon plasma treatment* dengan metode kimiawi, ia menggunakan *ammonium peroksodisulfat* ($(NH_4)_2S_2O_8$ (APS) sebagai *trigger* terjadinya ikatan silang polimer PVA pada pembuatan sensor RH menggunakan film PVA yang ditambahkan dengan NaCl. Cara ini tidak saja mereduksi biaya preparasi tapi juga membuat prosesnya menjadi lebih sederhana. Dena dkk berhasil membuat sensor RH berbasis film komposit PVA-TiO₂ yang ditambahkan NaCl dengan tambahan APS ini. Konduktivitas film dilaporkan meningkat tajam walau masih ada kendala kestabilan sensor tersebut saat terekspos kondisi RH yang tinggi. Kemampuan film PVA dalam menangkap uap air dikarenakan adanya gugus OH pada salah satu rantai cabangnya seperti disajikan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 (a) monomer vinil alkohol (b) struktur polivinil alkohol

Penurunan impedansi pada film PVA dimungkinkan karena kemampuan PVA menyerap uap air seperti disajikan pada Gambar 2.2



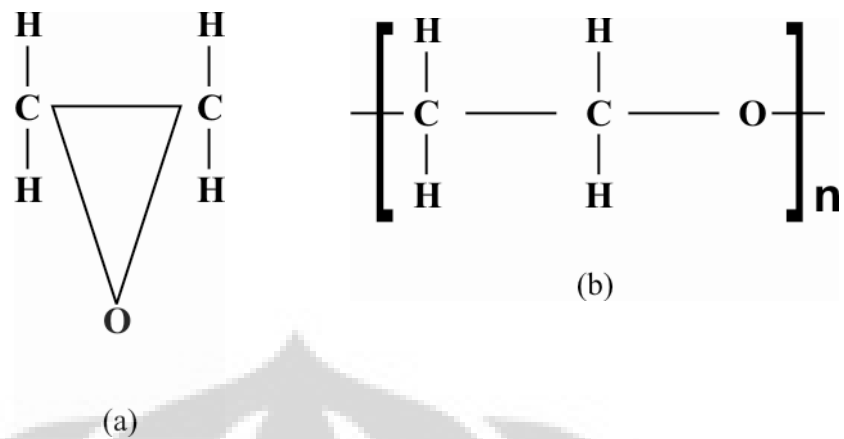
Gambar 2.2 Ikatan hidrogen antara uap air dan PVA. Digambar ulang dari daftar acuan [21]

Penurunan impedansi pada film PVA dimungkinkan karena kemampuan PVA menyerap uap air. Semakin banyak uap air yang diserap semakin besar pula kenaikan konduktivitas atau penurunan impedansinya. Pada saat RH naik banyak molekul air yang ditangkap oleh PVA melalui pembentukan ikatan hidrogen antara ion H^+ molekul air dengan tangan OH^- pada rantai PVA (Gambar 2.2).

Semakin banyak uap air yang ditangkap semakin banyak pula ion H^+ yang terbentuk. Karena ukurannya yang kecil, ion H^+ memiliki mobilitas yang tinggi sehingga dapat menurunkan impedansi film secara drastis pada saat RH tinggi [10].

2.3 Polietilen oksida sebagai material sensitif terhadap kelembaban

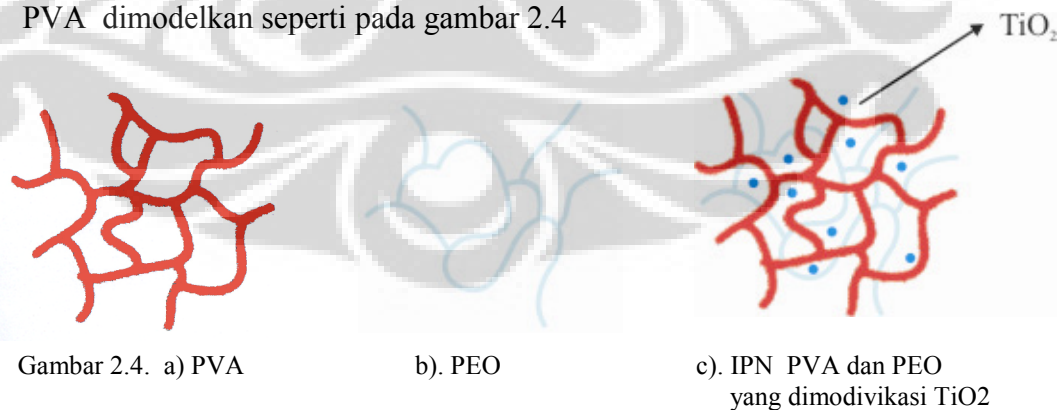
PEO yang awalnya berasal dari monomer Etylen Oxide hanya merupakan sebuah cincin Epoxide, pada kedua sudutnya terdapat molekul CH_2 , sudut ketiga adalah oksigen, gabungan dari monomer-monomer ini membentuk suatu rantai panjang yang berulang, untuk lebih jelasnya tentang sintesis dan struktur dari PEO dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3. (a) monomer etilena oksida (b). Struktur molekul PEO

Secara umum PEO memiliki sifat fisik dengan tampilan berupa padatan kering PEO merupakan polimer kristalin yang memiliki berat molekul sekitar 100.000-7.000 000 gram .Dalam aplikasinya PEO sering digunakan untuk aplikasi dalam pembuatan kertas. Kemampuan PVA menyerap uap air yang tinggi dapat dimodifikasi dengan polimer lain yang memiliki tingkat hidrofilik yang rendah dalam hal ini PEO .

PVA dan PEO mula-mula berbentuk rantai panjang sebelum ditambahkan APS dan setelah ditambah APS baik PVA maupun PEO masing –masing tercrosslink sedangkan antara PVA dengan PEO tidak terjadi crosslink hanya IPN , sedangkan TiO_2 menyebar pada permukaan PVA dimodelkan seperti pada gambar 2.4



Gambar 2.4. a) PVA

b). PEO

c). IPN PVA dan PEO yang dimodifikasi TiO_2

Gambar 2.4 merupakan model film PVA, film PVA-PEO dan film PVA-PEO- TiO_2 sebelum dan setelah ditambahkan APS, pada permodelan ini terlihat sebelum ditambahkan APS baik PVA maupun PEO berupa garis-

garis lurus satu sama lain tidak berikatan, setelah ditambahkan APS terjadi ikatan antara garis satu dengan yang lainnya ini dianalogikan terjadinya cross link baik antara PVA dengan PVA maupun antara PEO dengan PEO, sedangkan antara PVA dengan PEO tidak terjadi ikatan, hanya saling mengayam dalam hal ini dikatakan IPN seperti disajikan oleh Gambar 2.4.c sedangkan penambahan TiO_2 pada film PVA-PEO seperti dimodelkan pada Gambar 2.4.c disini terlihat TiO_2 yang tadinya berupa bubuk dalam film PVA-PEO- TiO_2 tetap berupa bubuk yang tersebar pada permukaan PVA. IPN antara PVA dengan PEO ini diharapkan dapat menurunkan tingkat swelling dari film PVA dikarenakan jaringan PEO mengisi ruang kosong yang terdapat pada jaringan PVA yang tercrosslink. Penambahan PEO pada PVA diharapkan tidak merubah tekstur PVA dan tidak menghalangi kemampuan film dalam menyerap uap air, untuk mengantisipasi hal ini agar tidak terjadi, dilakukan penelitian awal untuk menentukan komposisi optimal PEO yang ditambahkan pada film PVA-PEO. Berdasarkan penelitian awal didapatkan konsentrasi massa PEO yang dapat ditambahkan pada penelitian selanjutnya adalah 40 mg atau 4 % massa PVA yang digunakan ini didasarkan kestabilan film selama *aging* efek [30] diharapkan dengan terjadinya IPN antara PEO dengan PVA, sehingga PVA masih bisa menjalankan fungsinya sebagai penangkap molekul uap air, sekaligus dapat meningkatkan kestabilan PVA setelah melepaskan uap air tekstur PVA diharapkan bisa kembali seperti semula.

2.4 Metal Oksida sebagai material sensitif kelembaban

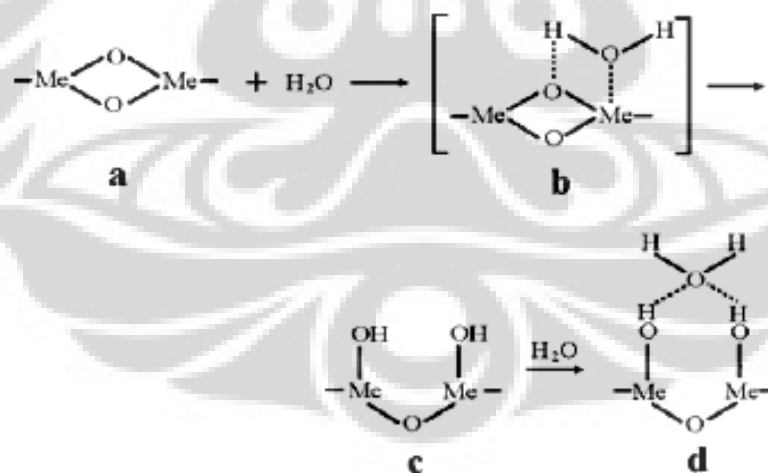
2.4.1 Chemisorpsi dan fisisorpsi

Adsorpsi adalah proses dimana sebuah molekul (adsorbat) menempel di atas permukaan material. Adsorpsi berbeda dengan absorpsi, kata yang biasanya dipakai untuk menggambarkan penyerapan molekul ke dalam *bulk* material (*solid* atau *likuid*) [22]. Berdasarkan model ikatan antara adsorbat dan permukaan material, adsorpsi dibedakan atas adsorpsi kimia (chemisorpsi) dan adsorpsi fisika (fisisorpsi). Chemisorpsi ditandai oleh energi ikat yang tinggi yang dihasilkan dari transfer atau redistribusi muatan

listrik pada permukaan material dan adsorbat. Fisisorbsi melibatkan gaya intermolekul yang disebut gaya van der Waals. Gaya van der Waals merupakan gaya tarik-menarik antara sebuah molekul dan molekul tetangganya. Gaya van der Waals merupakan interaksi dipol-dipol antara molekul-molekul polar. Energi ikat pada fisisorbsi sekitar 0,1 eV. Ini relatif lebih kecil bila dibandingkan energi ikat pada chemisorbsi yang besarnya di atas 1 eV [23].

2.4.2 Mekanisme Sensing Metal Oksida

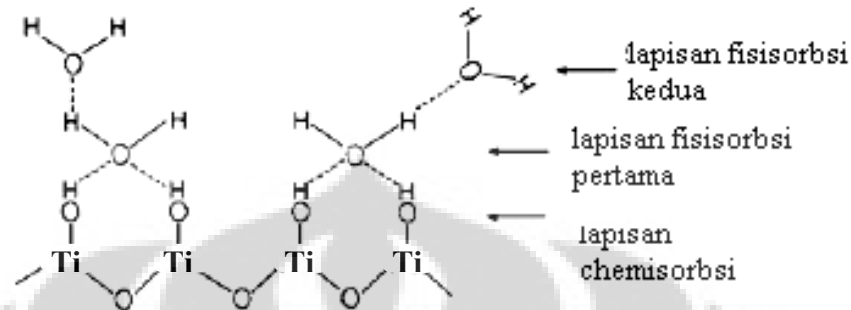
Chen dan Lu [14] menjelaskan mekanisme konduksi adsorpsi pada Fe_2O_3 yang menurut Arai [1] dapat diberlakukan untuk jenis metal oksida lainnya. Penjelasan mereka adalah sebagai berikut. Tahap awal adsorpsi terjadi chemisorbsi molekul air pada permukaan metal oksida (Gambar 2.2a) yang membentuk kompleks adsorpsi (Gambar 2.2b), yang selanjutnya berubah menjadi permukaan gugus hidroksil (Gambar 2.2c). Adsorpsi molekul air selanjutnya membentuk lapisan fisisorbsi pertama melalui ikatan hidrogen antara satu molekul air dengan dua gugus hidroksil terdekat seperti pada Gambar 2.2d.



Gambar 2.5 Empat tahapan adsorpsi pada metal oksida. Digambar ulang dari Daftar Acuan [14]

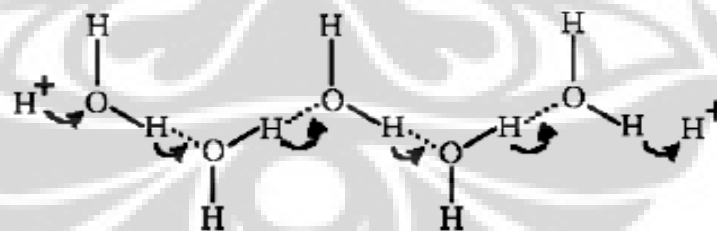
Pada lapisan fisisorbsi pertama ini molekul air tidak dapat bebas bergerak karena terikat oleh gaya listrik dengan dua gugus hidroksil tadi. Jadi lapisan ini tidak mobil karena tidak ada ikatan hidrogen antara molekul

air yang satu dengan molekul air lainnya. Oleh karenanya tidak ada konduksi proton pada saat ini. Proton hanya dapat berpindah dari gugus hidroksil ke molekul air membentuk ion H_3O^+ .



Gambar 2.6 Struktur banyak lapisan pada kondensasi molekul air Digambar ulang dari Daftar Acuan [14]

Semakin tinggi RH, semakin banyak molekul air yang teradsorpsi pada permukaan metal oksida dan membentuk lapisan fisisorpsi kedua di atas lapisan fisisorpsi pertama dimana satu molekul air berikatan hidrogen dengan satu gugus hidroksil dan proton dapat melompat (hopping) dari molekul air yang satu ke molekul air terdekat lainnya pada lapisan molekul air yang kontinu (Gambar 2.6). Proses konduksinya persis seperti konduksi pada air murni dan disebut reaksi berantai Grothuss atau mekanisme Grothuss (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Mekanisme Grothuss proton dapat melompat (hopping) dari molekul air yang satu ke molekul air terdekat pada lapisan molekul air yang kontinu. Digambar ulang dari Daftar Acuan [14]

Jadi pada RH tinggi, pembawa muatan listrik adalah ion H^+ atau proton [24]. Meningkatnya konduktivitas ionik ini juga dibarengi oleh meningkatnya kapasitansi film karena faktor dielektrik. Pada lapisan fisisorpsi pertama molekul air mengadakan ikatan hidrogen ganda dengan dua gugus hidroksil yang membuatnya sulit berotasi. Sebaliknya pada

lapisan fisisorpsi kedua, molekul air berikatan hidrogen dengan satu gugus hidroksil yang membuatnya lebih mudah berotasi. Hal ini akan meningkatkan konstanta dielektrik sebab hal ini memungkinkan bagi molekul air untuk membentuk dipole dan mengarahkannya sesuai dengan medan listrik luar [25].

2.5 Impedansi film PVA dan Metal Oksida

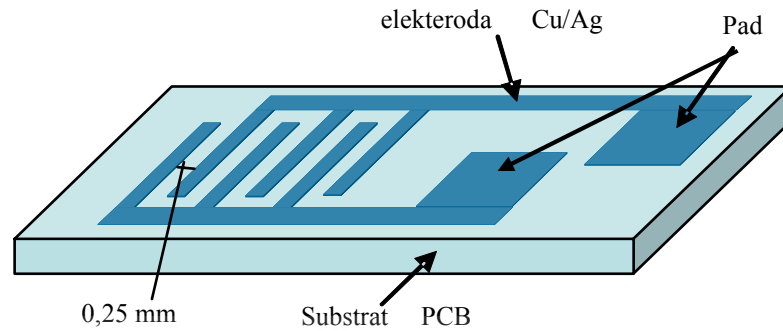
Turunnya impedansi film PVA dan MO tidak saja disebabkan karena mobilitas ion H^+ seperti diuraikan di atas, penurunan impedansi dapat juga disebabkan karena meningkatnya konstanta dielektrik film PVA seiring dengan semakin banyaknya uap air yang diserap. Air (H_2O) tergolong material yang memiliki molekul polar dengan dua ion H^+ dan satu ion O^- . Bila material ini dijadikan dielektrik suatu kapasitor keping sejajar, maka Saat tak ada medan listrik luar orientasi molekul material ini akan acak dan saat ada medan listrik luar material akan terpolarisasi dengan cara mengarahkan momen dipol molekul-molekul polarnya ke satu arah tertentu.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Fabrikasi Film

Kegiatan fabrikasi atau preparasi film meliputi penentuan komposisi dan konsentrasi material film, proses pembuatan material sensing film serta deposisi material sensing tersebut ke dalam substrat modul substrat berelektroda. Seluruh kegiatan dilaksanakan di Departemen Fisika FMIPA UI. Bahan-bahan kimia yang digunakan untuk preparasi film, yaitu polivinil alkohol (PVA), ammonium perokdisulfat (APS), polyetilen oksida (PEO) dan Titanium oksida (TiO_2), merupakan produk MERCK. Desain modul substrat berelektroda terdiri dari substrat printed board circuit (PCB), elektroda yang terbuat dari tembaga (Cu) dan sepasang *pad*. Tembaga dipilih karena pasangan PCB yang lazim dijumpai di pasaran dan dilapisi perak (Ag) agar tidak mudah korosif. Proses pelapisan dengan perak ini jauh lebih mudah dan murah bila dibandingkan menggunakan emas. Substrat PCB modul substrat berelektroda jenis resistif ini berukuran 20 mm x 15 mm. Elektroda yang digunakan berstruktur interdigital dengan 3 pasang elektroda yang masing-masingnya memiliki lebar 0,5 mm, panjang 7 mm dan jarak antar elektroda 0,25 mm. Struktur interdigital bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas film sebab struktur ini menghasilkan hambatan total dari rangkaian hambatan paralel 3 pasang elektroda yang nilainya lebih kecil bila dibandingkan hambatan sepasang elektroda. Agar film hanya bekerja pada daerah elektroda maka pada modul substrat berelektroda diberikan bahan pembatas sejenis plastik. Konstruksi modul ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Konstruksi modul substrat berelektroda RH berbentuk interdigital dengan 3 pasang elektroda

Alat-alat yang digunakan dalam fabrikasi film antara lain gelas ukur, pipet meter, timbangan digital sensitif, pengaduk dari kaca, sloki, thermostat dan kotak kedap udara (chamber).

