

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kelembaban

Menurut Lee(2004) kelembaban merupakan ukuran jumlah uap air di atmosfer, baik di udara atau dalam kandungan gas lain. Terdapat dua parameter dasar yang berhubungan dengan pengukuran kelembaban yaitu kelembaban absolut (AB) dan kelembaban relatif (RH). Farhani(2014) menjelaskan bahwa kelembaban absolut dapat diartikan sebagai kerapatan uap air dimana menyatakan perbandingan massa air di udara (M_w) dengan volume udara (V) dengan satuan gram/m³, kelembaban absolut dapat dituliskan dalam suatu persamaan (2.1) sebagai berikut:

$$AB = \frac{M_w}{V} \quad \dots\dots(2.1)$$

Sedangkan kelembaban relatif (RH) merupakan perbandingan tekanan uap air di udara dengan tekanan maksimum uap air yang mampu ditahan oleh udara tersebut dalam kondisi temperatur dan tekanan gas yang sama. Dan disebut kelembaban relatif karena RH bergantung terhadap temperatur sistem. Biasanya nilai RH direpresentasikan dalam bentuk prosentase yang dapat diperoleh dari perumusan (2.2) berikut:

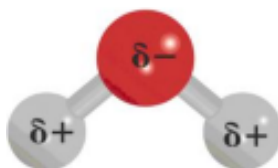
$$\%RH = \frac{P_w}{P_s} 100\% \quad \dots\dots(2.2)$$

Karena jumlah maksimum air yang mampu ditampung oleh udara didefinisikan sebagai massa maksimum air ketika saturasi/dalam kondisi jenuh yang berada dalam volume udara tersebut atau biasanya disebut sebagai kelembaban saturasi (SH). Maka rumusan %RH dapat diperluas dengan menghubungkan nilai kelembaban absolut yang diperoleh menjadi persamaan (2.3) berikut ini:

$$\%RH = \frac{AB}{SH} 100\% \quad \dots\dots(2.3)$$

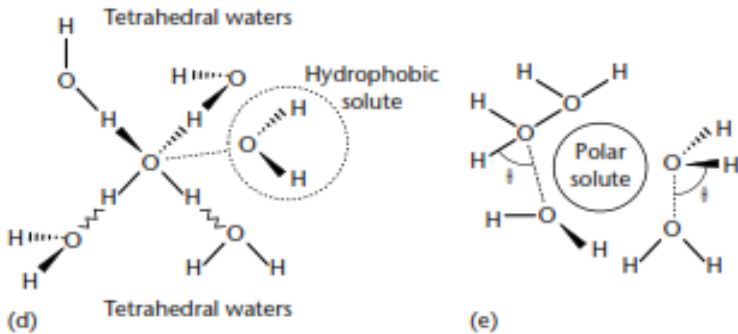
Seperti diawal dijelaskan bahwa kelembaban udara merupakan ukuran uap air diudara,sehingga ketika membahas kelembaban maka akan membahas tentang sifat yang dimiliki oleh

molekul air itu sendiri. Menurut Shakhshiri(2011) molekul air memiliki struktur yang sederhana yaitu dua atom hidrogen yang berikatan dengan satu atom oksigen, akibat struktur yang sederhana tersebut molekul air memiliki sifat dan karakter yang unik. Ikatan hidrogen dan oksigen terbentuk dari pasangan elektron antara dua atom tersebut, pada molekul air pasangan elektron tidak diberikan dengan sama, dimana oksigen memiliki afinitas elektron yang lebih besar, sehingga pada ikatan O-H elektron lebih tertarik ke atom oksigen, menyebabkan geometri dari molekul air tidak simetris. Ketidaksimetrisan tersebut menyebabkan molekul air memiliki polaritas muatan didalamnya hal tersebut dapat lebih diamati melalui gambar 2.1 berikut:



Gambar 2. 1 Geometri molekul air (merah= O, abu-abu = H)

