#### ВАВ П

#### DASAR TEORI

## II. 1 Pendahuluan

Bahan dielektrik ideal adalah bahan yang tidak memiliki muatan bebas. Meskipun demikian, semua bahan tersusun dari molekul yang terdiri dari sesuatu yang bermuatan (proton dan elektron), dan molekul dielektrik dipengaruhi oleh adanya medan listrik luar. Medan listrik menimbulkan gaya pada setiap zarah bermuatan, zarah positif didorong ke arah medan, sedangkan zarah negatifnya ke arah sebaliknya, sehingga bagian positif dan negatif dari setiap molekul berpindah dari letak kesetimbangannya pada arah yang berlawanan. Akan tetapi, perpindahan ini dibatasi oleh gaya pemulih yang kuat yang terjadi akibat perubahan susunan muatan dalam molekul, sehingga muatannya disebut muatan terikat. Dan peristiwa diatas disebut polarisasi (Reitz, 1993).

Kalium dihidrogen pospat biasa disebut dengan KDP, tidak berwarna, dapat larut dalam air, dan memiliki titik cair pada suhu 526 K (Parker, 1986). Sifat ferrolektrik KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> di temukan oleh Busch dan Scherres pada tahun 1935, yaitu contoh tipekal dari group kedua ferroelektrik, seperti KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, R<sub>b</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>A<sub>s</sub>O<sub>4</sub>, R<sub>b</sub>D<sub>2</sub>A<sub>s</sub>O<sub>4</sub>, dan C<sub>s</sub>H<sub>2</sub>A<sub>s</sub>O<sub>4</sub>, terdiri dari dihidrogen phospat dan logam alkali. Bahan ini memperlihatkan momen dipol spontan pada suhu 123 K yang disebut dengan temperatur Currie. Pada temperatur diatas temperatur Currie ferroelektrik struktur KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> berbentuk tetragonal dengan dimensi sel a = b = 7,45 Å dan c = 6,96 Å

dalam kondisi tersebut dimana polarisasi spontan lenyap apabila tidak dikenai medan (Dekker, 1966).

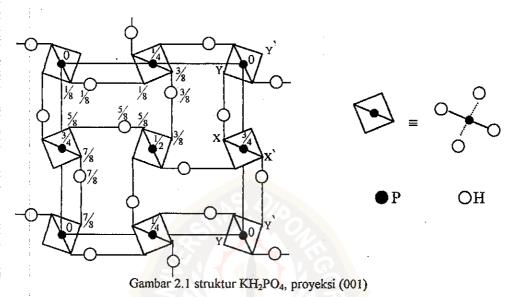
## II. 2 Ikatan KH2PO4

Suatu bahan/benda padat terdiri atas molekul-molekul yang saling berikatan satu sama lain. Molekul didefinisikan sebagai kelompok atom yang terikat dengan kuat (ikatan inter molekul) dengan ikatan antar kelompok atom sejenis yang relatif lemah (ikatan antar molekul). Dalam setiap molekul, atom-atom terikat oleh gaya tarik menarik yang kuat yang biasanya berbentuk ikatan kovalen (ikatan bersama ion), meskipun kadang-kadang terdapat ikatan ion (memberi/menerima ion) juga. Ikatan antara molekul lemah, oleh karena itu dalam batas-batas tertentu setiap molekul dapat bergerak dengan bebas (Van Vlack, 1995).

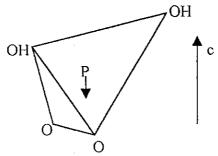
KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> merupakan ikatan ionik dibangun oleh struktur kecil PO<sub>4</sub> tetrahedra yang berikatan dengan ion K (tidak ditunjukkan) dan ikatan hidrogen. Ikatan ionik adalah ikatan yang terbentuk karena perpindahan elektron antara dua atom menghasilkan partikel-partikel bermuatan yang saling tarik menarik antara satu dengan yang lain. (gaya tarik menarik antara muatan positif dan negatif). Ikatan hidrogen tersebut berikatan dengan oksigen dalam PO<sub>4</sub> tetrahedra yang berdekatan. Bahan ini mempunyai struktur unit sel berbentuk orthorhombik pada temperatur dibawah temperatur Currie dan berbentuk tetragonal pada temperatur setelah titik Currie (Dekker, 1996). Struktur sel berbentuk tetragonal ditunjukkan dengan proyeksi turun c. PO<sub>4</sub> tetrahedra tampak pada tepi atas dan ditunjukkan dengan kotak; garis diagonal pada tiap kotak merupakan bagian atas oksigen dengan oksigen

ubruission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more that

yang merupakan sisi dari tetrahedron. Karena itu oksigen berada di tengah kotak. Tinggi relatif c dari tetrahedra diberikan oleh posisi pospor pada gambar 2.9. Tetrahedra ditunjukkan jarak c pada tepi atas dari satu tetrahedron, yaitu XX, yang sama dengan tinggi c pada tepi bawah, YY, dari dua tetrahedra terdekat (West., 1984).