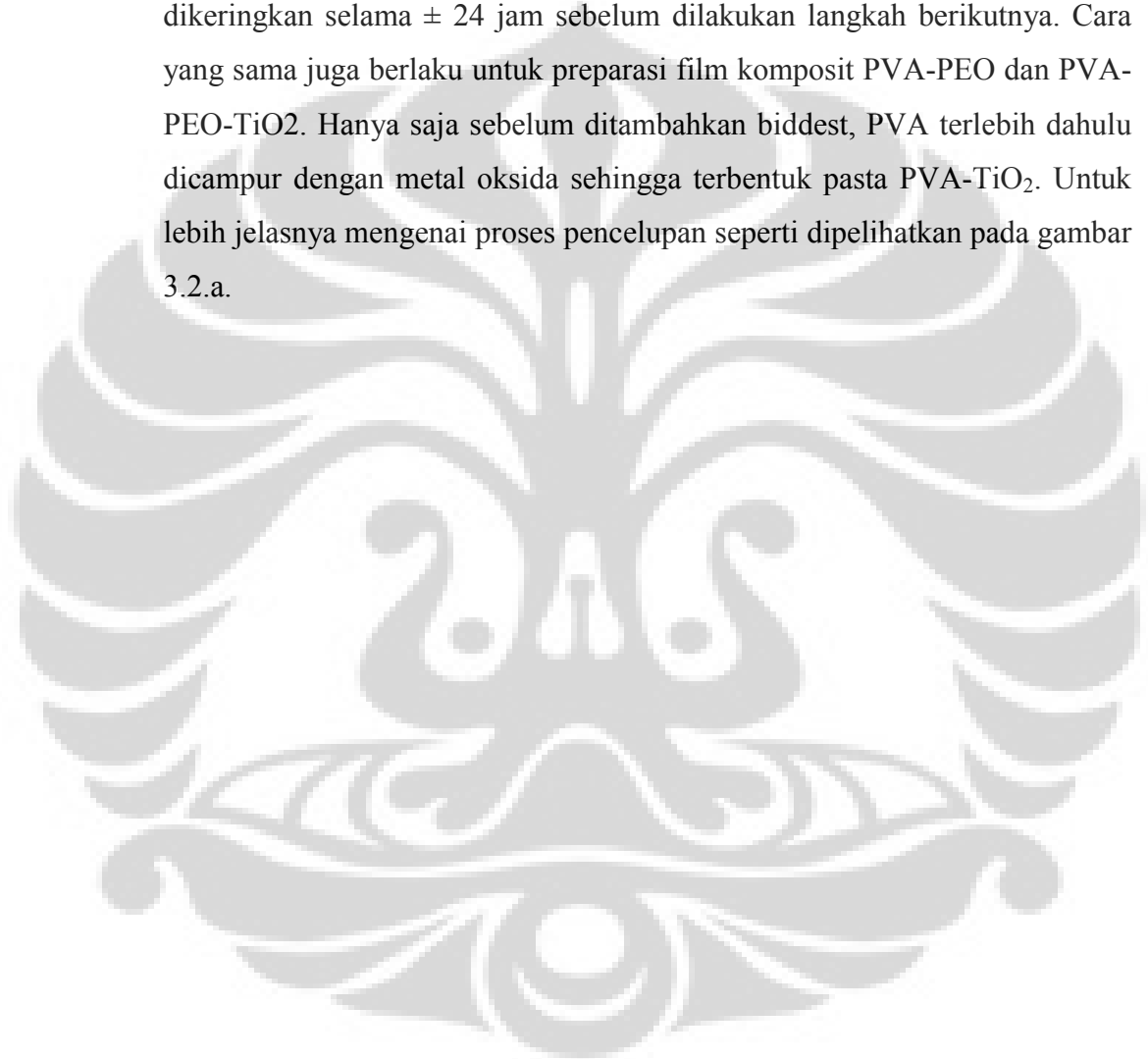
Tabel 3.1: Komposisi material film untuk meneliti efek Konsentrasi Titanium Oksida (TiO_2)

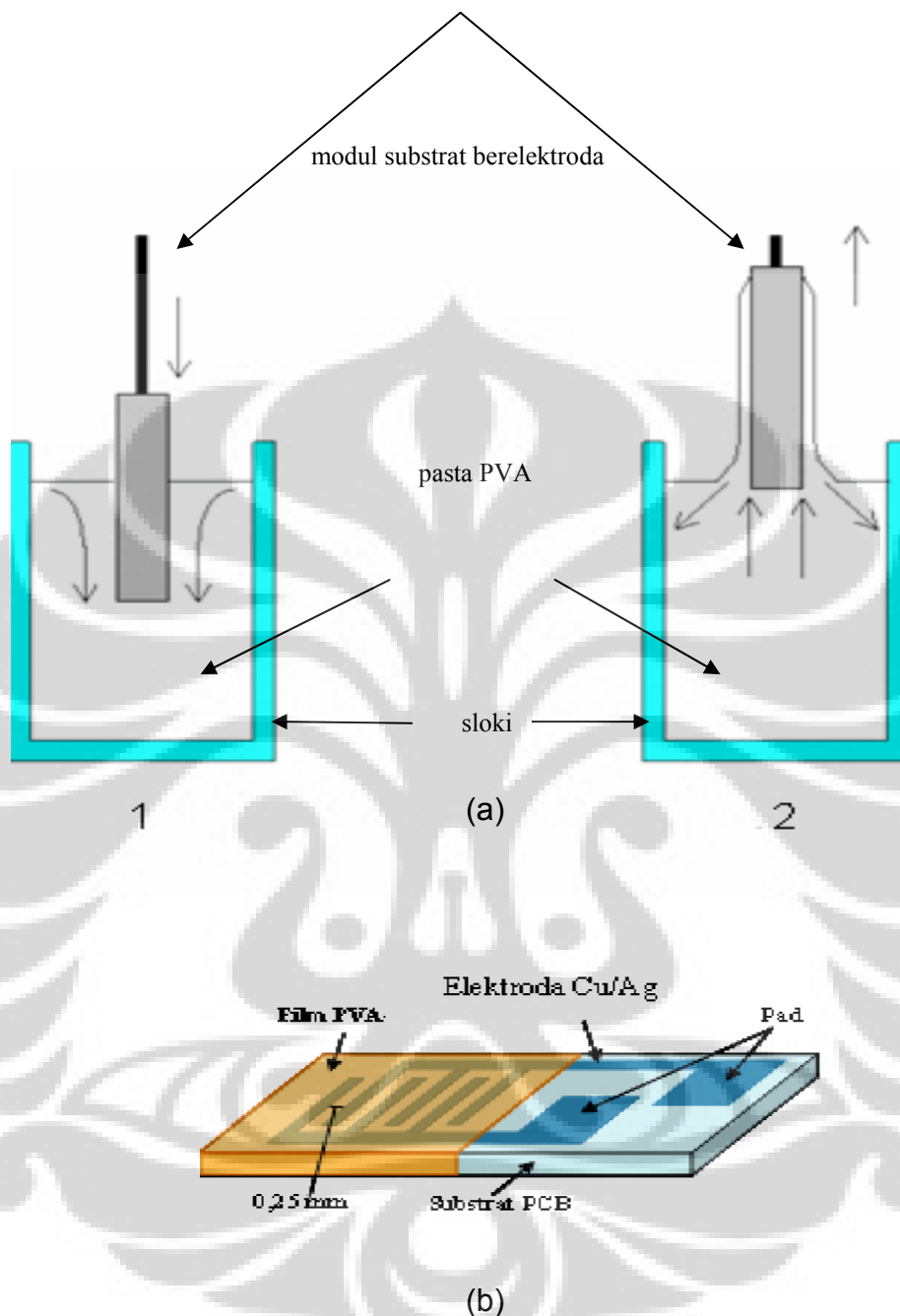
No	Jenis Film	PVA (mg)	Bidest (ml)	APS (mg)	PEO (mg)	TiO_2 (mg)
1	PVA	1000,0	10,00	40,0	-	-
2	PVA-PEO	1000,0	10,00	40,0	40,0	-
3	PVA-PEO- TiO_2	1000,0	10,00	40,0	40,0	300,0
		1000,0	10,00	40,0	40,0	1000,0
		1000,0	10,00	40,0	40,0	1500,0
		1000,0	10,00	40,0	40,0	2000,0

Ada dua fabrikasi film yang disiapkan, yaitu fabrikasi film dengan tujuan meneliti efek konsentrasi massa TiO_2 terhadap impedansi film komposit PVA-PEO- TiO_2 (Tabel 3.1) dan fabrikasi film dengan tujuan meneliti efek tebal film terhadap impedansi. Untuk fabrikasi yang kedua ini disiapkan modul dengan ketebalan yang berbeda-beda, yakni lapis 1, lapis 2 dan lapis 3. Proses preparasi film dapat dijelaskan sebagai berikut.

Bubuk PVA yang sudah ditimbang dicampur dan diaduk dengan biddest dalam gelas sloki sehingga tercampur merata. Setelah dipanaskan pada temperatur 80°C dalam termostat selama 12 jam, kemudian didinginkan

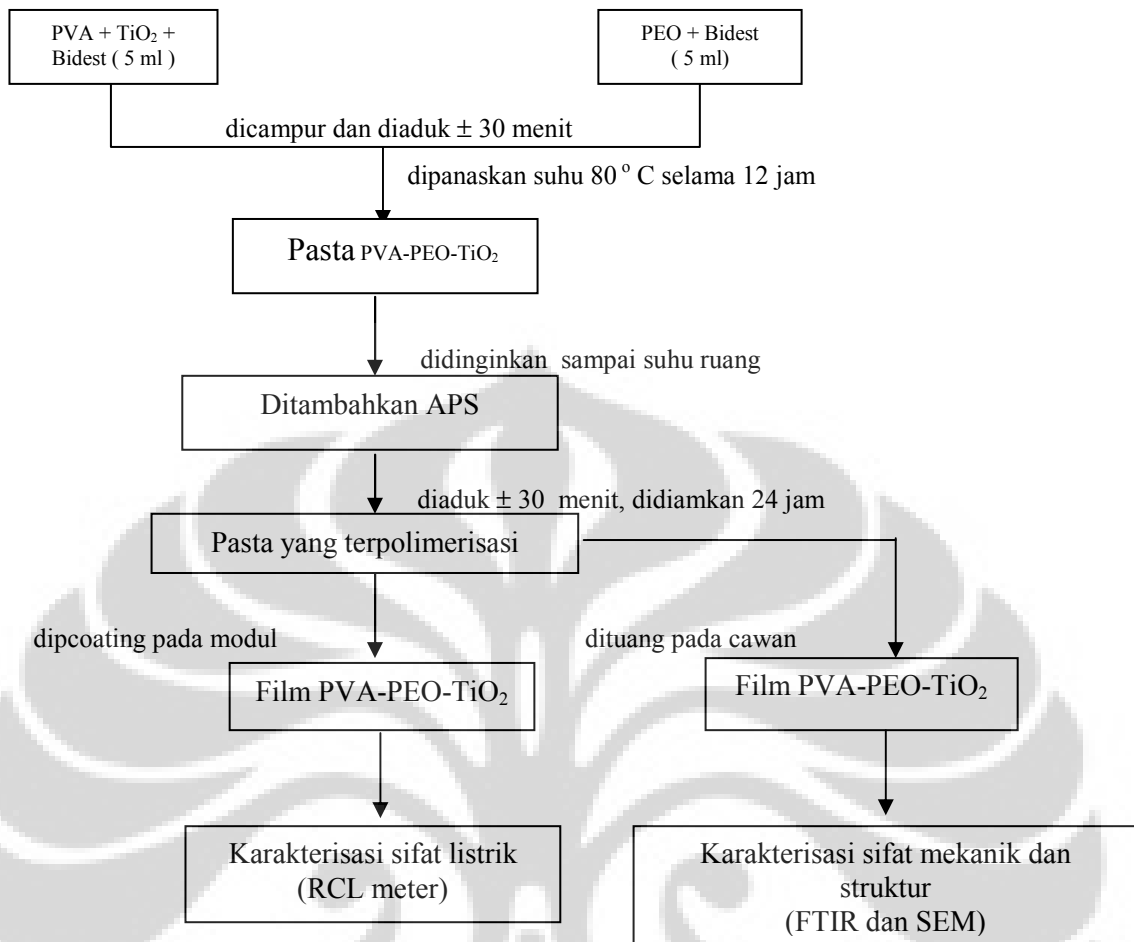
sampai mencapai suhu ruang, ditambahkan APS , didiamkan 24 jam, di dipcoating pada modul. Untuk setiap modul substrat berelektroda, pencelupan dilakukan sebanyak satu kali, dua kali dan tiga kali tergantung jumlah lapis yang diinginkan, antara pencelupan satu dengan pencelupan berikutnya berselang selama 24 jam, agar film benar-benar kering dengan waktu celup ± 10 detik. Selanjutnya modul substrat berelektroda dikeringkan selama ± 24 jam sebelum dilakukan langkah berikutnya. Cara yang sama juga berlaku untuk preparasi film komposit PVA-PEO dan PVA-PEO-TiO₂. Hanya saja sebelum ditambahkan biddest, PVA terlebih dahulu dicampur dengan metal oksida sehingga terbentuk pasta PVA-TiO₂. Untuk lebih jelasnya mengenai proses pencelupan seperti dipelihatkan pada gambar 3.2.a.





Gambar 3.2 (a) Deposisi dengan metode dipcoating (b) Setelah pencelupan elektroda interdigital terlapisi film PVA (Sumber : Tesis Setia Gunawan)

Proses fabrikasi film PVA dan film komposit PVA-PEO-TiO₂ ini dapat disimpulkan dalam bentuk diagram alir seperti diperlihatkan Gambar 3.3. Selesai dipreparasi proses selanjutnya adalah karakterisasi film.



Gambar 3.3 Diagram alir preparasi film komposit PVA-PEO-TiO₂

3.2 Pengkondisian Kelembaban

Kalibrasi film dibutuhkan agar dapat diteliti sifat listrik film terkait dengan perubahan RH. Kalibrasi dilakukan dengan cara meletakkan modul substrat berelektroda yang telah dilapisi film pada kondisi RH tertentu pada temperatur yang dijaga konstan (25°C). Sebagai kalibrator RH digunakan larutan garam jenuh yang kelembabannya telah diketahui (Tabel 3.2).

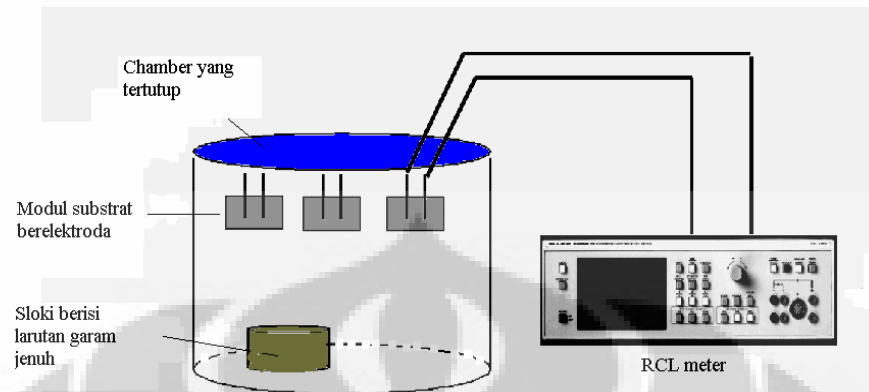
Tabel 3.2 Nilai % RH larutan garam jenuh yang digunakan sebagai kalibrator (Sumber: <http://www.cma.science.uva.nl>)

Jenis Garam	15°C	20°C	25°C
MgCl ₂	33,3	33,07	32,78
MgNO	55,87	54,38	52,89
NaCl	75,61	75,47	75,29
KCl	85,92	85,11	84,34
KNO ₃	95,41	94,62	94,05

Kalibrasi dilakukan dengan prosedur sebagai berikut

- Salah satu larutan garam jenuh pada Tabel 3.3 dimasukkan ke dalam sloki dengan tinggi ± 3 cm.
- Sloki berisi larutan garam jenuh dimasukkan ke dalam chamber kalibrator terbuat dari plastik (teflon) kedap udara. Tinggi chamber ± 10 cm sehingga ada sekitar 7 cm di atas sloki terisi oleh udara dengan besar RH yang pasti. Sementara itu chamber yang digunakan telah dimodifikasi agar dapat mengukur impedansi film pada modul substrat berelektroda yang dipasang pada bagian bawah tutup chamber saat sepasang pad pada modul substrat berelektroda itu dihubungkan dengan RCL meter (Gambar 3.4). Dalam eksperimen ini digunakan RCL meter *Fluke* tipe PM 6306 dan chamber didesain untuk memuat lebih dari 5 modul substrat berelektroda sekaligus.
- Pengukuran impedansi film (juga besaran listrik lainnya) dilakukan setelah ± 12 jam berlalu sebab harus menunggu kelembaban udara di dalam chamber benar-benar sama dengan kelembaban larutan garam jenuh di dalam sloki. Hasil Pengukuran dijadikan sebagai titik kalibrasi pertama.
- Prosedur di atas diulangi untuk mendapatkan titik kalibrasi kedua, ketiga, keempat dan kelima dengan cara mengganti larutan garam jenuh sesuai dengan urutan % RH larutan garam pada Tabel 3.3. Lima titik

- kalibrasi ini akan digunakan untuk meneliti sifat-sifat listrik film terhadap perubahan RH.



Gambar 3.4 Chamber kalibrator. Udara di atas larutan garam jenuh memiliki kelembaban relatif yang sama dengan kelembaban relatif larutan garam jenuh.

3.3 Karakterisasi Listrik

Karakterisasi listrik terhadap film PVA, PVA-PEO maupun film komposit PVA-PEO-TiO₂ dilakukan dengan cara menghubungkan sepasang pad pada modul substrat berelektroda dengan RCL meter seperti diperlihatkan Gambar 3.4. Tegangan pada RCL meter diatur 1 volt baik untuk sinyal tegangan bolak-balik (AC) maupun tegangan searah (DC). Untuk tegangan AC, digunakan empat nilai frekuensi ukur masing-masing 1 kHz, 10 kHz, dan 100 kHz serta 1 MHz. Variasi frekuensi ukur ini dilakukan untuk meneliti pengaruh frekuensi tersebut terhadap impedansi film. Dengan sinyal tegangan ini diperoleh data-data berupa nilai impedansi (Z), resistansi (R), induktansi diri (L), kapasitansi (C) dan beda fase (θ) film pada nilai RH tertentu.

3.4 Karakterisasi Struktur

Karakterisasi struktur menggunakan FTIR untuk melihat spektrum yang dihasilkan pada film PVA, PVA-PEO dan PVA-PEO-TiO₂, sedangkan *scanning electron microscope* (SEM) JSM 5310 LV dengan tujuan mempelajari topografi film khususnya untuk film PVA, film PVA-PEO, PVA-PEO-TiO₂. Hal ini diperlukan untuk meneliti efek penambahan TiO₂ terhadap sifat listrik film terkait dengan perubahan RH.

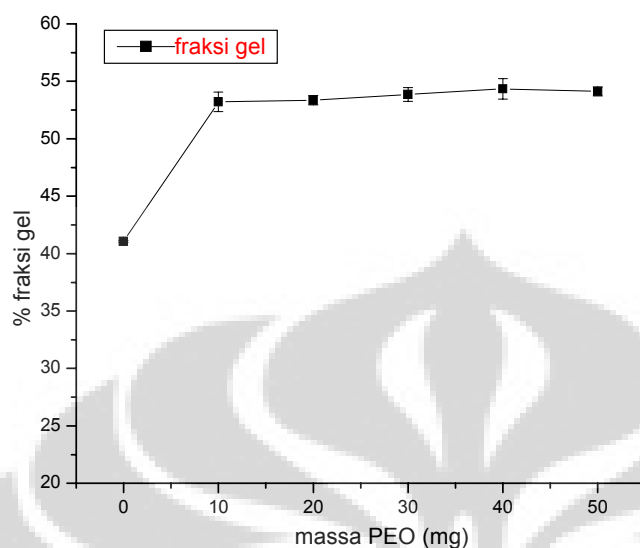
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini diuraikan sifat-sifat film PVA, film PVA-PEO dan film komposit PVA-PEO-TiO₂ berdasarkan hasil karakterisasi struktur dan listrik. Sifat mekanik film PVA dan film PVA yang sudah ditambahkan PEO diuji melalui pengukuran kekuatan tarik, fraksi gel, dan tingkat swelling. Karakterisasi struktur dipelajari dengan menggunakan FTIR, topografi film yang dipelajari menggunakan SEM, sementara pada karakterisasi listrik dibahas sensitivitas film terhadap kelembaban, pengaruh penambahan massa TiO₂ yang digunakan, efek frekuensi ukur, pengaruh tebal film dan model rangkaian ekuivalen impedansi film. Selanjutnya dibahas pula reproduksibilitas fabrikasi serta stabilitas film komposit PVA-PEO-TiO₂.