Pernyataan dari Prof.Shakhshiri diperkuat dengan pemaparan Sharp(2001) bahwa molekul air memiliki dua ikatan O-H didalamnya dengan panjang 0.096nm dan membentuk sudut 105°, sehingga menyebabkan terbentuk polaritas muatan positif dan negatif pada molekul air. Pada dasarnya molekul air adalah molekul yang netral, namun karena keberadaan polaritas muatan ini menyebabkan molekul air lebih reaktif untuk berinteraksi dengan atom lain atau dengan molekul air yang lain membentuk suatu materi. Seperti yang terjadi ketika satu molekul air berinteraksi dengan molekul air yang lain membentuk materi air yang biasa kita amati dan rasakan, molekul-molekul air tersebut berinteraksi dengan jenis interaksi berupa ikatan Hidrogen. Adapun gambaran interaksi molekul air dengan molekul air yang lain atau dengan partikel polar sesuai dengan gambar 2.2:

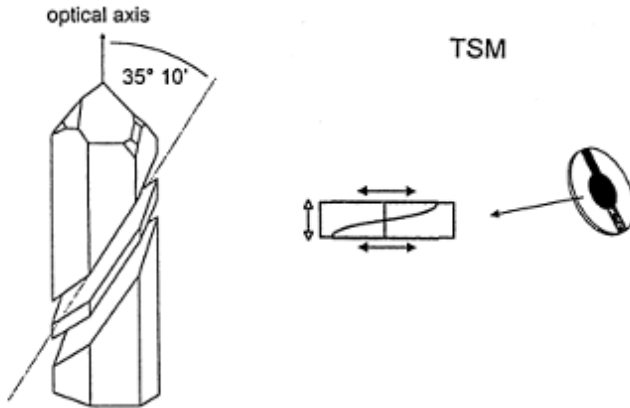


Gambar 2. 2 Skema ikatan molekul air dengan molekul air yang lain (d), dengan ion (e)

Ada berbagai macam interaksi yang dapat dilakukan oleh molekul-molekul polar seperti molekul air. Interaksi tersebut biasa disebut interaksi intermolekul yang biasanya berupa interaksi dispersi, ion-dipol, dipol-dipol, atau ikatan hidrogen. Interaksi ion-dipole sendiri adalah interaksi antara ion (kation/anion) dengan molekul polar karena adanya interaksi elektrostatik dari salah satu polar molekul dipol dengan ion (Bishop,2010) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2 (e).

2.2 Quartz Crystal Microbalanced (QCM)

Quartz Crystal Microbalanced (QCM) merupakan kuarsa khusus yang dipotong pada sudut AT-cut nya seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.3 , sehingga QCM memiliki sifat piezoelektrik. Ketika QCM dialiri arus AC maka kristal QCM akan mengalami deformasi mekanik sehingga kristal akan bervibrasi dengan frekuensi tertentu, ketika QCM mendapatkan pembebanan dari senyawa tertentu, menyebabkan menurunnya frekuensi osilasi QCM tersebut. Perubahan frekuensi karena pembebanan massa itulah yang menyebabkan QCM sering diaplikasikan sebagai sensor protein dan sensor gas (Marx,2002).



Gambar 2.3 Pemotongan kuarsa pada sudut AT-cut

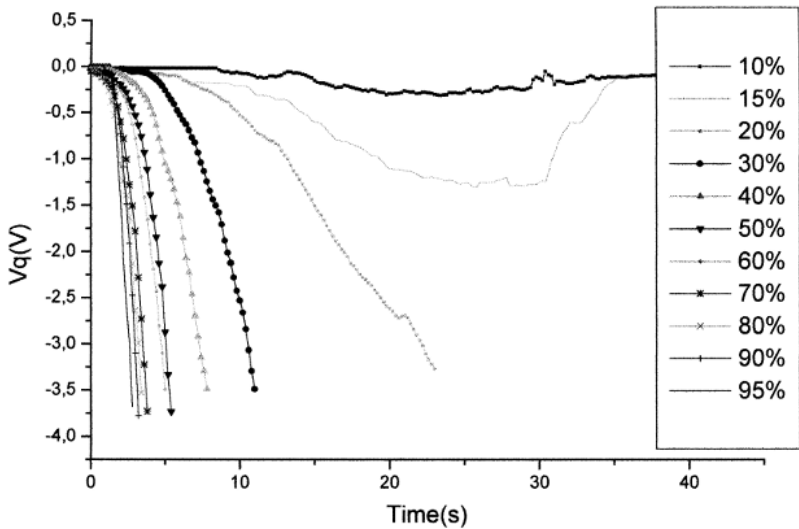
Menurut Zhang(2015) perubahan frekuensi karena penambahan massa pada QCM tersebut dapat dianalisa menggunakan *persamaan Sauerbrey* (2.4) sebagai berikut ini:

$$\Delta f = - \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\mu_q\rho_q}} \Delta m \quad \dots\dots(2.4)$$