4.1 Sifat Mekanik Film PVA –PEO

Penelitian sifat mekanik film PVA-PEO dilakukan melalui fraksi gel, tingkat *swelling*, dan kekuatan tarik. Hal ini dilakukan untuk menentukan konsentrasi massa PEO yang tepat untuk ditambahkan pada film PVA. Hasil penelitian fraksi gel diperoleh grafik seperti pada gambar 4.1.



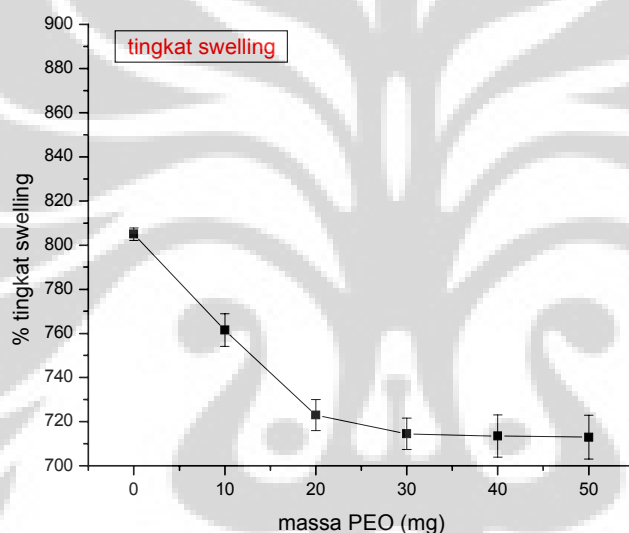
Gambar 4.1 Pengaruh penambahan konsentrasi massa PEO terhadap fraksi gel film PVA-PEO.

Pada tabel dan gambar 4.1 terlihat bahwa nilai fraksi gel film PVA sebesar 41,55%. Fraksi gel film PVA-PEO dengan massa PEO 10,0 mg, 20,0 mg, 30,0 mg, 40,0 mg, dan 50,0 mg berturut-turut sebesar 53,20%, 51,35%, 53,85%, 54,34%, dan 54,10%. Persentase kenaikan fraksi gel dapat dihitung dengan cara fraksi gel film PVA-PEO dikurangi fraksi gel film PVA dibagi dengan fraksi gel film PVA lalu dikalikan dengan 100%. Pada penambahan massa PEO 10,0 mg, fraksi gel film PVA-PEO sudah meningkat sebesar 28,04%. Kenaikan fraksi gel PEO 40,0 mg yaitu 30,78%, merupakan kenaikan tertinggi sehingga dapat dikatakan bahwa fraksi gel film PVA-PEO paling baik dengan massa PEO 40,0 mg.

Fraksi gel film PVA-PEO antara massa PEO 10,0 mg hingga 50,0 mg relatif tidak terjadi kenaikan, grafik pada bagian tersebut cukup datar (*overlap*). Hal ini terjadi karena antara PVA dengan PEO terjadi *interpenetration polymer network* (IPN). Menurut Paul Calvert [28] dalam suatu campuran polimer, terjadinya reaksi *crosslink* ditandai dengan naiknya nilai fraksi gel baik sebagai efek penambahan salah satu komponen maupun sebagai efek radiasi akan tetapi hal ini tidak terjadi pada penambahan konsentrasi massa PEO diatas 10 mg. Terjadinya

IPN diharapkan dapat meningkatkan stabilitas film setelah proses pelepasan uap air.

Pengujian nilai *Swelling* perlu dilakukan untuk mengetahui berapa persen massa air yang diserap oleh film dibandingkan terhadap massa kering tersebut. Semakin kecil *swelling* suatu film, maka makin stabil film tersebut. Nilai *swelling* diharapkan rendah karena pada intinya proses *sensing* uap air terjadi pada permukaan film. Pengaruh penambahan PEO terhadap tingkat *swelling* terlihat pada gambar 4.2.

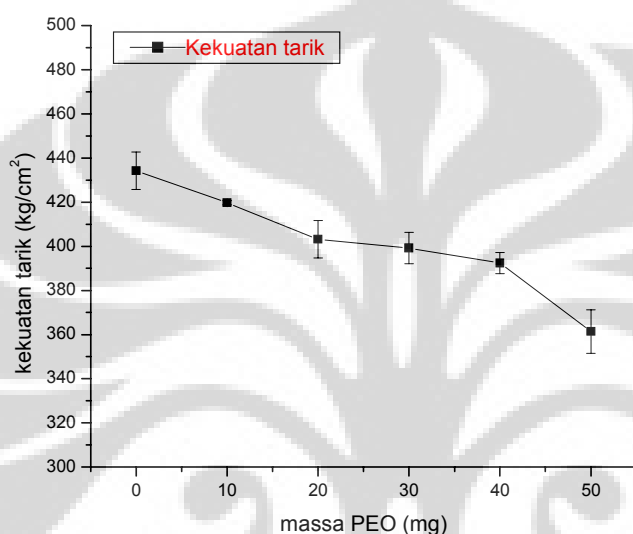


Gambar 4.2 Pengaruh massa PEO terhadap *swelling* film PVA-PEO.

Film PVA 1000,0 mg memiliki nilai *swelling* sebesar 805,0%. *Swelling* film PVA-PEO dengan massa PEO 10,0 mg, 20,0 mg, 30,0 mg, 40,0 mg, dan 50,0 mg berturut-turut sebesar 761,5%, 723,0%, 714,5%, 713,5%, dan 706,5%. Persentase penurunan *swelling* dapat dihitung dengan cara *swelling* film PVA dikurang *swelling* film PVA-PEO dibagi dengan *swelling* film PVA lalu dikalikan dengan 100%. Pada film dengan massa PEO 10,0 mg dan 20,0 mg gradien grafik turun tajam. Pada film dengan massa PEO 50,0 mg terjadi penurunan sebesar 12,24% relatif terhadap *swelling* film PVA. Penurunan ini disebabkan terbentuk IPN antara PVA dengan PEO. Dapat

diambil kesimpulan bahwa penambahan PEO dapat menurunkan *swelling* film PVA-PEO sehingga meningkatkan kestabilan film tersebut.

Pengaruh penambahan PEO terhadap kekuatan tarik disajikan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pengaruh massa PEO terhadap kekuatan tarik film PVA-PEO.

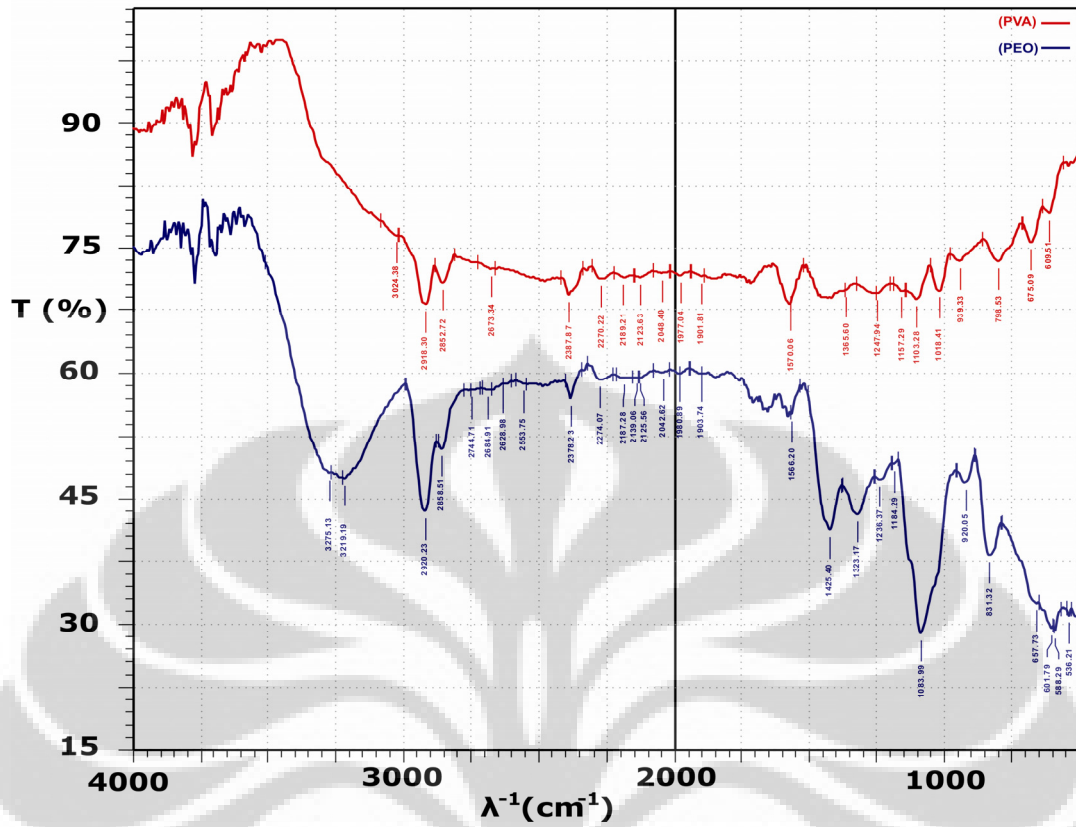
Film PVA 1000,0 mg memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 434,2%. Kekuatan tarik film PVA-PEO dengan massa PEO 10,0 mg, 20,0 mg, 30,0 mg, 40,0 mg, dan 50,0 mg berturut-turut sebesar 419,7%, 403,2%, 399,2%, dan 361,4%. Persentase penurunan kekuatan tarik dapat dihitung dengan cara kekuatan tarik film PVA dikurang kekuatan tarik film PVA-PEO dibagi dengan kekuatan tarik film PVA lalu dikalikan dengan 100%. Penurunan terbesar terjadi pada penambahan massa PEO 50,0 mg yaitu sebesar 16,77%. Penurunan ini dikarenakan PEO terdistribusi pada PVA sehingga mengubah tekstur PVA. Disamping itu karena massa PEO yang ditambahkan terlalu banyak sehingga mencegah terjadinya *crosslink* pada PVA [30].

Berdasarkan uji mekanik dapat disimpulkan bahwa film PVA-PEO paling baik dengan komposisi 1000,0 mg PVA dan 40,0 mg PEO. Alasannya adalah pada massa PEO 40,0 mg, film PVA-PEO memiliki peningkatan

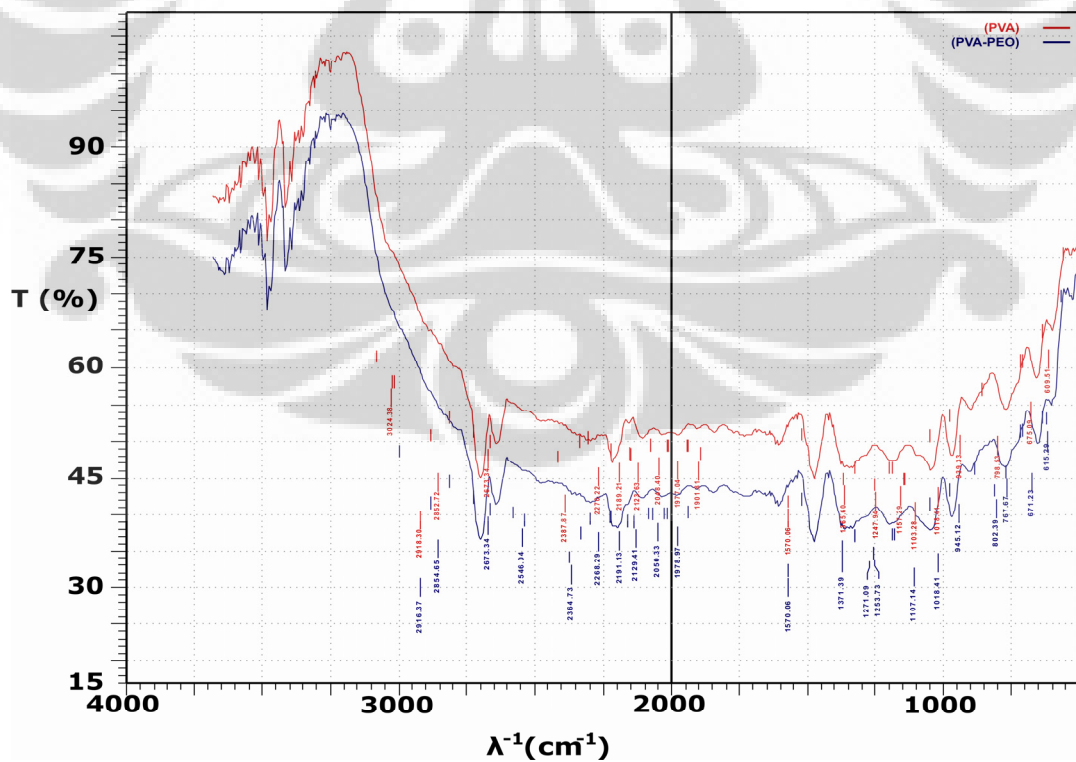
fraksi gel sebesar 30,78%, penurunan *swelling* sebesar 11,37%, dan penurunan kekuatan tarik sebesar 8,06% relatif terhadap film PVA, ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Lila, untuk konsentrasi massa PEO 40,0 mg memiliki kestabilan yang baik selama efek penuaan ini dijadikan acuan konsentrasi massa PEO yang ditambahkan pada film komposit PVA-PEO-TiO₂.

4.2 Struktur Film PVA, PVA-PEO, PVA-PEO-TiO₂

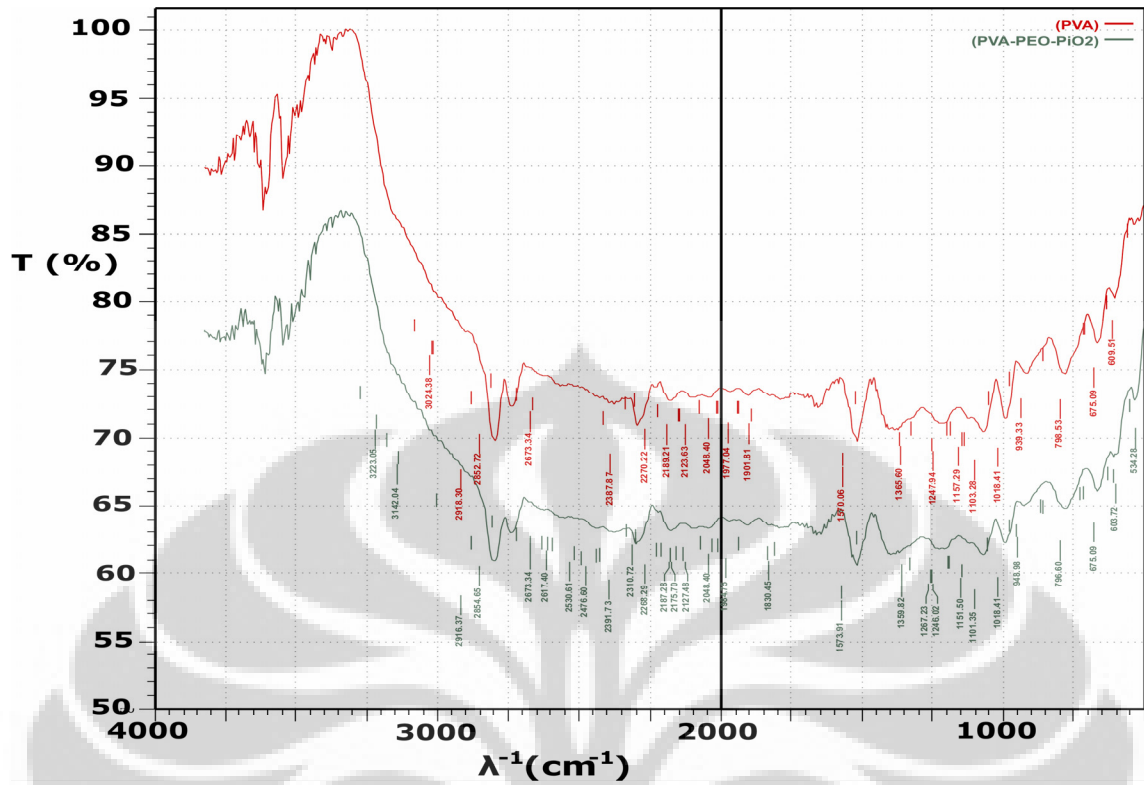
Untuk mengetahui struktur film dilakukan analisis dengan menggunakan FTIR, sampel yang dianalisis adalah film PVA-APS, film PVA-PEO-APS dan film PVA-PEO-TiO₂-APS. Karakterisasi struktur menggunakan FTIR dilakukan untuk mengetahui bagaimana struktur film setelah dimodifikasi PEO dan TiO₂. Hasil FTIR seperti disajikan pada gambar 4.4 -4.7.



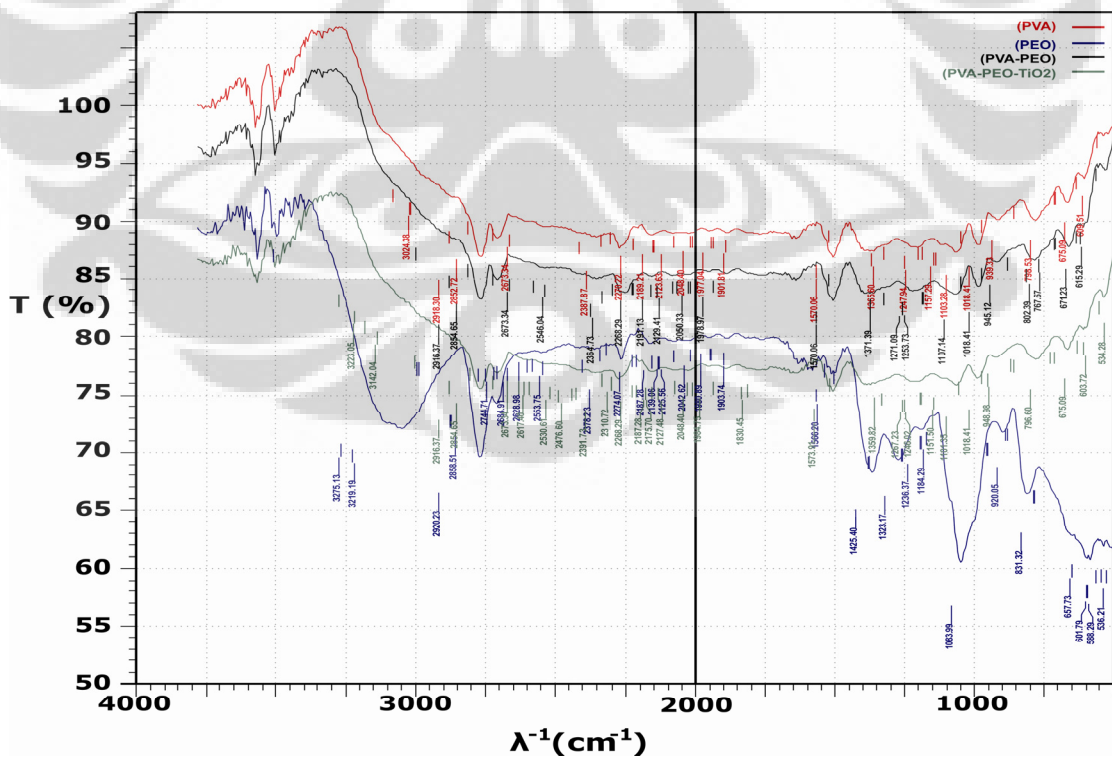
Gambar 4.4 FTIR film PVA 1000 mg dan PEO 40 mg



Gambar 4.5 FTIR film PVA dan PVA-PEO



Gambar 4.6 FTIR film PVA dan PVA-PEO-TiO₂ (TiO₂ 1000 mg)

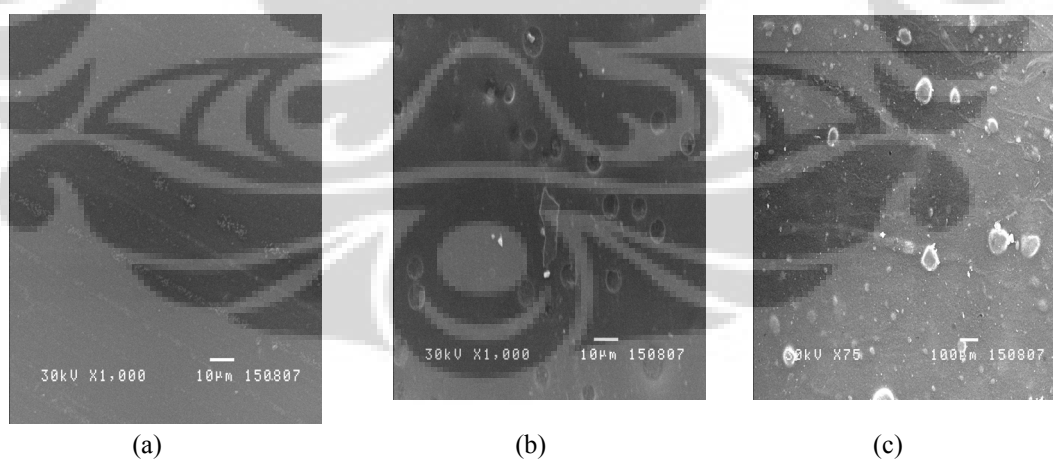


Gambar 4.7 FTIR film PVA, PVA-PEO, PVA-PEO-TiO₂, dan PEO

Gambar 4.4 sampai dengan 4.7 jika dibandingkan film PVA-APS dengan PVA-PEO-APS tidak terlihat perubahan peak yang berarti, begitu juga antara film PVA-APS dengan film PVA-PEO-TiO₂-APS mengalami hal yang sama yakni memiliki spektrum yang *overlap* dengan spektrum PVA. Hal ini disebabkan karena massa PVA dalam berbagai film sebesar 1000 mg, relatif jauh lebih besar dibandingkan dengan massa PEO yang hanya 40 mg (1000 : 40) sehingga PVA lebih dominan, alasan kedua adalah antara PVA dengan PEO maupun TiO₂ tidak terjadi reaksi kimia sehingga tidak ada gugus fungsi yang berubah. Pada gambar 4.4 sampai dengan 4.7 hasil FTIR menunjukkan *peak* yang muncul pada daerah rentangan energi 2700-3800 cm⁻¹ ini adalah gugus O-H, C-H, dan C-O. Semua gugus fungsi ini terdapat pada struktur molekul PVA. Hal tersebut mengidentifikasi bahwa antara PVA dengan PEO tidak *crosslink* akan tetapi terjadi IPN. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan Junyan Gong [29]

4.3 Topografi film PVA, PVA-PEO, PVA-PEO-TiO₂

Topografi film dipelajari menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Gambar 4.1 memperlihatkan foto SEM dari film PVA, film PVA-PEO, film PVA-PEO-TiO₂.



Gambar 4.8 Foto SEM (a) film PVA (b) film PVA-PEO (c) film komposit PVA-PEO-TiO₂.

Tampak pada gambar 4.8a film PVA berbentuk seperti plat hitam. Ini diakibatkan PVA bersifat isolator dengan impedansi yang tinggi, sedangkan film PVA-PEO terlihat perbedaan dengan film PVA murni. Pada film PVA-

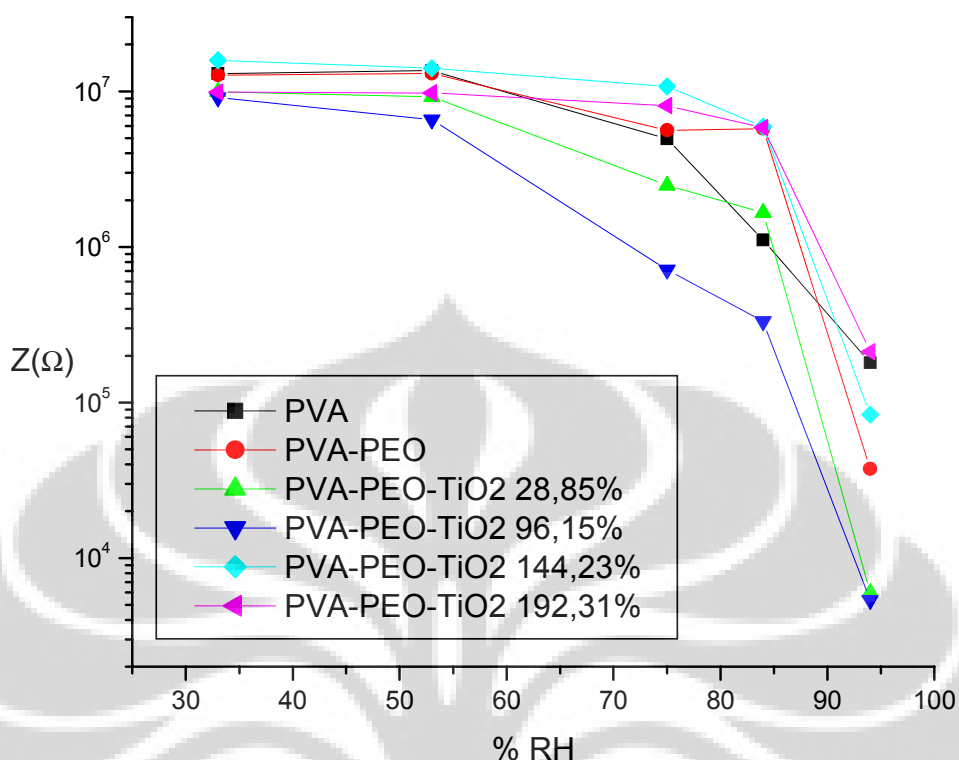
PEO terlihat seperti tetes hujan ditutupi lapisan tipis, ini diduga karena kristal-kristal PEO terdistribusi pada matrik PVA, sehingga setelah kering terlihat seperti bekas-bekas tetesan air hujan. Pada film PVA-PEO-TiO₂ juga terlihat TiO₂ menyebar pada permukaan film. Senyawa TiO₂ masih terlihat jelas berupa butiran yang berada dibawah lapisan tipis.

4.4 Sifat Listrik dan *Sensing* Kelembaban Film Komposit PVA-PEO-TiO₂

4.4.1 . Pengaruh Konsentrasi Massa TiO₂ Terhadap Impedansi Film

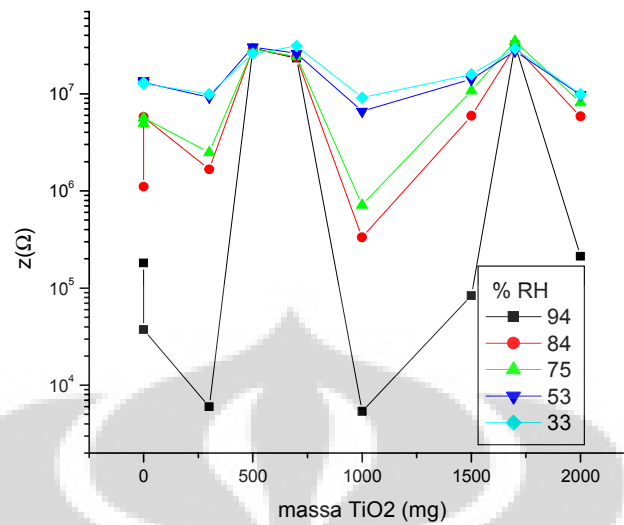
Sifat listrik dan *sensing* kelembaban film komposit PVA-PEO-TiO₂ dipelajari dengan cara meneliti pengaruh ketebalan film, massa modifikator (TiO₂), pengaruh frekuensi ukur terhadap impedansi film serta model rangkaian ekivalensi impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂. Massa modifikator logam oksida , yakni 300 mg (28,85 % relatif terhadap massa PVA-PEO) sampai dengan 2000 mg(96,15 % relatif terhadap massa PVA-PEO) dan semua diukur pada frekuensi 1 kHz.

Kadar PVA tidak mempengaruhi impedansi film, sedangkan kadar PVA di atas 1000 mg agak sulit dideposisikan pada substrat karena larutan menjadi lengket [2]. Oleh karenanya massa PVA yang digunakan untuk semua preparasi film dalam penelitian ini adalah 1000 mg . Sampel dibuat tiga set untuk keperluan karakterisasi listrik dan reproduksibilitas film. Sensitivitas RH film PVA diteliti dengan cara memvariasikan massa TiO₂ pada film komposit PVA-PEO-TiO₂ pada berbagai kondisi RH. Penurunan impedansi film diteliti untuk berbagai daerah kelembaban. Hasil pada gambar 4.9 memperlihatkan signifikansi pengaruh konsentrasi massa TiO₂ terhadap penurunan impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂.



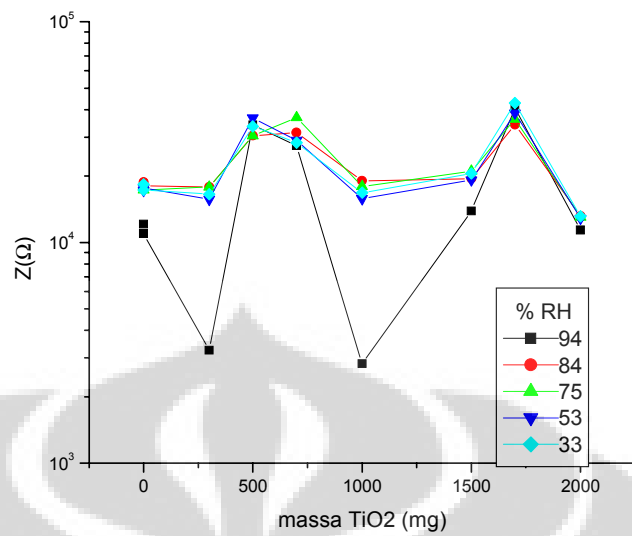
Gambar 4.9 Pengaruh massa TiO₂ (dalam film PVA-PEO-TiO₂) terhadap impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ untuk berbagai RH pada frekuensi ukur 1 kHz

Tampak pada Gambar 4.9 bahwa impedansi film komposit turun lebih tajam untuk setiap kenaikan RH bila dibandingkan dengan film PVA saja, terutama pada RH tinggi. Pada daerah RH rendah pengaruh massa TiO₂ terhadap penurunan impedansi film tidak begitu signifikan, kecuali untuk penambahan massa TiO₂ 1000 mg atau 96,15 % relatif terhadap massa PVA dan PEO. Respon penurunan impedansi yang baik pada rentang 33% RH sampai dengan 94% RH. Gambar 4.9 dapat dibuat grafik hubungan antara impedansi dengan variasi massa TiO₂. Hasilnya diperlihatkan pada Gambar 4.10.



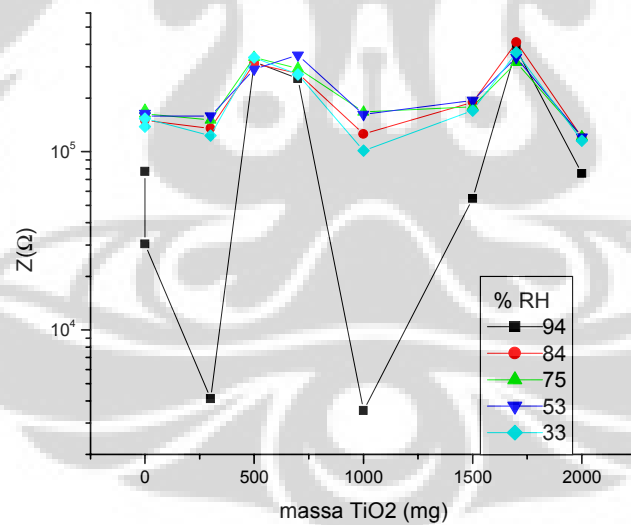
Gambar 4.10 Hubungan antara impedansi dan massa TiO₂ pada film komposit PVA-PEO-TiO₂ untuk berbagai kelembaban RH pada frekuensi ukur 1 kHz.

Tampak dari Gambar 4.10 konsentrasi modifikator TiO₂ 300 mg (28,85%) dan 1000 mg (96,15%) membuat impedansi film lebih rendah dibandingkan variasi konsentrasi yang lainnya,. Gambar 4.10 memperlihatkan kecenderungan penurunan impedansi yang optimal saat konsentrasi TiO₂ sebesar 1000 mg atau 96,15 % relatif terhadap massa PVA dan PEO di berbagai daerah RH. Berdasarkan data-data ini, besar dugaan bahwa perbandingan konsentrasi PVA dan TiO₂ yang tepat untuk film komposit PVA-PEO-TiO₂ adalah 1 : 1 . Untuk mengetahui apakah hal yang sama juga terjadi pada frekuensi lain kita lihat pada frekuensi ukur 1 Mhz, 100khz,dan 10 khz. memberi pengaruh yang sama. Hasilnya diperlihatkan Gambar 4.11.

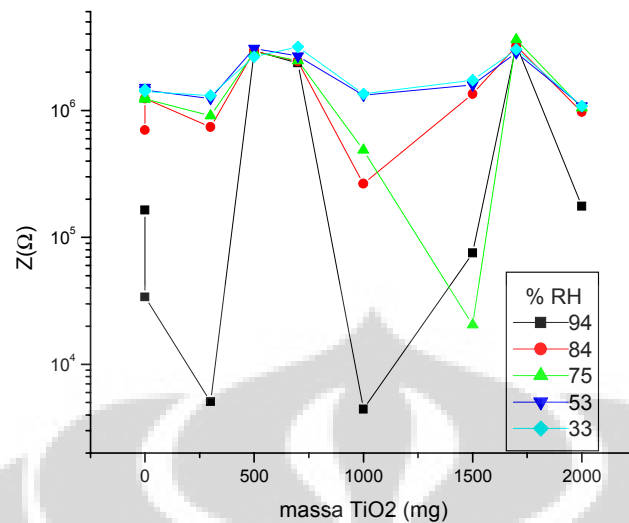


Gambar 4.11 Pengaruh massa TiO₂ pada impedansi film PVA-PEO-TiO₂ untuk berbagai RH dan frekuensi 1 Mhz.

Gambar 4.11 juga memperlihatkan bahwa pada massa TiO₂ 300 mg dan 1000 mg terjadi penurunan impedansi yang signifikan.



Gambar 4.12 Pengaruh massa TiO₂ pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ untuk berbagai RH dengan frekuensi 100khz.

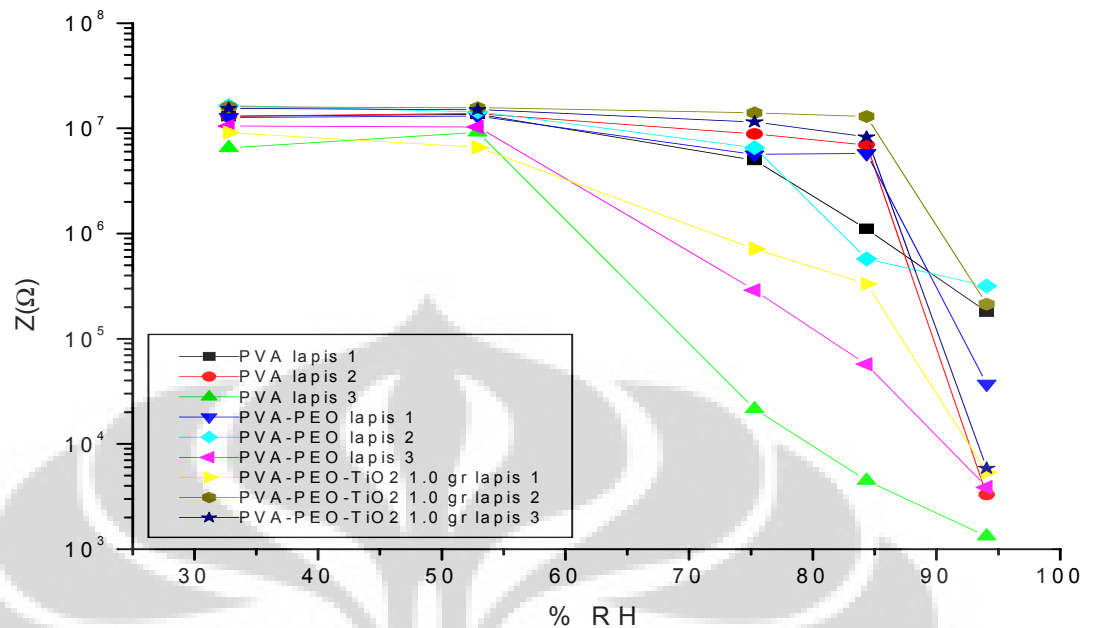


Gambar 4.13 Pengaruh massa TiO₂ pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ untuk berbagai RH dengan frekuensi 10kHz.

Berdasarkan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa penambahan TiO₂ sebesar 1000 mg memberikan sensitivitas RH yang baik pada film komposit PVA-PEO-TiO₂, impedansi film turun tajam pada konsentrasi massa tersebut, ini diduga pada kondisi ini PVA dan TiO₂ menangkap uap air pada kondisi optimal seiring dengan itu jumlah ion H⁺ yang berada dalam film mengalami peningkatan ini berakibat turunya nilai impedansi film tersebut (Z)

4.4.2 Pengaruh Ketebalan Terhadap Impedansi Film PVA-PEO-TiO₂

Hasil karakterisasi listrik terhadap film PVA, PVA-PEO, dan PVA-PEO-TiO₂ dengan variasi tebal masing-masing satu lapis, dua lapis, dan tiga lapis dengan massa modifikator 300,0 mg sampai dengan 2000,0 mg dan diukur pada frekuensi 1 kHz sampai dengan 1000 kHz sumber tegangan bolak-balik (AC) diperlihatkan pada Gambar 4.14. Gambar ini juga dilengkapi dengan hasil karakterisasi film PVA sebagai pembanding. Terlihat film komposit tersebut sama-sama memiliki sensitivitas RH yang baik bila dibandingkan dengan film PVA saja.



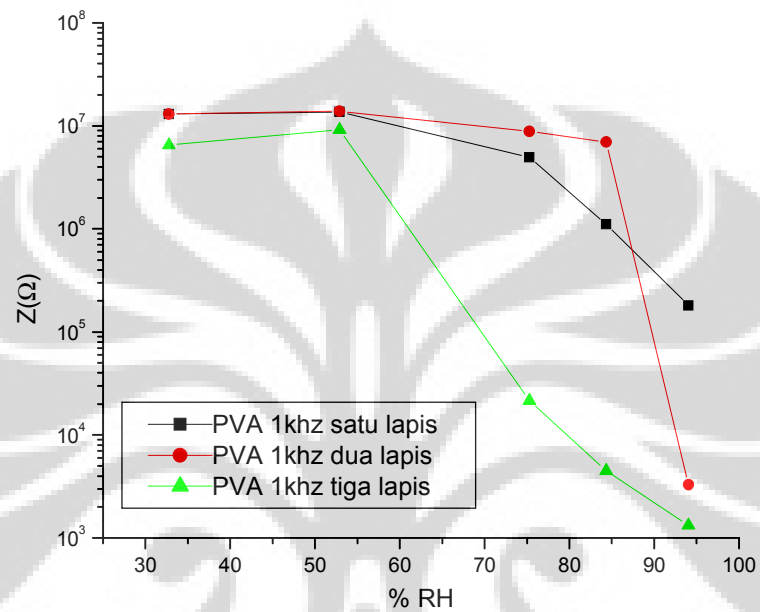
Gambar 4.14 Pengaruh ketebalan pada impedansi film PVA, PVA-PEO, dan film komposit PVA-PEO-TiO₂ diukur pada frekuensi 1 kHz.