Dimana Δf merupakan perubahan frekuensi QCM (Hz), f_0 merupakan frekuensi dasar dari QCM (MHz), A merupakan luas permukaan elektroda aktif (cm^2), ρ_q merupakan massa jenis kuarsa (2.649 g/cm^3), μ_q merupakan modulus geser kuarsa ($2.947 \times 10^{11} \text{ g/cms}^2$) dan Δm merupakan perubahan massa pada permukaan elektroda aktif. Persamaan 2.4 hanya dapat digunakan jika massa yang terdeposisi memiliki sifat akustik yang sama dengan kristal dan memiliki perubahan frekuensi yang kecil.

Pengaplikasian QCM sebagai sensor kelembaban telah banyak dikembangkan oleh beberapa peneliti, salah satunya adalah yang dilakukan oleh F.Pascal-Delanmoy (2000), penelitian dilakukan dengan mengkondisikan QCM dalam suatu sistem dengan berbagai keadaan kelembaban mulai dari %RH sebesar 10%-95%. Dari penelitian tersebut diketahui mekanisme QCM sebagai sensor kelembaban, adalah ketika air kondensasi hasil dari sistem Peltier terabsorpsi oleh QCM, maka mengakibatkan perubahan massa pembebanan pada permukaan QCM yang sensitif, perubahan massa

tersebut mengakibatkan turunnya nilai frekuensi resonansi QCM seiring berjalannya waktu. Hasil yang diperoleh para peneliti tersebut dapat digambarkan pada gambar 2.4 sebagai data grafik berikut ini, hubungan antara waktu dengan perubahan frekuensi QCM yang telah di konversi dalam variabel tegangan (V_q) untuk setiap variasi nilai %RH.



Gambar 2. 4 Grafik perubahan frekuensi QCM kondisi %RH yang berbeda

Selain pengaplikasian studi optimalisasi QCM telah mengalami perkembangan, seperti yang dilakukan oleh Zhang(2005) melakukan pelapisan *Carbon Nanotube* pada QCM sebagai aplikasi sensor kelembaban. Menurut beliau dengan penambahan lapisan tipis pada QCM akan meningkatkan jumlah uap air yang mampu di tangkap QCM. Hal tersebut diperkuat dengan pernyataan Heydari(2014) bahwa pengaplikasian bahan nanopartikel pada QCM mampu meningkatkan sensitifitas dari QCM selain itu mampu memberikan sifat baru kepada QCM, seperti resistan terhadap korosi, hidrophobicity,dll.

2. 3 Lapisan Diatas QCM

Deposisi lapisan diatas QCM mampu memberi pengaruh signifikan pada kemampuan QCM dalam aplikasi sebagai sensor, dengan syarat lapisan diatas QCM memilki ketebalan yang optimal sehingga tidak memberi efek pembebanan pada kristal QCM. Sukma (2015) memaparkan persamaan Sauerbrey dapat dimodifikasi untuk mencari ketebalan lapisan ZnPc yang terbentuk diatas QCM. Modifikasi dilakukan dengan merubah nilai A pada persamaan 2.4 menjadi nilai volume dikalikan dibagi dengan tinggi, sehingga persamaan 2.4 akan menjadi

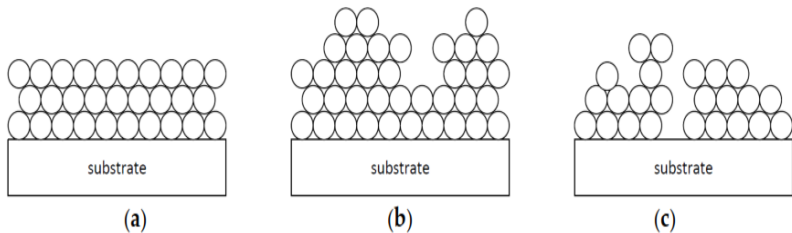
$$\Delta h_{ZnPc} = \frac{-\Delta f \sqrt{\rho \cdot G}}{2f_0^2 \cdot \rho_{ZnPc}} \dots\dots (2.5)$$

Pengoptimalan lapisan diatas QCM dalam aplikasi sebagai sensor kelembaban dapat ditinjau dari berbagai aspek bahasan, yaitu morfologi yang dibentuk ketika proses pelapisan, pengaruh pola kekasaran lapisan yang dibentuk, dan pengaruh lapisan terhadap sifat viskoelastik pada QCM.