Berdasarkan gambar 4.14 terlihat bahwa pada RH rendah yakni 33% semua film tidak sensitif kecuali film komposit PVA-PEO-TiO₂ 1000 mg lapis satu, sedangkan pada RH diatas 53% semua film telah memperlihatkan sensitifitas. Sensitifitas yang paling baik tetap film komposit PVA-PEO-TiO₂ 1000 mg satu lapis . Berdasarkan gambar 4.14 dapat disimpulkan untuk film PVA dan PVA-PEO memiliki sensitifitas yang baik yaitu tiga lapis sedangkan untuk film komposit PVA-PEO-TiO₂ yang memiliki sensitifitas yang baik yaitu satu lapis. Hal ini karena pada film PVA dan PVA-PEO, konsentrasi PVA lebih dominan dari konsentrasi PEO dengan perbandingan 100 : 4 atau konsentrasi PEO sebesar 4 %. PVA merupakan polimer yang hidrofilik yang memiliki gugus OH. Semakin tebal film, semakin banyak gugus OH yang berperan dalam penangkapan uap air. Hal ini berpengaruh pada sensitifitas film.

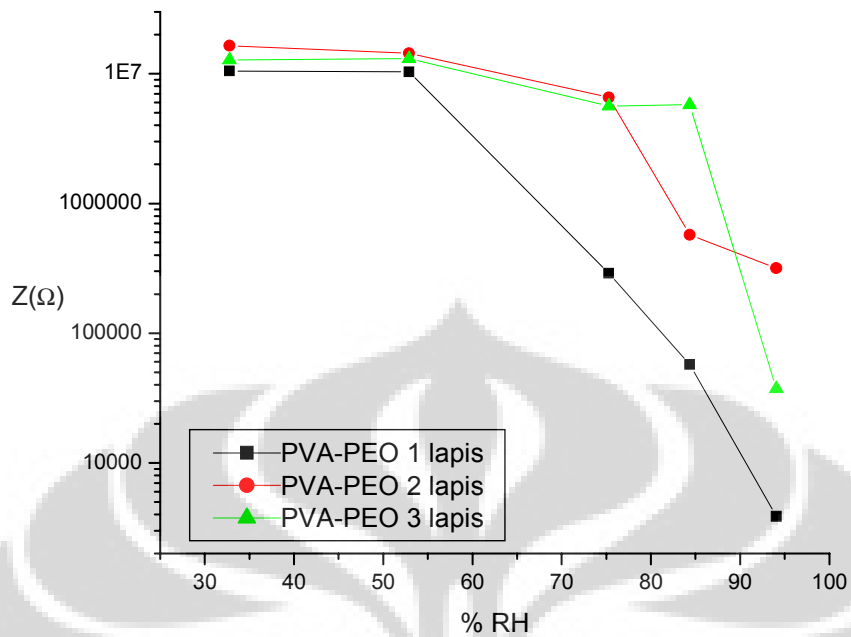
Film PVA-PEO-TiO₂ lebih sensitif satu lapis karena perbandingan antara PVA dengan TiO₂ adalah 1 : 1. Berbeda halnya dengan PVA yang menangkap uap air pada gugus OH, TiO₂ menangkap uap air pada pori-

porinya. Jika film terlalu tebal, proses penangkapan uap air akan terhalang sehingga sensitifitas film tersebut menurun.

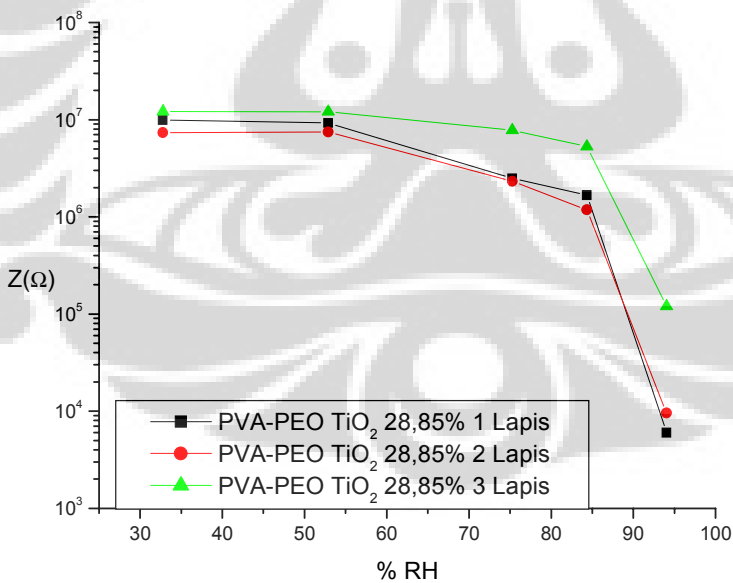
Pada gambar 4.15 ditampilkan pengaruh tebal film dan perubahan RH terhadap penurunan impedansi pada frekuensi ukur 1 khz.



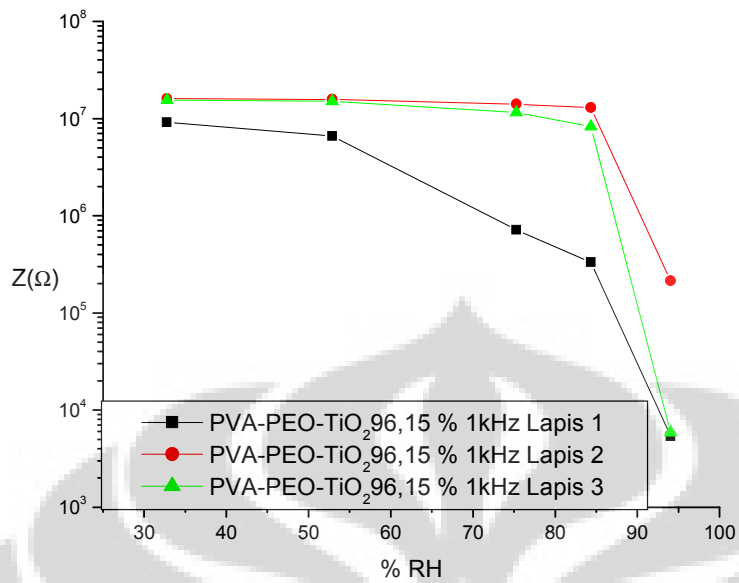
Gambar 4.15 Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA 1000 mg dan diukur pada frekuensi 1 kHz.



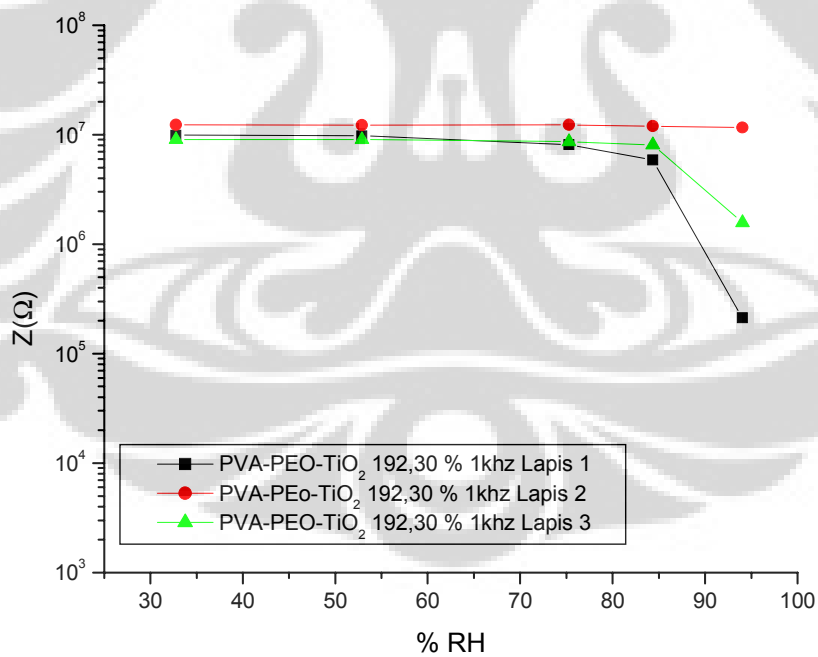
Gambar 4.16. Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO (PEO 40 mg) diukur pada frekuensi 1 khz



Gambar 4.17 Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO₂ 28,85% (TiO₂ 300,0 mg) diukur pada frekuensi 1 khz



Gambar 4.18 Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (TiO₂ 1000 mg) diukur pada frekuensi 1 khz

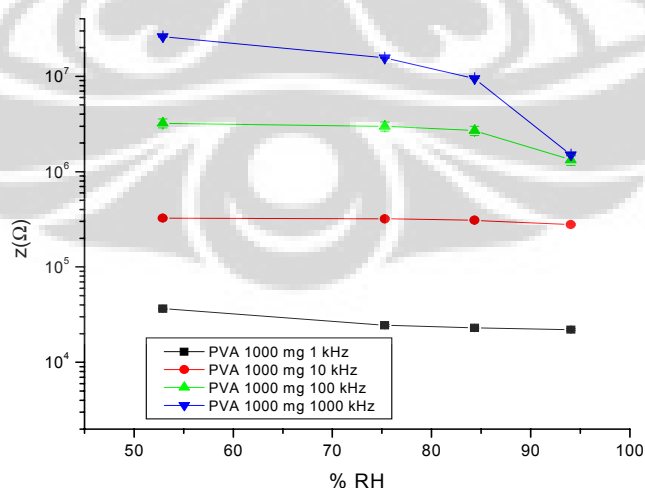


Gambar 4.19 Pengaruh perubahan RH dan ketebalan terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO₂ 192,30% (TiO₂ 2000 mg) diukur pada frekuensi 1 khz.

Pada RH rendah semua film menunjukkan sensitivitas RH yang kurang bagus. Namun pada daerah RH sedang dan tinggi film PVA-PEO satu lapis, film PVA-PEO-TiO₂ 28,85% (TiO₂ 300 mg), dan film PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (TiO₂1000 mg) satu lapis sama-sama memiliki sensitivitas RH yang baik. Bila dilihat dari gradien (kemiringan kurva), PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (TiO₂ 1000 mg) tampak lebih baik dengan rentang penurunan impedansi sampai 4 orde, seperti yang terlihat pada gambar 4.14. Ketebalan film berpengaruh pada penurunan impedansi dan dapat meningkatkan sensitivitas film. Sensitivitas kelembaban film komposit PVA-PEO-TiO₂ diharapkan dapat bermanfaat untuk aplikasi yang berkaitan dengan pengukuran kelembaban.

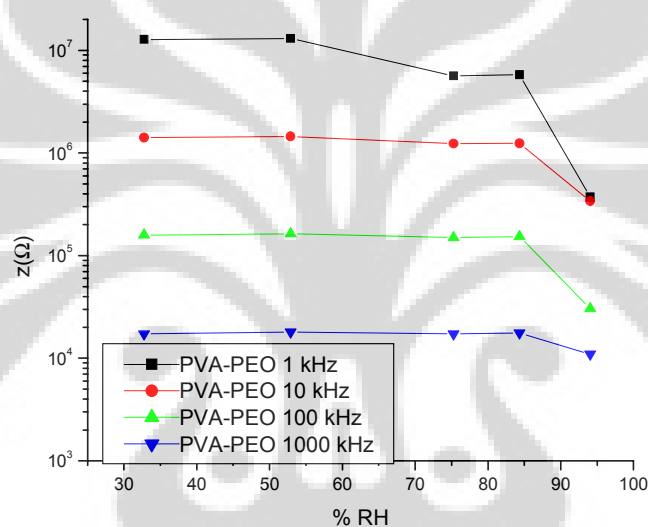
4.4.3 Pengaruh Frekuensi Ukur Terhadap Impedansi Film

Gambar 4.20 memperlihatkan pengaruh frekuensi ukur pada film PVA. Seiring dengan naiknya frekuensi, impedansi film turun. Sementara respon film terhadap perubahan RH hanya terlihat jelas untuk daerah dengan kelembaban tinggi khususnya pada frekuensi ukur 1 kHz. Namun film PVA tidak mampu merespon perubahan RH disebabkan resistivitas PVA yang tinggi. Penambahan TiO₂ ke dalam film diharapkan mampu menurunkan impedansi film PVA.



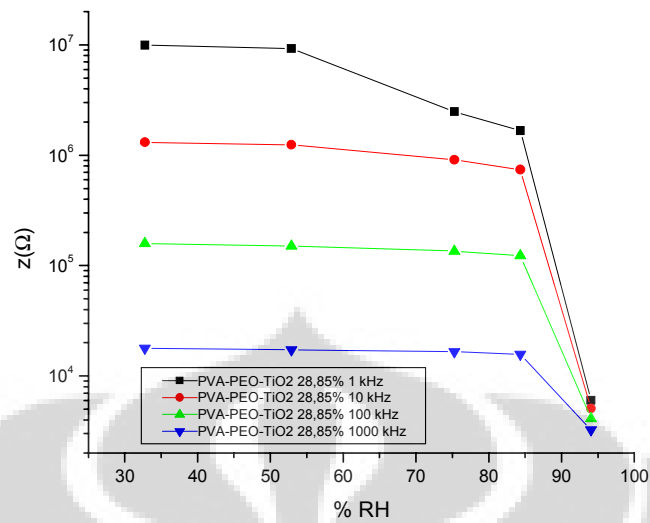
Gambar 4.20 Pengaruh perubahan RH terhadap impedansi film PVA untuk berbagai frekuensi ukur.

Gambar 4.21 memperlihatkan hasil karakterisasi sifat listrik untuk film komposit PVA-PEO pada saat tegangan input AC pada RCL meter 1 volt. Pada penelitian ini memang tegangan input AC dirancang sebesar 1 volt. Tampak respon film terhadap perubahan RH bertambah baik ditandai dengan semakin lebarnya daerah yang merespon perubahan RH terutama untuk frekuensi 1 kHz dan 10 kHz. Gambar 4.21 juga memperlihatkan bahwa titik saat film mulai merespon perubahan RH dengan bergeser ke daerah RH yang lebih rendah. Hal ini sejalan dengan hasil riset Dickey dan kawan-kawan pada film alumina [24].



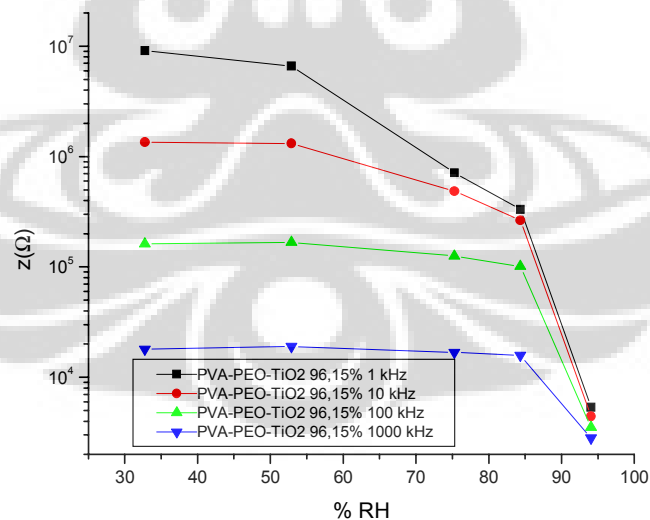
Gambar 4.21. Pengaruh perubahan RH terhadap impedansi film PVA-PEO untuk berbagai frekuensi ukur.

Pada film PVA-PEO sudah terjadi penurunan impedansi pada RH 53%. Pada RH diatas 84 dengan semua frekuensi ukur terjadi penurunan impedansi. Penurunan yang sangat tajam tetap pada frekuensi ukur 1 kHz. Penelitian yang sama terhadap film komposit PVA-PEO-TiO₂ 28,85%(TiO₂ 300 mg) memperlihatkan grafik seperti pada gambar 4.22.



Gambar 4.22 Pengaruh perubahan RH terhadap impedansi film PVA-PEO-TiO₂ 300mg (28,85%) pada berbagai frekuensi ukur

Hal serupa juga dijumpai pada film komposit PVA-PEO-TiO₂ 1000 mg (96,15%) bahkan dengan respon terhadap perubahan RH yang lebih baik dibandingkan dengan film komposit PVA-PEO-TiO₂ 300 mg (28,85 %) (gambar 4.23).

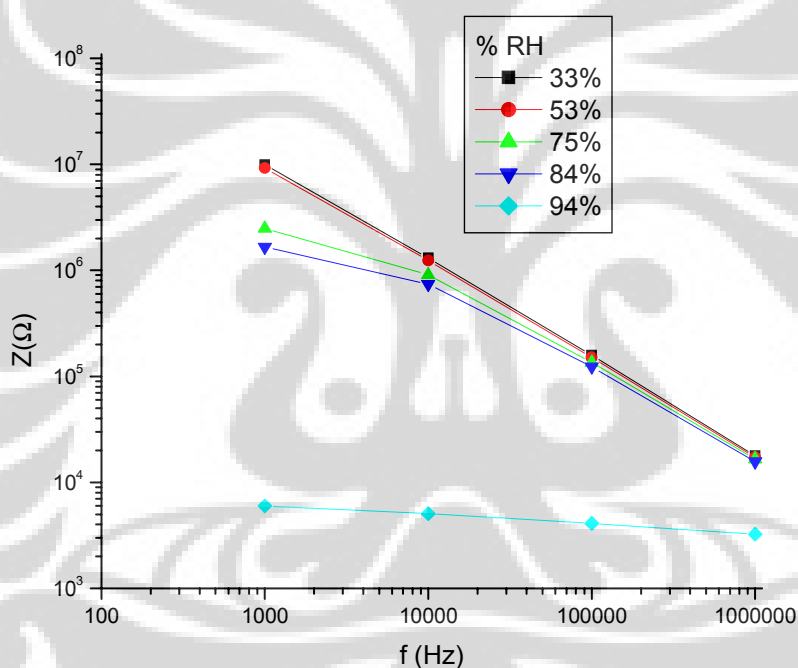


Gambar 4.23 Pengaruh perubahan RH terhadap film PVA-PEO-TiO₂ 96,15%(1000mg) untuk berbagai frekuensi ukur.

Pengaruh frekuensi ukur terhadap penurunan impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ tampak jelas pada daerah RH rendah. Semakin

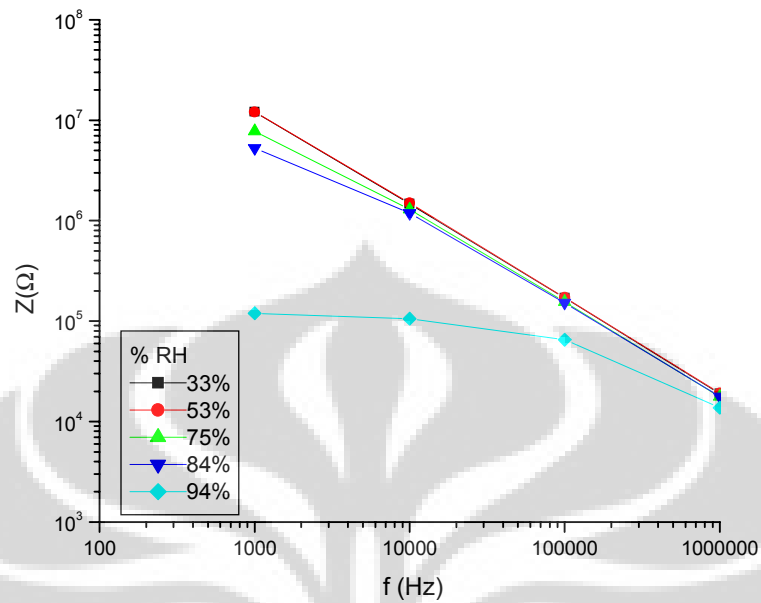
tinggi RH pengaruh frekuensi ukur semakin berkurang, namun sensitifitas film terlihat jelas pada RH tinggi .

Pengaruh frekuensi ukur terhadap impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ pada berbagai daerah RH juga diteliti dengan cara yang berbeda, yakni dengan melihat langsung hubungan antara perubahan frekuensi ukur dengan penurunan impedansi film untuk berbagai RH seperti diperlihatkan gambar 4.13. Tampak jelas bahwa impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ turun untuk setiap kenaikan frekuensi ukur. Tampak juga penurunan itu cukup tajam pada daerah RH rendah, namun tidak terlalu besar untuk daerah RH tinggi seperti telah disebutkan di atas.

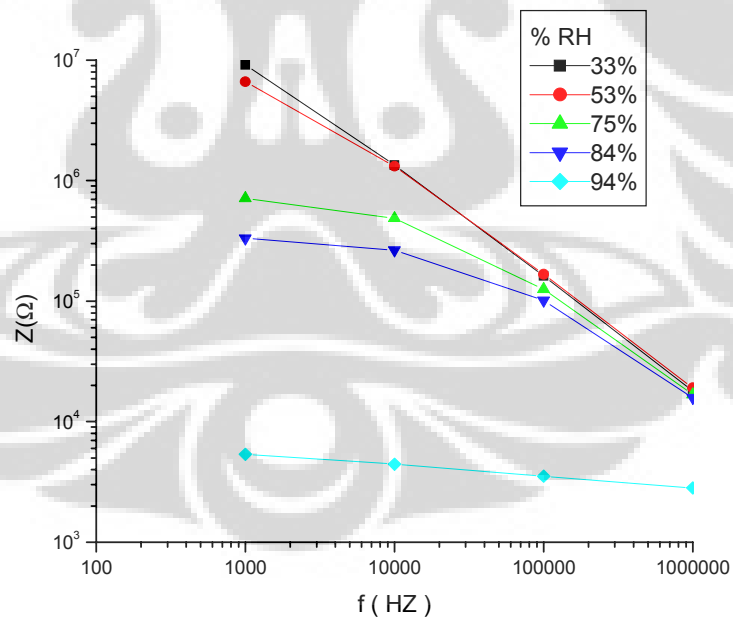


Gambar 4.24. Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA- PEO-TiO₂ 28,85% (300 mg) satu lapis pada berbagai RH

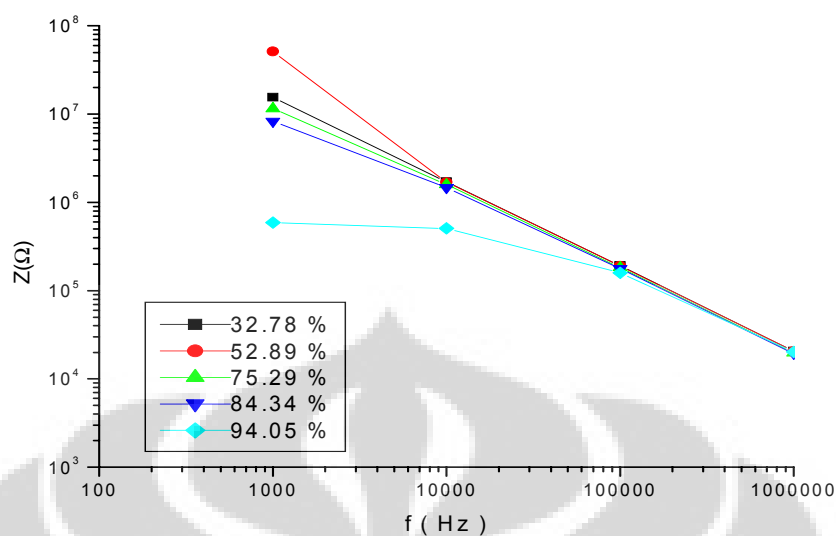
Kecenderungan ini tidak saja dijumpai pada film komposit PVA-PEO-TiO₂ akan tetapi juga pada semua film komposit yang diteliti. Melalui paparan di atas dapat disimpulkan bahwa frekuensi ukur 1 kHz memberikan sifat listrik dan sifat *sensing* yang paling baik dibandingkan frekuensi ukur yang lain.



Gambar 4.25 Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA- PEO-TiO₂ 28,85 % (300 mg) tiga lapis untuk berbagai RH

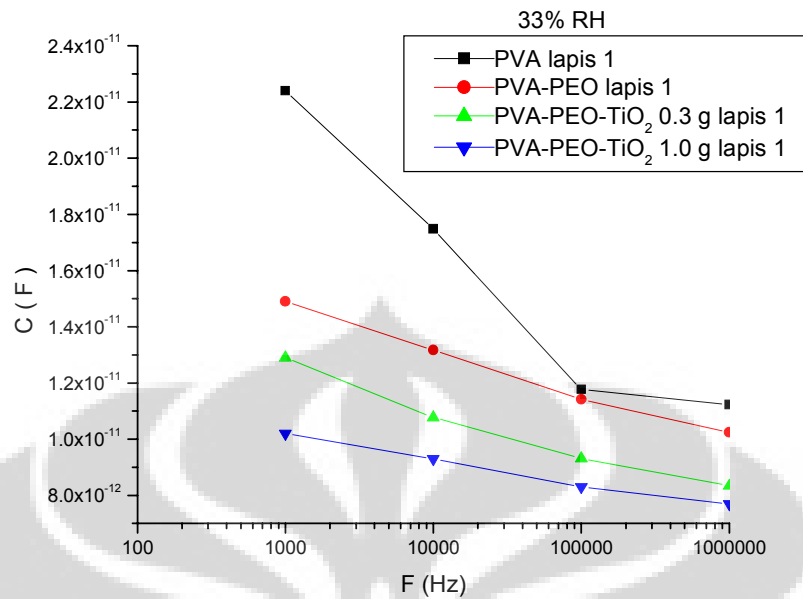


Gambar 4.26 Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15%(1000 mg) satu lapis untuk berbagai RH



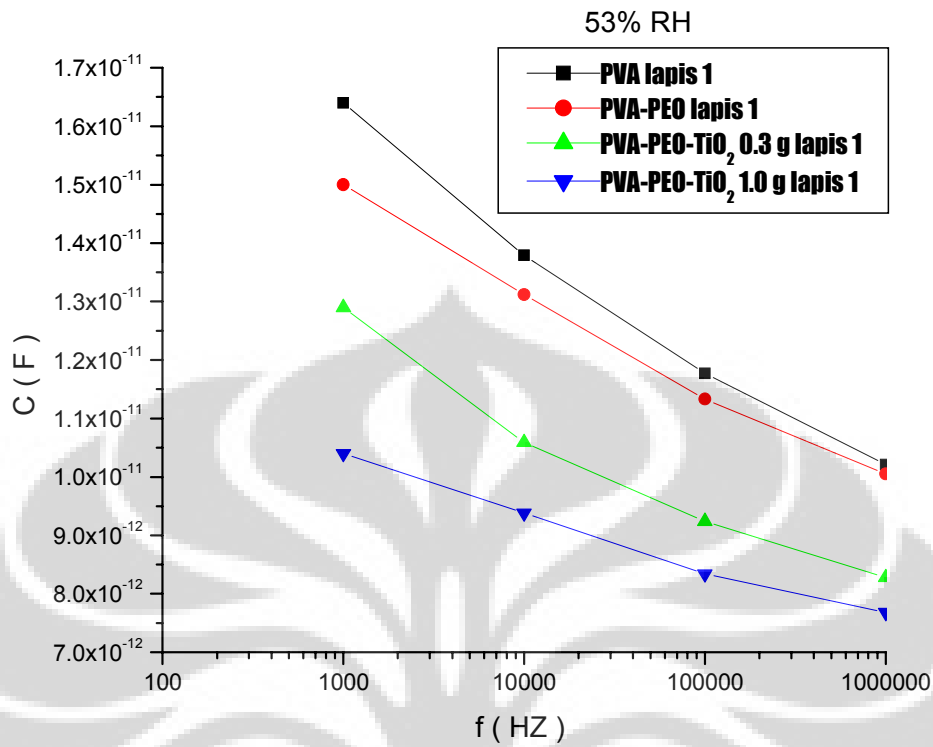
Gambar 4.27 Pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (1000 mg) tiga lapis untuk berbagai RH

Penelitian lebih lanjut tentang pengaruh frekuensi ukur pada sensitivitas kelembaban dan sifat sensing film komposit PVA-PEO-TiO₂ ini dilakukan dengan melihat hubungan antara kapasitansi (C) dan frekuensi ukur (f) dari film-film komposit di atas untuk berbagai daerah RH seperti diperlihatkan gambar 4.28 yang memperlihatkan hubungan antara frekuensi ukur dengan besar kapasitansi film untuk kelembaban 33%. Tampak dari gambar itu, besar kapasitansi film dipengaruhi oleh frekuensi ukur. Frekuensi 1 kHz menghasilkan nilai kapasitansi film yang optimum. Untuk semua film yang dieksperimenkan, terlihat bahwa semakin tinggi frekuensi ukur semakin rendah nilai kapasitansi filmnya. Kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (1000 mg) tampak paling baik dibandingkan kapasitansi film lainnya.

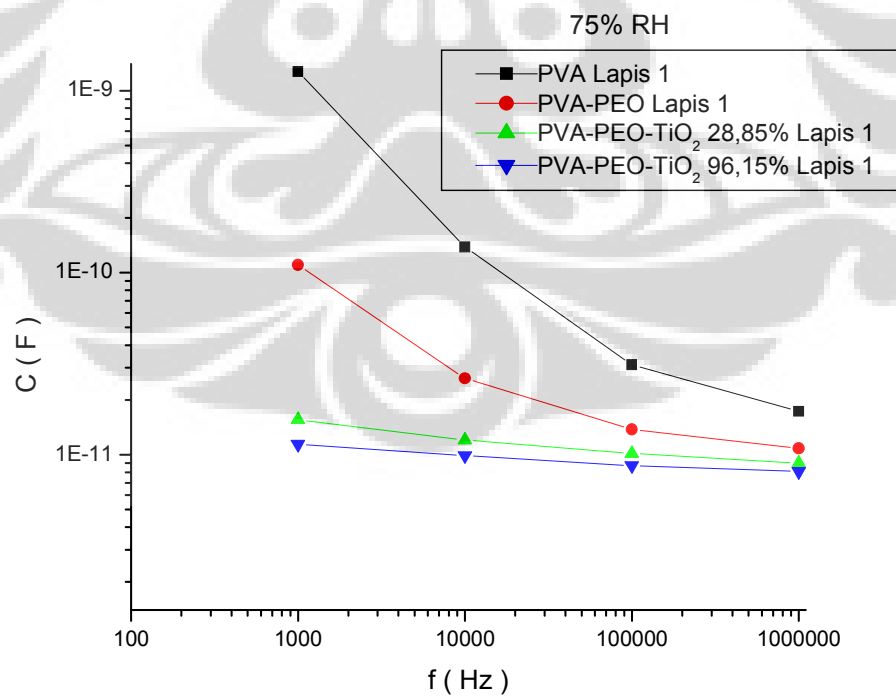


Gambar 4.28 Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 33% (PVA 1000 mg, PEO 40 mg)

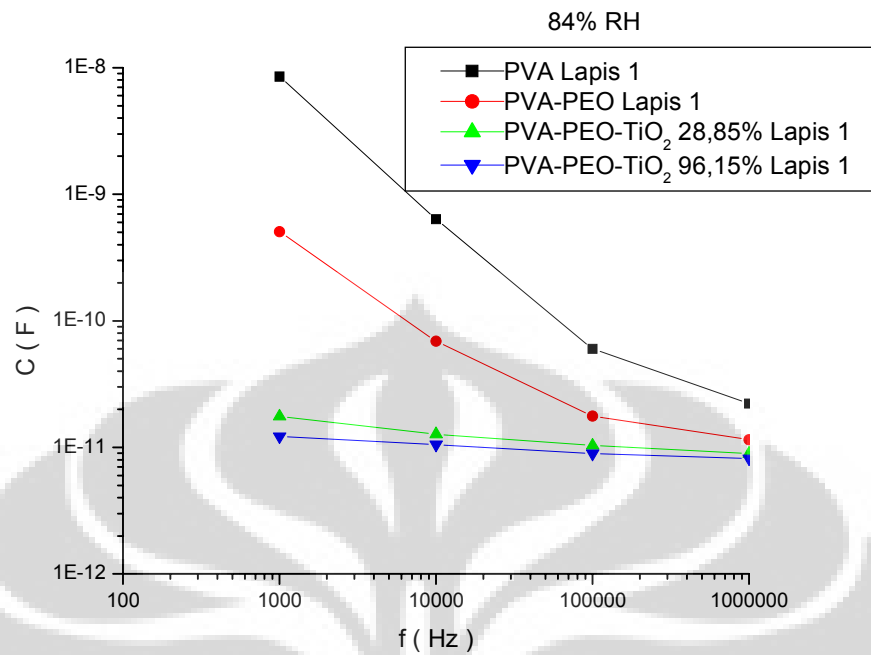
Karakterisasi yang sama dilakukan untuk kelembaban RH lainnya dengan urutan RH yang semakin tinggi. Hasilnya konsisten dengan gambar 4.28. Kapasitansi film PVA tetap paling besar, sedangkan kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (1000 mg) tetap paling kecil bila dibandingkan kapasitansi film lainnya, namun dengan besar kapasitansi yang lebih tinggi pada setiap kenaikan RH. Di bawah ini disajikan grafik hubungan antara frekuensi ukur dan kapasitansi film pada berbagai RH yang merupakan hasil karakterisasi tersebut.



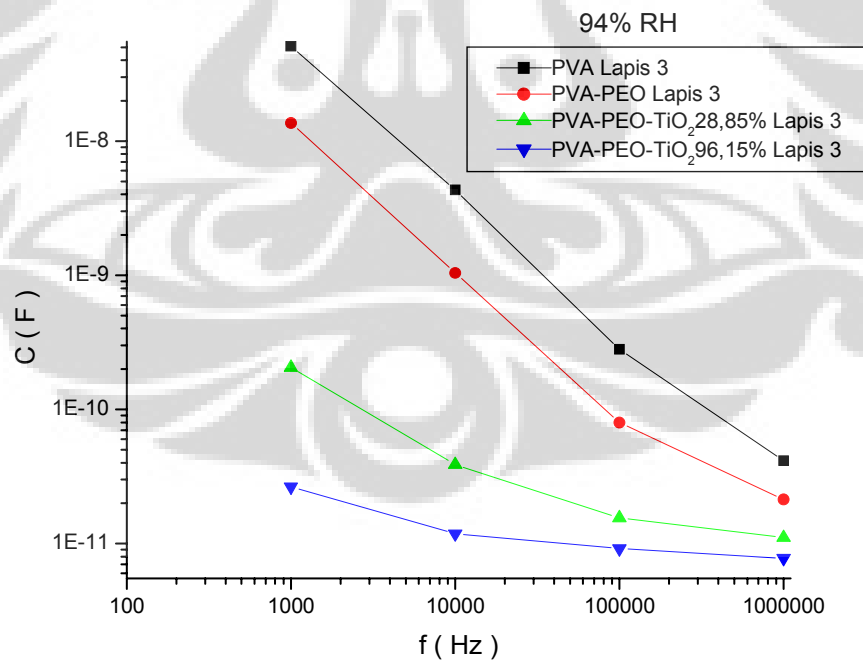
Gambar 4.29 Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 53 %



Gambar 4.30 Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 75%

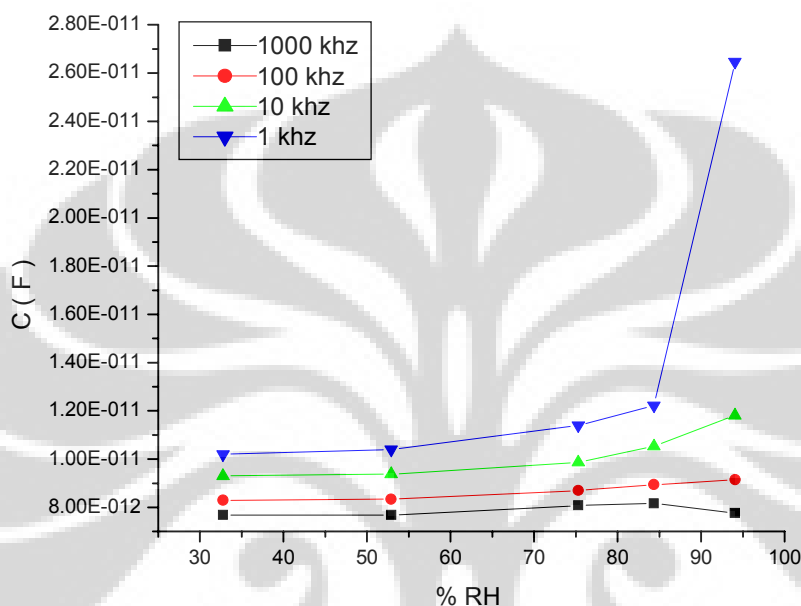


Gambar 4.31 Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 84%



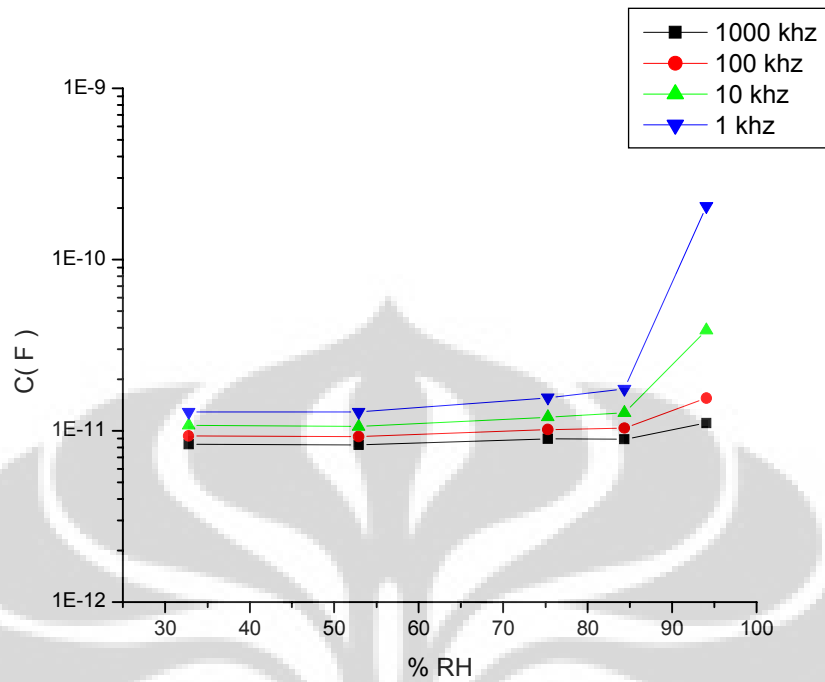
Gambar 4.32 Pengaruh frekuensi terhadap kapasitansi film pada RH 94%

Hal lain yang dapat disimpulkan adalah bahwa frekuensi 1 kHz tetap menghasilkan kapasitansi optimum untuk semua film komposit. Pada frekuensi ukur di atas 10 kHz perbedaan kapasitansi masing-masing film semakin menipis dengan kata lain frekuensi ukur di atas 10 kHz tidak terlalu berpengaruh terhadap kapasitansi film.