1.3.1 Proses pelapisan QCM dengan metode PVD

Pendeposisian lapisan aktif diatas QCM dapat dilakukan dengan berbagai metode salah satunya yaitu dengan metode evaporasi. Metode evaporasi dilakukan dengan prinsip perubahan fase bahan padatan atau cairan dengan titik uap tertentu menjadi fase gas yang kemudian dipaparkan pada substrat objek yang ingin dilapisi (Wadley,2001). Metode pendeposisian dengan evaporasi banyak macamnya yaitu *Chemical Vapor Deposition* (CVD), plasma, dan *Physical Vapor Deposition* (PVD). Pada deposisi dengan metode PVD, lapisan yang terbentuk pada substrat memiliki model penumbuhan yang bermacam jenisnya disebabkan oleh sifat gas yang bebas dan memiliki energi yang tidak homogen untuk interaksi antara substrat dengan *adatom* (atom gas yang akan dideposisikan). Umumnya model penumbuhan lapisan melalui metode PVD ada tiga jenis seperti yang ditunjukkan gambar 2.5 yaitu model Frank van der Merwe (*layer*) yang disebabkan karena kohesi antar adatom lebih lemah dibandingkan ikatan adatom pada substrat, sehingga penumbuhan lapisan pertama diselesaikan secara merata terlebih dahulu sebelum membentuk lapisan berikutnya.

Kemudian yang kedua model Volmer Weber (*island*) yang terbentuk akibat kohesi antar adatom lebih kuat dibandingkan dengan interaksi adatom dengan substrat sehingga molekul gas munumpuk untuk membentuk ikatan dengan molekul gas lain. Berikutnya yang ketiga adalah model Stranski-Krastanov (*layer-island*) yaitu model gabungan kedua model sebelumnya, pada model ini lapisan awal yang terbentuk adalah layer, namun semakin lama lapisan adatom pada substrat menumpuk pada beberapa bagian membentuk island (Lindner,2016).



Gambar 2. 5 Model pembentukan lapisan a). layer, b). layer-island, c). island (Lindner,2016)

1.3.2 Kekasaran Lapisan

Kekasaran merupakan salah satu pendefinisian morfologi suatu permukaan lapisan. Ada bermacam parameter untuk menganalisa kekasaran suatu permukaan, yang biasa digunakan adalah parameter “Ra” yang merupakan nilai kekasaran rata-rata dari lapisan. Adapun ketika meninjau lapisan dalam 3 dimensi, dapat ditentukan nilai kekasarannya melalui persamaan 2.6 :

$$Ra = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y) - \{z(x,y)\}| dx dy \dots (2.6)$$

Nilai $z=z(x,y)$ merupakan ketinggian sebagai fungsi posisi pada koordinat kartesian dan $\{z(x,y)\}$ adalah ketinggian rata-rata bidang xy menyebabkan selisih $z(x,y)$ bernilai minimum (Peiponen,2003).

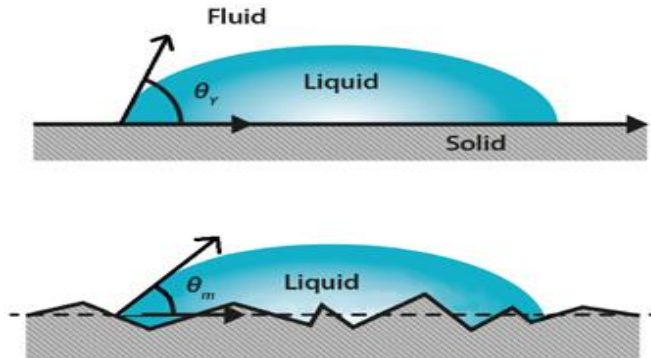
Pengaruh kekasaran lapisan diatas QCM dapat mempengaruhi tingkat adsorpsi dan juga imobilisasi molekul. Jika kita menganggap permukaan lapisan QCM untuk matriks pengimobilisasi tidak datar namun bergelombang atau kasar,