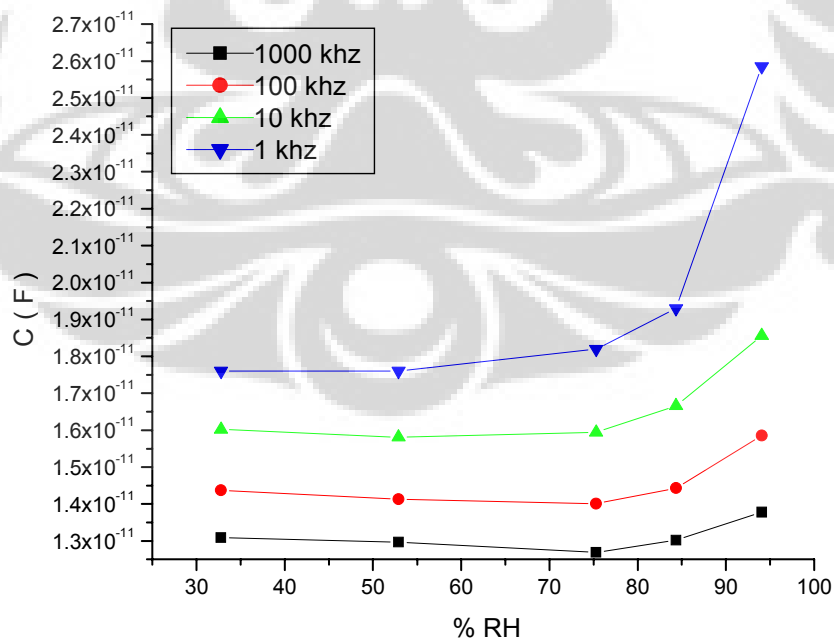


Gambar 4.33 Pengaruh RH terhadap kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 1000 mg satu lapis untuk berbagai frekuensi ukur.

Penelitian tentang pengaruh frekuensi ukur pada impedansi film dilanjutkan dengan meneliti hubungan antara perubahan RH dan besar kapasitansi film komposit untuk setiap frekuensi ukur. Untuk film komposit PVA-PEO-TiO₂ hasilnya ditunjukkan gambar 4.34. Tampak frekuensi ukur 1 kHz memberikan efek kenaikan kapasitansi yang paling baik dibandingkan dengan tiga frekuensi lainnya. Penelitian yang sama untuk dua film komposit lainnya juga mendapatkan hasil serupa seperti ditunjukkan oleh gambar 4.34 dan gambar 4.35.



Gambar 4.34 Pengaruh RH terhadap kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 28,85 % (300 mg) satu lapis untuk berbagai frekuensi ukur.

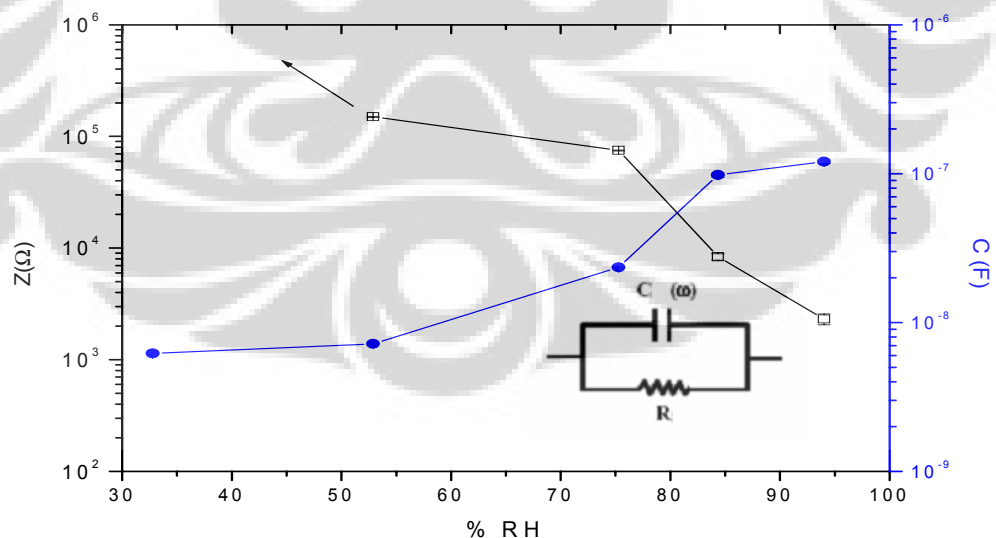


Gambar 4.35 Pengaruh RH terhadap kapasitansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 192,31% (2000 mg) satu lapis untuk berbagai frekuensi ukur.

Terlihat semakin tinggi RH semakin tinggi kapasitansi film. Hal ini berarti disamping dipengaruhi oleh frekuensi, kapasitansi juga dipengaruhi oleh besar RH.

4.4.4. Model Rangkaian Ekuivalensi Impedansi Film

Keterbatasan kemampuan RCL meter yang digunakan hanya memungkinkan menampilkan satu rangkaian ekuivalen yang sesuai dengan data eksperimen [28]. Hal ini berlaku untuk semua karakterisasi listrik yang dilakukan dalam penelitian. Rangkaian ekuivalen data diperlihatkan gambar 4.36. Rangkaian ekuivalen terdiri dari hambatan resistif R dan kapasitansi C yang tersusun paralel. Dari Gambar 4.24 dapat disimpulkan bahwa perubahan impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ bergantung pada perubahan resistif R dan atau perubahan kapasitansi C film tersebut. Saat terjadi kenaikan RH, resistif R film akan turun sementara kapasitansi C film akan naik. Tampak kenaikan kapasitansi C film komposit PVA-PEO-TiO₂ lebih terlihat pada daerah RH sedang dan tinggi.



Gambar 4.36 Pengaruh RH terhadap resistansi R dan kapasitansi C film komposit

PVA-PEO-TiO₂ untuk frekuensi triger 1 kHz.
Keterbatasan kemampuan RCL hanya memungkinkan ditampilkannya satu rangkaian tunggal (insert).

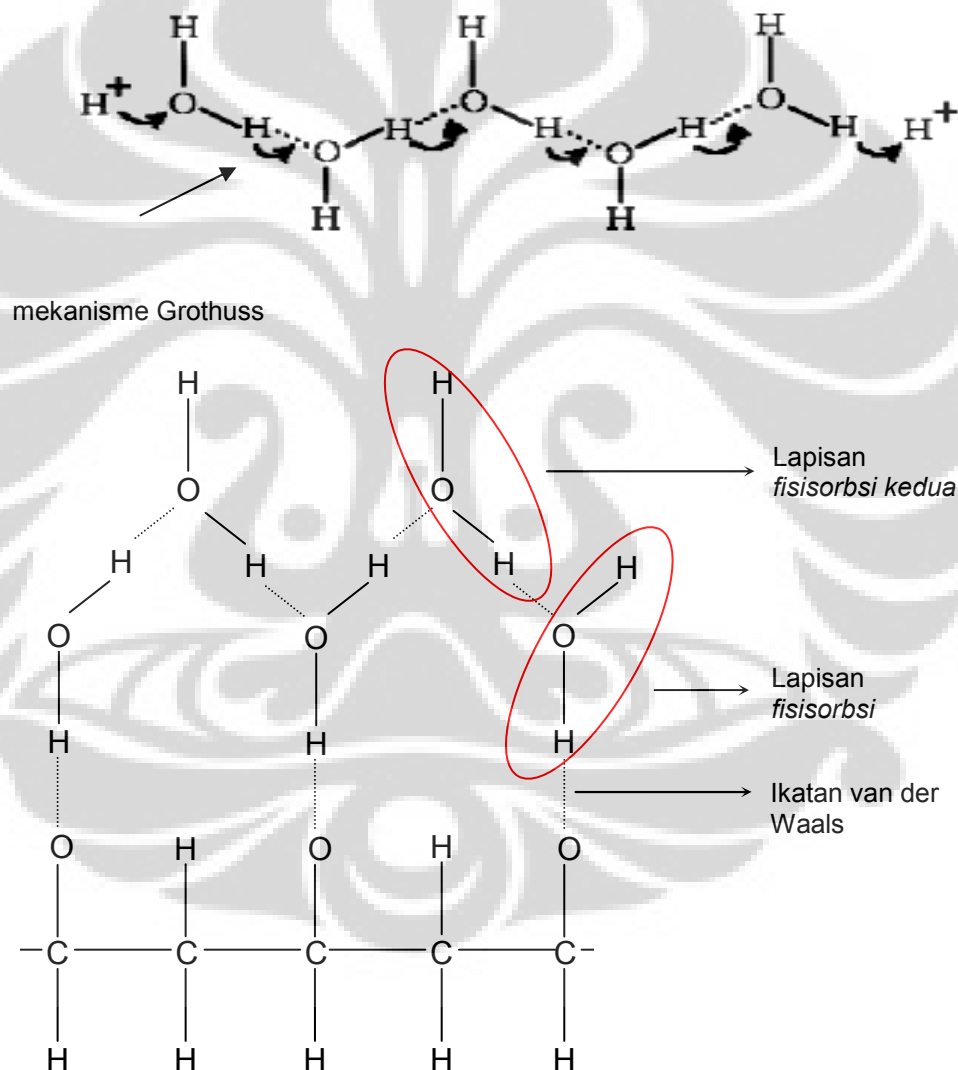
Dari model rangkaian ekuivalen ini, dapat disimpulkan bahwa penurunan impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ terjadi karena penurunan hambatan resistif R dan reaktansi kapasitansi X_c film, seiring dengan RH yang bertambah tinggi. Kesimpulan ini dapat dijadikan dasar untuk menjelaskan sifat *sensing* film

Pada daerah RH rendah kenaikan kapasitansi C tidak begitu tajam sementara resistansi R pada daerah RH di bawah 50% sangat besar sehingga tidak dapat diukur oleh RCL meter. Sementara penurunan nilai R pada daerah RH tinggi sangat tajam. Gambar 4.36 diolah berdasarkan data hasil pengukuran RCL meter, begitu pula impedansi film PVA-PEO-TiO₂.

Sebagaimana diuraikan di atas bahwa penambahan TiO₂ dapat menurunkan impedansi film PVA sehingga sifat listrik film komposit PVA-PEO-TiO₂ menjadi lebih baik bila dibandingkan dengan film PVA. Pada daerah RH rendah penurunan impedansi tampak tidak terlalu besar, namun semakin tinggi RH penurunan impedansi film semakin tajam. Pada saat ini frekuensi triger dibuat tetap 1 kHz sehingga penurunan impedansi atau peningkatan konduktivitas film ditentukan oleh jumlah molekul air yang menempel (adsorpsi) pada permukaan PVA maupun logam oksida. Pada RH rendah, hanya sedikit molekul air yang menempel sehingga penurunan impedansi tak terlalu besar. Namun semakin tinggi RH semakin banyak molekul air yang menempel. Akibatnya penurunan impedansi film semakin tajam. Proses adsorpsi pada PVA dimungkinkan karena sifat PVA yang hidrofilik [10]. Molekul air (H₂O) adalah molekul polar [22]. Pada saat RH naik banyak molekul air yang ditangkap oleh PVA melalui pembentukan ikatan hidrogen antara ion H⁺ molekul air dengan gugus OH pada rantai PVA. Semakin banyak air yang ditangkap semakin banyak pula ion H⁺ yang terbentuk. Karena ukurannya yang kecil, ion H⁺ memiliki mobilitas yang tinggi sehingga dapat menurunkan impedansi film secara drastis pada saat RH tinggi.

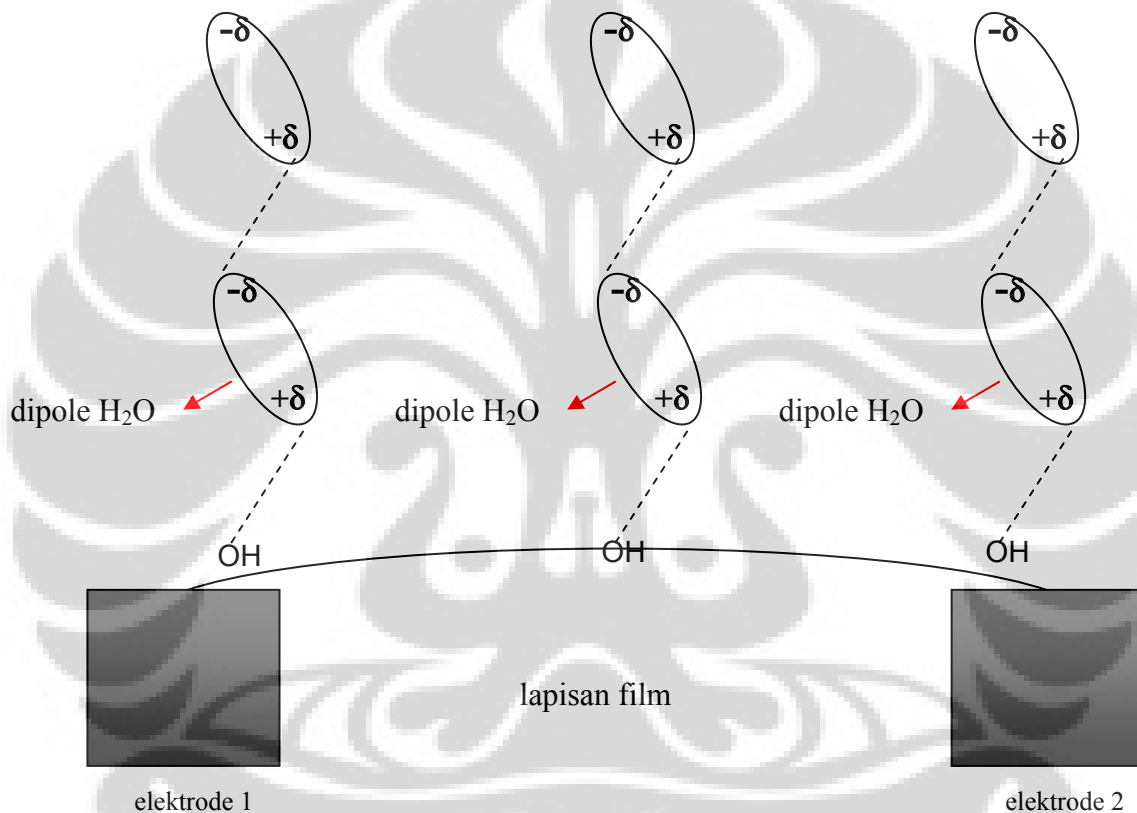
Proses adsorpsi molekul air pada permukaan PVA dapat dimodelkan berdasarkan Gambar 4.37. Proses penyerapan air pada PVA, seperti telah dikatakan di atas, dimungkinkan karena keberadaan gugus

OH pada rantai molekul PVA yang mampu menangkap molekul H_2O melalui ikatan hidrogen membentuk lapisan fisisorpsi pertama molekul air. Adsorpsi H_2O selanjutnya membentuk lapisan fisisorpsi kedua molekul air. Penyerapan molekul H_2O berikutnya akan membentuk lapisan fisisorpsi ketiga dan seterusnya. Proton atau ion H^+ pada lapisan kedua ke atas bersifat mobil karena dapat melompat (*hopping*) dari satu molekul H_2O ke molekul H_2O tetangganya begitu seterusnya sehingga mekanisme Grothuss pun terjadi (Gambar 4.37)



Gambar 4.37 Pemodelan penangkapan molekul H_2O oleh molekul PVA dan mekanisme Grothuss

Pemberian medan listrik luar (beda potensial) akan mengarahkan gerakan ion H^+ ke elektrode negatif rangkaian. Mobilitas ion ini menimbulkan aliran muatan yang mampu menurunkan impedansi PVA. Sementara itu molekul H_2O yang jelas lebih berat dari ion H^+ tidak ikut bergerak, namun karena sifatnya yang bipolar memungkinkan air untuk bergerak di tempat mencoba menyejajarkan dipol-dipolnya sesuai dengan medan listrik luar (Gambar 4.38).



Gambar 4.38 Penangkapan molekul H_2O oleh gugus OH molekul PVA tanpa medan listrik luar

Pemberian tegangan searah pada film membuat penyejajaran (*alignment*) dipolnya terbatas ke satu arah saja sesuai dengan kutub-kutub elektrode searah. Hal ini membuat kontribusinya bagi penurunan impedansi hanya sesaat, sebab kemudian impedansi akan naik lagi persis setelah upaya pensejajaran dipol H_2O mencapai batas optimumnya. Hal ini dibuktikan dari pengukuran resistif R_{dc} film komposit PVA-PEO- TiO_2 saat

karakterisasi yang meningkat dalam selang waktu beberapa detik. Pemberian tegangan input berupa tegangan bolak-balik akan membuat proses penyejajaran dipol-dipol H₂O berlangsung terus menerus dengan arah putaran bolak balik secara periodik. Hal ini akan menyebabkan kenaikan konstanta dielektrik film yang berarti penurunan impedansi film karena kenaikan konstanta dielektrik film akan menaikkan nilai kapasitansi C film sebagaimana telah dijelaskan di atas.

Penambahan TiO₂ pada PVA dalam bentuk film komposit PVA-PEO-TiO₂ terbukti dapat membuat penurunan impedansi film lebih baik. Menurut Varghese dan Grimes, kemampuan logam oksida untuk *mengindera* kelembaban berdasarkan pada konduktivitas ionik. Keberadaan molekul air yang teradsorpsi pada permukaannya dapat menurunkan impedansi total film karena meningkatnya konduktivitas ionik dan meningkatnya kapasitansi film karena konstanta dielektrik air yang tinggi [24]. Mekanisme konduksi pada logam oksida sebagaimana dijelaskan oleh Chen dan Lu dimulai dengan terbentuknya lapisan kemisorpsi gugus hidroksil (OH) karena adsorpsi molekul air pada permukaan logam oksida. Adsorpsi molekul air selanjutnya membentuk lapisan fisorpsi pertama melalui ikatan hidrogen antara satu molekul air dengan dua gugus hidroksil terdekat. Pada lapisan fisorpsi pertama ini molekul air tidak dapat bebas bergerak karena terikat oleh gaya listrik dengan dua gugus hidroksil tadi. Lapisan ini tidak mobil juga disebabkan tidak adanya ikatan hidrogen antara molekul air yang satu dengan molekul air lain [14]. Proton hanya dapat berpindah dari gugus hidroksil ke molekul air membentuk ion H₃O⁺. Semakin tinggi RH, semakin banyak molekul air yang teradsorpsi pada permukaan logam oksida dan membentuk lapisan fisorpsi kedua di atas lapisan fisorpsi pertama dimana satu molekul air berikatan hidrogen dengan satu gugus hidroksil dan proton dapat melompat (*hopping*) di antara dua molekul air terdekat yang satu ke molekul air terdekat pada lapisan molekul air yang kontinu. Proses konduksinya persis seperti konduksi pada air murni dan disebut mekanisme Grothuss (Gambar 4.37). Jadi pada RH tinggi, pembawa

muatan listrik adalah ion H^+ atau proton [23]. Meningkatnya konduktivitas ionik ini juga diiringi oleh meningkatnya kapasitansi film karena faktor dielektrik. Penjelasannya mirip seperti adsorpsi pada permukaan PVA di atas. Pada lapisan fisisorpsi pertama molekul air mengadakan ikatan hidrogen ganda dengan dua gugus hidroksil yang membuatnya sulit berotasi. Sebaliknya pada lapisan fisisorpsi kedua, molekul air berikatan hidrogen dengan satu gugus hidroksil yang membuatnya lebih mudah berotasi. Hal ini akan meningkatkan konstanta dielektrik sebab hal ini memungkinkan bagi molekul air untuk membentuk dipol dan mengarahkannya sesuai dengan medan listrik luar [24]. Jadi, peningkatan konduktivitas dan konstanta dielektrik ini menyebabkan impedansi total film komposit PVA-PEO-TiO₂ turun tajam khususnya pada daerah RH tinggi seperti telah dipaparkan pada bagian 4.3.

Mekanisme Grothuss tidak dapat dipastikan keberadaannya pada pemberian tegangan AC karena konduksi ion H^+ tersamar oleh penurunan impedansi akibat faktor frekuensi ukur dan atau dielektrik material *sensing* film. Mekanisme Grothuss yang terjadi karena eksese proton ini dapat dibuktikan lewat pemberian tegangan DC pada elektrode film.

Pada uraian sebelumnya juga terlihat bahwa perubahan impedansi film komposit PVA-PEO-TiO₂ juga dipengaruhi oleh konsentrasi massa TiO₂. Tampak pengaruh konsentrasi massa pada film PVA-PEO-TiO₂ dan PVA-TiO₂ memiliki kemiripan, yakni penambahan massa logam oksida dari 300 mg sampai dengan 1000 mg, impedansi film terus mengalami penurunan.

Seperti telah dijelaskan tadi perubahan frekuensi ukur menyebabkan perubahan impedansi film, khususnya pada daerah RH rendah. Pada daerah RH tinggi pengaruh perubahan frekuensi tidak setajam perubahan impedansi film pada frekuensi rendah. Hal ini disebabkan karena impedansi film merupakan fungsi reaktansi (X_c) dan besar reaktansi sendiri berbanding terbalik dengan frekuensi (f) dan kapasitansi film (C). Semakin tinggi RH berarti semakin banyak molekul air yang diserap material *sensing* film dan akan memperbesar kapasitansi

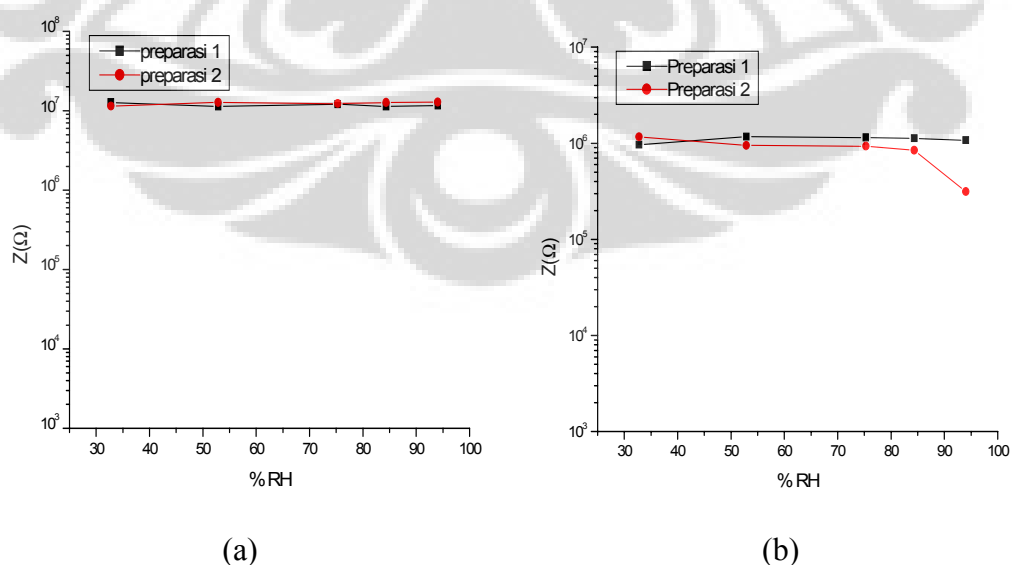
(C) film melalui kenaikan konstanta dielektriknya. Akibatnya reaktansi film turun, begitu juga impedansinya. Jadi pada daerah RH tinggi ada dua faktor yang membuat impedansi film turun, yaitu kenaikan frekuensi dan kenaikan kapasitansi film. Itu sebabnya, pada titik-titik yang sama pada daerah RH tinggi, penurunan impedansi akan lebih tajam bila frekuensinya lebih kecil. Hal ini menjawab mengapa titik di mana film mulai merespon perubahan RH bergeser ke daerah dengan nilai RH yang lebih rendah.

4.5 Reprodusibilitas Fabrikasi dan Stabilitas Impedansi Film Komposit PVA-PEO-TiO₂

Reprodusibilitas fabrikasi adalah hasil pengulangan pembuatan film yang memiliki nilai impedansi identik pada RH yang sama. Reprodusibilitas fabrikasi dibutuhkan agar ada jaminan bahwa film yang dibuat itu memiliki komposisi, struktur, dan ketebalan yang identik.

4.5.1 Reprodusibilitas fabrikasi film

Saat dua kali fabrikasi film komposit PVA-PEO-TiO₂ 28,85 % (300 mg) dan film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15 % (1000 mg) diperoleh grafik reprodusibilitas fabrikasi yang cukup baik seperti disajikan pada gambar 4.39.

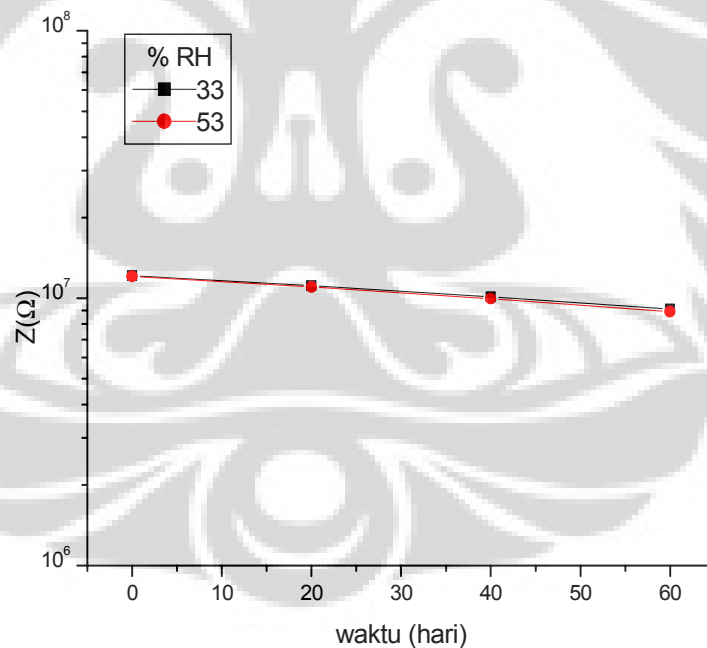


Gambar 4.39 Reprodusibilitas fabrikasi film komposit (a) PVA- PEO-TiO₂ 28,85% (TiO₂ 300mg), (b) PVA-PEO-TiO₂ 96,15%(TiO₂ 1000 mg)

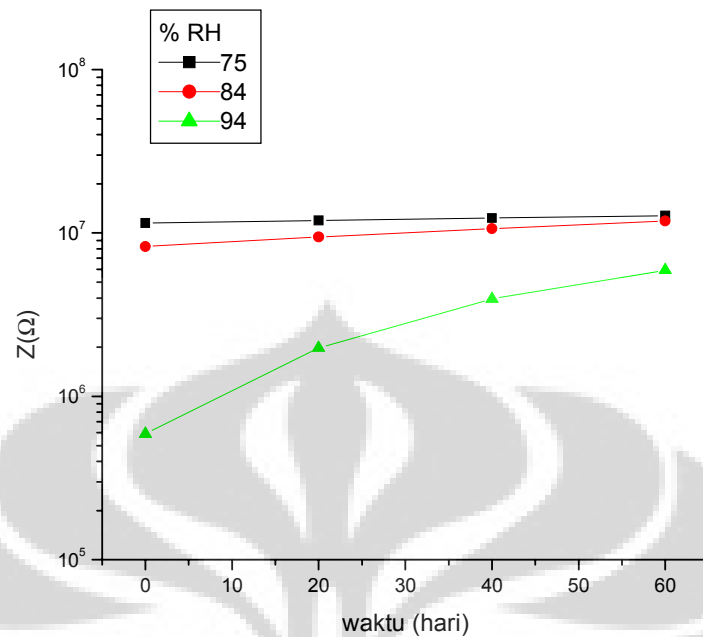
Pergeseran nilai impedansi maksimum untuk dua kali fabrikasi ini tidak sampai mencapai 1 orde hal ini pembuatan film bisa dikatakan identik. Hasil ini tidak terlalu mengherankan bila dikaitkan dengan foto SEM, terutama untuk film komposit PVA-PEO-TiO₂, butiran TiO₂ menyebar merata di atas metrik PVA akan lebih mudah mengulanginya pada setiap fabrikasi yang dilakukan.

4.5.2 Stabilitas impedansi film

Stabilitas impedansi film adalah hasil pengulangan pengukuran impedansi film selama jangka waktu tertentu pada RH yang sama. Tujuan pengukuran impedansi ini adalah untuk melihat efek penuaan (umur) film. Diharapkan pengukuran impedansi yang berulang menghasilkan nilai impedansi yang identik yang berarti stabilitas film baik atau tidak terjadi efek penuaan.



Gambar 4.40 Stabilitas film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (TiO₂ 1000 mg) dengan frekuensi ukur 1 kHz pada RH rendah



Gambar 4.41 Stabilitas film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15% (TiO₂ 1000 mg) pada frekuensi ukur 1 kHz pada RH sedang dan RH tinggi

Eksperimen dilakukan terhadap film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15 % (TiO₂ 1000 mg) satu lapis pada RH rendah dan PVA-PEO-TiO₂ 96,15 % (TiO₂ 1000 mg) satu lapis pada frekuensi triger 1 kHz pada RH tinggi dalam rentang waktu 60 hari. Hasilnya diperlihatkan gambar 4.41 dan gambar 4.42. Terlihat stabilitas film cukup baik. Pada RH rendah dan RH sedang (RH 33 % - 75 %) tidak terjadi penyimpangan grafik datar terutama untuk frekuensi ukur 1 kHz sedangkan pada RH tinggi (RH 84 % dan 94 %) terjadi penyimpangan kurang dari 1 orde ini dapat disimpulkan film komposit PVA-PEO-TiO₂ 96,15 % (TiO₂ 1000 mg) relatif stabil pada RH rendah, RH sedang dan RH tinggi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan Bab 4 dapat diambil kesimpulan bahwa film komposit PVA-PEO-TiO₂ sensitif terhadap kelembaban. Penambahan PEO 40 mg dapat meningkatkan nilai fraksi gel, menurunkan tingkat swelling dan meningkatkan kestabilan film PVA-PEO-TiO₂ selama efek penuaan ini sebabkan terjadinya IPN antara PVA dengan PEO. Sifat sensitif kelembaban film komposit PVA-PEO-TiO₂ dipengaruhi oleh frekuensi ukur. Frekuensi ukur 1 kHz dan massa modifikator TiO₂ 1000 mg atau 96 % relatif terhadap massa PVA dan PEO, menghasilkan sifat listrik dan daya *sensing* yang baik untuk film komposit PVA-PEO-TiO₂ dengan penurunan nilai impedansi sebesar empat orde. Secara umum ketebalan berpengaruh terhadap penurunan impedansi film PVA dan PVA-PEO dengan ketebalan tiga lapis memiliki sifat listrik dan sensitivitas yang baik sedangkan film komposit PVA-PEO-TiO₂ memiliki sifat listrik dan sensitivitas yang baik dengan ketebalan satu lapis.

Sifat *sensing* film komposit PVA-PEO-TiO₂ merupakan gabungan dari sifat *sensing* PVA dan TiO₂. Sifat *sensing* PVA dimungkinkan karena sifatnya yang hidrofilik. Gugus OH pada rantai molekul PVA dapat menangkap molekul air yang bipolar melalui ikatan hidrogen (ikatan van der Waals) dan membentuk lapisan-lapisan fisisorpsi yang memungkinkan ion-ion H⁺ *hopping* melalui lapisan-lapisan tersebut. Sifat *sensing* TiO₂ dilandasi kemampuannya melakukan chemisorpsi dan fisisorpsi yang memungkinkan terjadinya mobilitas ion-ion H⁺ pada lapisan fisisorpsi kedua dan seterusnya seperti mekanisme pada PVA. Reprodusibilitas fabrikasi film komposit PVA-PEO-TiO₂ cukup baik dengan besar penyimpangan kurang dari 1 orde pada kelembaban tinggi.

Stabilitas film komposit PVA-PEO-TiO₂ dalam rentang waktu 60 hari pada RH rendah dan sedang tidak terjadi penyimpangan yang berarti, sedangkan pada RH tinggi terjadi penyimpangan kurang dari satu orde. Hal ini berarti film komposit PVA-PEO-TiO₂ relatif stabil hal ini sesuai dengan uji sifat mekanis.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah tentang karakterisasi struktur dan karakterisasi listrik. Karakterisasi struktur perlu ditambah dengan uji XRD untuk

film komposit sehingga lebih bisa dipastikan struktur kristal pada film komposit PVA-PEO-TiO₂ ,sedangkan untuk karakterisasi listrik dilakukan pengukuran sifat kelistrikan dari % RH tinggi ke rendah ,yang akan membantu menjelaskan sifat sensing, reproduksibilitas fabrikasi dan stabilitas film.



DAFTAR ACUAN

- [1] Bayhan ,M.Kavasoglu,N.,” A Study on the Humidity Sensing Properties of ZnCr₂O₄-K₂CrO₄ Ionic Conductive Ceramic Sensor”, Sensor And Actuators B-114 (2006) 768-773.
- [2] Dena Wulandari,Cuk Imawan,Yanti Sabarinah S, “Preparasi dan karakterisasi film Komposit PVA-TiO₂ sebagai material Sensor RH”,Departemen Fisika –FMIPA – Universitas Indonesia ,Depok,2005.
- [3] E. Trasversa, ceramic sensor for humidity detections,the state of the art and future develoments,Sensor And Actuator B-23,1995,pp. 135-156.
- [4] Giampiero Montes perelli,Antonio Pumo,Enrico Travessa, Giuatltiero Gusmano,Andrea Bearzotti, Angelo Montenero,Guelielmina Gnappi,” Sol-gel Processed TiO₂ Based Thin films as innovative Humidity Sensors”,Sensors And Actuator B-24-25(1995) 705-709.
- [5] Goepel,W.(Editor),”Sensors, a comprehensive survey,Vol.3 Chemical and Biochemical sensor part II “ ,HVC, Wienheim,Germany,1992.
- [6] N. Yamazue and Y Shimizu,” Humidity Sensors : Principles and Applications”,Sensors And Actuators,volume 10,1986,pp.379-398
- [7] Pi-Guey Su, Chao-Jen Ho, Yi-Lu Sun,I-Cherg Chen, “ A micromachined Resistive Type Humidity Sensor With a Composite Material as Sensitive Film “Sensor And Actuator B-113(2006) 837-842.
- [8] Narshima Partikar,Shilpa Jain,Syed Khasim,M.Revansiddappa,S. V.Bhoraksar,M. V.N. Ambika Prasad,” Electrical And Humidity Sensing Propertiesnof Polyaniline /WO₃ Composite” ,Sensor And Actuator B-1147(2006)599-603.
- [9] Zhi Chen dan Chi Lu ,”Humidity Sensor :A Review of Material and Mechanisme” Sensor Letters Vol.3, 274-295,American Scientific Publishers 2005.
- [10] F.C.Quinn,”The most common problem of Mouisture /Humidity Measurement and Control “Proc.of 1985 International Symposium on Mouistrure and Humidity,April 1985,Washinton DC,pp 1-5
- [11] Gaiwad,Parikshit,Chemically Deposited Optical Fiber Humidity Sensor “ A Thesis Submitted to the Faculty of in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of master of science in Electrical Engineeringin the Departemen of Electrical and computer Engineering, Mississippi State University,Mississippi State,USA 2003.

- [12] Cuk Imawan ,Afdal M, ” Film Polivinil Alkohol yang didoping dengan NaCl Sebagai Sensor Kelembaban Relatif, Prosiding Ketingan Physics Forum 3th 24 September 2005
- [13] Yang Mu-Rong ,Chen Ko_Shao ,” Humidity sensors using polypinil alcohol mixed With elektrolites “ ,Sensor and actuator B,49 1998,240-247.
- [14] R.P Tandon ,M,R Tripathy,A,K Arora Surat Hotchandan “ Gas and humadity response of iron Oxide –Polipyrole nano composite “Sensor And Actuators B-117 (2006) 261-265
- [15] Bozhi Yang ,Burak aksak ,Qiao Lin ,Metin Sitti ,”Compliant and Low Cost Humidity Nanosensors Using Nanoporous Polymer Membrans” ,Sensors And Actuator B-114(2006)
- [16] Y .Sakai ,Y Sadaoka ,M.Matsuguchi ,”Humidity Sensors Based on Polymer Thin Film “ ,Sensors and Actuators B,35-36 ,1996,85-90
- [17] Callister,W.D, ”Material Science and Engineering:An Introduction “ ,5th edition ,John Wiley ,USA,1999
- [18] Clark ,Jim, “Intermolecular Bonding–Hydrogen Bond “,http/www.chemguide.co.uk
- [19] Wulandari Dena ,Preparasi dan Karakterisasi Film Komposit PVA-TiO₂ Sebagai Sensor Kelembaban ,Tesis Pascasarjana UI,2006.
- [20] Gunawan Setia ,Studi Sifat Sensitif Kelembaban Film Komposit Polivinil Alkohol Dan Metal Oksida,Tesis Pascasarjana UI, 2007
- [21] Oomman K.Varghese and Craig A.Grimes” Metal Oxide Nanoarchitectures for Environmental Sensing”, Departement of Electrical Engineering and Material Research Institute,217 Material Research Laboratory,Pensylvania State University,UniversityPark,USA.
- [22] Suzuki Masahiro,Takahide Yoshida “ Proton conduction in new polymer hydrogel films consisting of crosslinking partially phosphorylated poly(vinyl alcohol)s”,Departement of Functional Polymer Science, Faculty of Textile Science and Technology ,Shinshu University,Ueda,Nagano 386-8567,Japan ,1999.
- [23] Andrew R.K ,Ralston “Comparative performance of linear,cross-linked,and plasma deposited PMMA capacitive humidity sensors”,Departement of Electrical and Computer Engineering,Materials Science Program,and Engineering Research Center for Plasma Aided Manufacturing,University of Wisconsin-Madison ,USA ,1994.

- [24] Agmon Noam, "The Grotthuss mechanism" Department of Physical Chemistry and the Fritz haber Research Center, The Hebrew University, Jerusalem 91904, Israel, 1995.
- [25] Yanti S. Soebianto, Ambyah Suliwarno "Karakteristik Pencangkakan Asam Akrilat dan Akrilamida Pada Serbuk Selulosa Dengan Inisiasi Pada Gamma" Puslitbang Teknologi Isotop dan Radiasi (P3TIR) – BATAN, Indonesia.
- [26] Lapid Hadas, Agmon Noam "A bond-order analysis of the mechanisms for hydrated proton mobility in liquid water" Department of Physical Chemistry and the Fritz Haber Research Center, The Hebrew University, Jerusalem 91904, Israel
- [27] Kvist, L., Bertilsson, H., Meuller, P. "Poly(Styrene-g-Ethylene Oxide) Copolymers as interfacial Agents in Immiscible Polymer Blends", The Swedish Institute of Production Engineering Research S-431 53 Molndal, Department of Polymeric Materials Chalmers University Of Technology S-412 Goteborg, Sweden.
- [28] Paul Calvert and Zengshe Liu "Electrically Stimulated Bilayer Hydrogel As Muscles", Departemen of Material Science and Engineering University of Arizona, Tucson, Az 85721
- [29] Junyan Gong, Lim bao Luo, "Synthesis of copper/cross-linked poly(vinyl alcohol) (PVA) nanocables via a simple hydrothermal route. school of chemistry and materials University of Science and technology of China, Hefei, 230026. P.R China
- [30] Holilah Siti, Studi Film Polyvinil Alkohol (PVA) Yang Dimodifikasi Dengan Polyethylene Oxide (PEO) Sebagai Material Sensitif Terhadap Kelembaban. Tesis Pasca Sarjana UI 2007