sehingga dapat dipastikan bahwa luas permukaan kontak untuk mengikat biomolekul akan semakin besar. Hal ini menghasilkan lebih banyak ikatan biomolekul pada permukaan sensor. Luasan permukaan normal pada sensor tidak berubah, hal ini menyebabkan massa per satuan luas yang lebih besar pada sensor. Maka secara teori, penambahan kekasaran permukaan pada sensor akan menghasilkan peningkatan jumlah biomolekul yang terimobilisasi pada permukaan sensor. Tetapi kekasaran permukaan perlu diatur untuk mempertahankan osilasi sensor. Permukaan yang lebih kasar menghasilkan lebih banyak air yang terjebak yang nantinya menyebabkan penurunan frekuensi resonansi pada sensor berbasis QCM (Sakti,et al., 2012).

Menurut Patricia(2015), kekasaran permukaan lapisan juga mempengaruhi *Hidrophobicity* dari lapisan tersebut, hal tersebut dikarenakan menurut pemodelan Weinzell yang nampak pada gambar 2.6 kekasaran permukaan akan mempengaruhi sudut kontak yang dibentuk oleh permukaan padatan dengan molekul air. Dalam hubungan antara kekasaran dengan sudut kontak digambarkan dengan penggunaannya faktor kekasaran (r) lapisan dihubungkan dengan nilai sudut kontak akibat adanya pola kekasaran pada permukaan lapisan (Θ_w), serta (Θ_y) yang merupakan sudut kontak young/ sudut kontak yang teramati antara lapisan dengan molekul cair. Seperti yang ditunjukkan persamaan 2.7.

$$\cos(\Theta_w) = r \cos(\Theta_y) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Sudut kontak dengan nilai $<90^\circ$ menunjukkan sifat suka dengan air (hidrofilik), sudut kontak $>90^\circ$ lapisan menunjukkan sifat kedap air (hidrofobik) dan jika sudut kontak yang dibentuk $> 150^\circ$ lapisan dapat dikatakan sebagai superhidrofobik. Permukaan lapisan yang lebih kasar menunjukkan adanya peningkatan sudut kontak yang dibentuk antara permukaan padatan dengan molekul air, yang menandakan bahwa kekasaran yang meningkat menyebabkan permukaan semakin hidrofobik (Sakti,2016).



Gambar 2. 6 Pengaruh kekasaran lapisan dengan sudut kontak yang dibentuk antara permukaan dengan molekul air

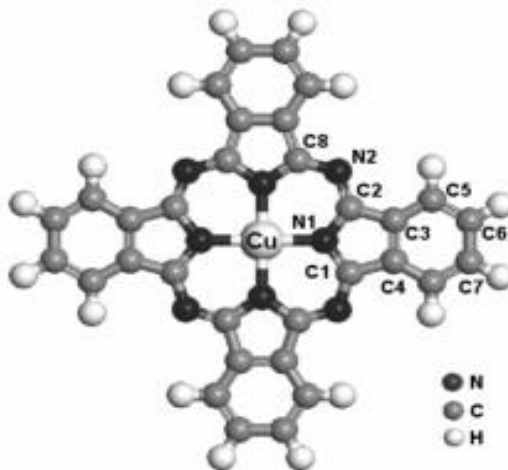
1.3.3 Sifat Viskoelastik

Viskoelastik lapisan menunjukkan efektivitas lapisan yang terbentuk diatas QCM, lapisan dengan viskoelastik yang tinggi mungkin menyebabkan kristal QCM tidak dapat bergetar, atau adanya sifat redaman pada osilasi QCM (Masruroh,2014). Viskoelastik lapisan diatas QCM dapat dianalisa dengan menghitung impedansi mekanik yang terkonversi dalam impedansi listrik pada rangkaian *Butterworth-Van Dyke* (BVD) (Granstaff,1993). Lapisan dengan sifat rigid memiliki gelombang osilasi yang sefase dengan osilasi kristal QCM, sehingga QCM tidak terpengaruh oleh penambahan lapisan, pada lapisan rigid tersebut juga rumusan Sauerbrey valid untuk di gunakan menganalisa perilaku QCM. Kemudian jika lapisan bersifat viskoelastik yang tinggi dapat diakibatkan karena impedansi permukaan QCM besar menyebabkan adanya disipasi energi antara osilasi permukaan diatas QCM dengan kristal QCM sehingga kinerja QCM menjadi terganggu dan pada lapisan tersebut persamaan Sauerbrey sudah tidak valid untuk digunakan analisa perilaku QCM (Behling,1998).

2.4 Copper Phthalocyanine (CuPc)

Copper Phthalocyanine merupakan salah satu jenis Metal Phthalocyanine dengan atom inti berupa *Copper*. Dimana struktur

CuPc sendiri terdiri dari 32 atom karbon, 16 atom hidrogen, 8 atom nitrogen, dengan 2 rantai elektron yang berikatan dengan logam inti untuk membentuk kestabilan. Seperti jenis MPC yang lain, morfologi CuPc ditentukan dari interaksi π - π elektron dengan ikatan yang dominan adalah ikatan van der Waals. Adapun geometri CuPc digambarkan pada gambar 2. 7. CuPc merupakan semikonduktor organik yang stabil secara thermal dan kimiawi, sehingga CuPc sering sekali digunakan sebagai pelapisan untuk aplikasi sensor gas.

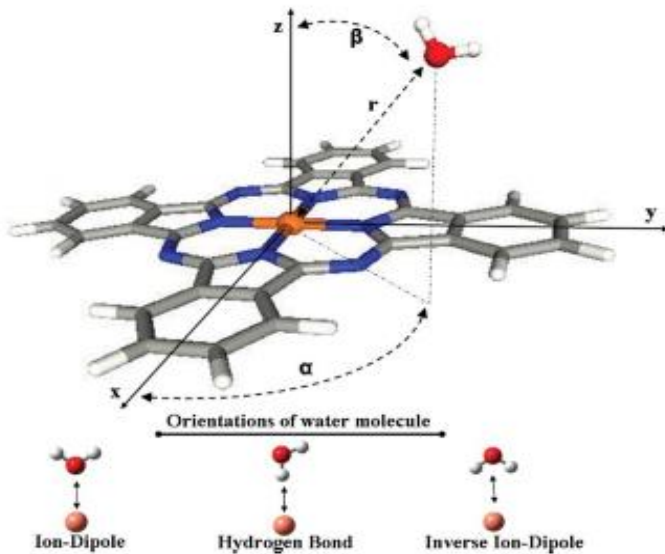


Gambar 2. 7 Geometri kimia molekul CuPc

Pada kondisi thermal tertentu CuPc memiliki dua fase yang berbeda yaitu fase α dan β . Pada temperatur dibawah 100°C fase α -CuPc akan lebih stabil, sedangkan pada temperatur diatas 100°C fase β -CuPc akan lebih stabil (Bohrer, 2008).

Seperti yang dijelaskan diawal bahwa salah satu aplikasi CuPc adalah sebagai sensor, oleh sebab itu CuPc sendiri tentunya bersifat reaktif dengan molekul tertentu. Salah satu molekul yang dapat berinteraksi dengan CuPc adalah H_2O , hal ini didukung dengan penelitian Martin(2011) yang memodelkan interaksi antara CuPc dengan molekul air, dimana molekul air akan berinteraksi dengan CuPc yang didominasi oleh ikatan hidrogen, ikatan ion-dipol, dan ikatan inverse ion-dipol pada logam inti Phthalocyanine. Adanya ikatan dipol tersebut karena logam inti CuPc memiliki

kondisi muatan (Cu^{2+}) yang tentunya akan mudah bereaksi dengan atom yang memiliki polaritas negatif, seperti yang ditunjukkan gambar 2.8 berikut:



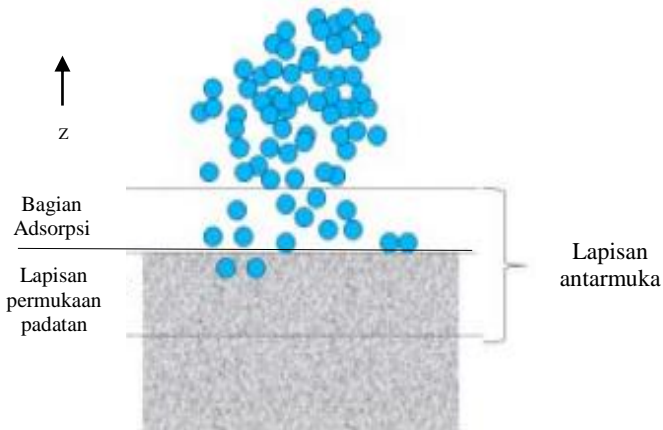
Gambar 2. 8 Interaksi CuPc dan H_2O

Selain karena interaksi atomik antara CuPc dengan H_2O , morfologi dari lapisan CuPc yang terbentuk juga mempengaruhi kinerja lapisan CuPc dalam interaksi atau mendeteksi H_2O . Seperti penelitian yang dilakukan Eric(2008) tentang morfologi lapisan menentukan interaksi CuPc dengan $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$. Menurutnya ketebalan dan kekasaran dari lapisan CuPc yang terbentuk pada QCM, mempengaruhi proses difusi adsorban ($\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$) pada permukaan CuPc. Dari penelitiannya didapatkan bahwa lapisan CuPc dengan ketebalan 25 nm lebih besar nilai respon resistivnya dibandingkan lapisan dengan ketebalan 100nm. Dari penelitiannya juga didapatkan bahwa perubahan massa QCM terjadi karena adanya adsorpsi cepat pada situs permukaan aktif sedangkan respon resistive didominasi difusi lambat adsorban pada lapisan CuPc.

2.5 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu proses interaksi oleh padatan tertentu terhadap zat tertentu yang terjadi pada permukaan zat padat karena adanya gaya tarik atom atau molekul pada permukaan zat padat tanpa meresap kedalam. Bila gas atau uap bersentuhan dengan permukaan padatan yang bersih, maka gas atau uap tadi akan teradsorpsi pada permukaan padatan tersebut seperti yang ditunjukkan gambar 2.9. Permukaan padatan disebut sebagai adsorben, sedangkan gas atau uap disebut sebagai adsorbat. Semua padatan dapat menyerap gas atau uap pada permukaan. Banyak gas yang teradsorpsi yang bergantung pada suhu dan tekanan gas serta luas permukaan padatan. Padatan yang paling efisien adalah padatan yang sangat porous seperti arang dan butiran padatan yang sangat halus (Bird,1993).

Proses adsorpsi dapat terjadi karena adanya gaya tarik atom atau molekul pada permukaan padatan yang tidak seimbang. Adanya gaya ini, padatan cenderung menarik molekul-molekul lain yang bersentuhan dengan permukaan padatan, baik fasa gas atau fasa larutan kedalam permukaannya. Akibatnya konsentrasi molekul pada permukaan menjadi lebih besar dari pada dalam fasa gas zat terlarut dalam larutan. Pada adsorpsi interaksi antara adsorben dengan adsorbat hanya terjadi pada permukaan adsorben (Tandy,E., 2012).



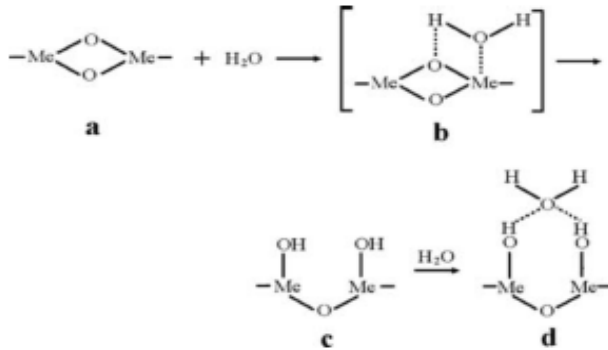
Gambar 2.9 Ilustrasi terjadi proses adsorpsi

Jenis adsorpsi dibedakan menjadi dua yaitu *Physisorption* (Adsorpsi Fisika) dan *Chemisorption* (Adsorpsi Kimia). Ciri-ciri interaksi adsorpsi yang terjadi pada suatu permukaan apakah secara fisika atau kimia disajikan dalam paper yang dikeluarkan oleh Micromeritics Instrumen Corporation (2012) seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1. Menurut Shofa(2012) adsorpsi Fisika terjadi karena adanya gaya Van der Waals. Pada adsorpsi fisika, gaya tarik menarik antara molekul fluida dengan molekul pada permukaan padatan (Intermolekuler) lebih kecil dari pada gaya tarik menarik antar molekul fluida tersebut sehingga gaya tarik menarik antara adsorbat dengan permukaan adsorben relatif lemah pada adsorpsi fisika, adsorbat tidak terikat kuat dengan permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke permukaan lainnya dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat tersebut dapat digantikan oleh adsorbat lainnya . Keseimbangan antara permukaan padatan dengan molekul fluida biasanya cepat tercapai dan bersifat reversibel. Adsorpsi fisika memiliki kegunaan dalam hal penentuan luas permukaan dan ukuran pori. Adsorpsi kimia terjadi karena adanya ikatan kimia yang terbentuk antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben. Ikatan kimia dapat berupa ikatan kovalen atau ionik. Ikatan yang terbentuk kuat sehingga spesies aslinya tidak dapat ditentukan. Karena kuatnya ikatan kimia yang terbentuk maka adsorbat tidak mudah terdesorpsi. Adsorpsi kimia diawali dengan adsorpsi fisik dimana adsorbat mendekati kepermukaan adsorben melalui gaya Van der Waals / Ikatan Hidrogen kemudian melekat pada permukaan dengan membentuk ikatan kimia yang biasa merupakan ikatan kovalen.

Tabel 2. 1 Tabel karakter adsorpsi (Micromeritics Intrumen Corporation ,2017)

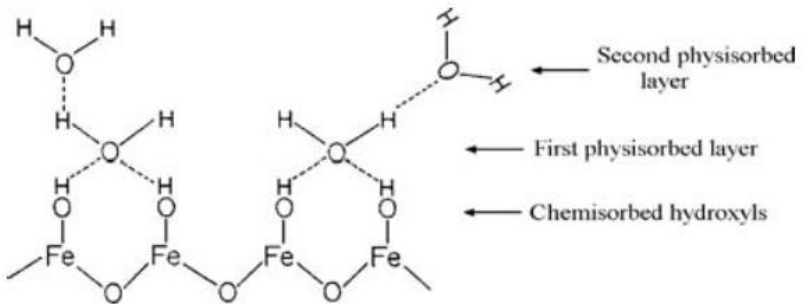
	Adsorpsi secara Kimia	Adsorpsi secara Fisika
Jangkauan temperatur	Tidak terbatas	Dekat atau diatas titik embun gas
Entalpi Adsorpsi	Biasanya (80-800 kJ/mol)	Biasanya (5-80 kJ/mol)
Sifat adsorpsi	Irreversible	Reversible
Titik Jenuh	Terbatas pada satu lapisan	Perbentukan banyak lapisan
Kinetika proses Adsorpsi	Kecepatan berubah bergantung proses aktifasi	Cepat tanpa adanya proses aktifasi

Salah satu molekul yang dapat mengalami proses adsorpsi adalah molekul air pada komponen padat seperti keramik. Penjelasan tersebut salah satunya adalah yang dipaparkan oleh Chen(2005) dalam papernya menjelaskan tentang kemampuan molekul air untuk berinteraksi dengan material keramik. Mekanismenya yaitu terjadinya konduksi protonik lapisan air yang teradsorpsi pada permukaan keramik. Dimana tahapan adsorpsi molekul air yaitu pertama-tama molekul air mengalami adsorpsi secara kimia membentuk situs aktif seperti yang ditunjukkan gambar 2.10 (a) yang bertujuan untuk membentuk adsorpsi yang kompleks (b), kemudian terjadi transfer dengan permukaan kelompok hidroksil seperti gambar (c), lalu molekul air yang lain membentuk ikatan hidrogen dengan dua kelompok hidroksil tetangga seperti pada gambar (d).



Gambar 2.10 Empat tahapan mekanisme adsorpsi molekul air

Molekul air terus terkondensasi pada permukaan keramik sampai beberapa lapisan ikatan hidrogen. Namun pada lapisan teratas interaksi protonik sudah mulai melemah tidak sekuat lapisan physisorption yang pertama, hal tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.11 berikut ini:



Gambar 2.11 Struktur banyak lapisan dari proses air terkondensasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)