Tiap PO<sub>4</sub> tetrahedra memiliki ikatan hidrogen. Dalam tiap ikatan hidrogen, atom hidrogen dapat memilih dua posisi yaitu lebih dekat ke oksigen satu atau ke oksigen lainnya, tak ada hidrogen yang berada di tengah ikatan. Pada temperatur yang tinggi, posisi hidrogen acak selain dua posisi pada tiap ikatan, sehingga struktur menjadi rusak. Pada keadaan ferroelektrik, hidrogen mengatur sendiri membentuk ikatan dengan tepi atas dari PO<sub>4</sub> tetrahedron. Hidrogen ini memberikan respon tidak langsung untuk polarisasi spontan dalam PO<sub>4</sub> tetrahedra saat atom phospor berpindah turun dari atom hidrogen, gambar 2.2 (West, 1984).

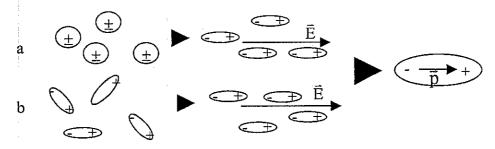


Gambar 2.2 perpindahan phospor dalam PO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub> tetrahedron menimbulkan polarisasi spontan
[Sumber: West, 1984]

#### II. 3 Polarisasi

Medan listrik yang diberikan pada dielektrik menyebabkan pergeseran muatan dielektrik dan bukan aliran muatan. Bahan dielektrik tersebut memisahkan dua konduktor listrik tanpa ada aliran listrik diantaranya. Ketika muatan positif dari bahan dielektrik menuju katoda dari lempeng kapasitor dan muatan negatif dari bahan dielektrik menuju anoda lempeng kapasitor karena adanya pengaruh medan luar (Ē) maka bahan tersebut disebut terpolarisasi (Puri, 1997).

Secara rata-rata elektron-elektron di dalam atom suatu dielektrik dipindahkan terhadap inti atom tersebut oleh suatu medan yang bekerja padanya, sehingga menimbulkan dipol yang memiliki momen listrik yang searah dengan arah medan listrik (Van Vlack, 1995).



Gambar 2.3 (a) Molekul monopol yang terpoolarisasi, (b) Molekul dipol yang terpolarisasi. Keduanya menimbulkan momen dipol $\vec{p}$ 

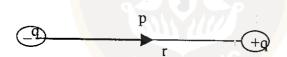
his document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate ubmission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of

sion for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Jenis polarisasi ada tiga yaitu polarisasi elektronik yang merupakan pergeseran elektron dan proton ke elektroda positif dan negatif, polarisasi ionik merupakan pergeseran ion negatif dan positif ke elektroda positif dan negatif sama seperti polarisasi elektronik yang terlihat pada gambar 2.3 (a), dan polarisasi molekul terjadi bila molekul polar berada dalam medan listrik seperti gambar 2.3 (b) (Van Vlack, 1995).

## II. 3. 1 Dipol Listrik

Akibat adanya polarisasi menimbulkan dipol listrik yang memiliki momen listrik yang searah dengan arah medan listrik. Dipol listrik didefinisikan sebagai interaksi antara dua muatan +q dan -q yang dipisahkan dengan jarak r dan direpresintasikan dengan vektor  $\vec{p}$  yang mengarah dari muatan negatif ke muatan positif. Momen dipol biasanya disebutkan dalam debye D, dengan 1 D = 3,336 x 10<sup>-30</sup> Cm (Atkins, 1997).

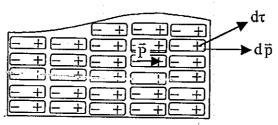


Gambar 2.4 Dipol listrik berjarak l dengan arah vektor  $\vec{p}$ .

Momen dipol listrik untuk muatan titik ditulis  $\vec{p} = q\vec{r}$  dan untuk muatan yang terdistribusi kontinu terhadap volume, momen dipol diberikan oleh:

$$\vec{p} = \int_{\tau} \rho(\vec{r}) \, \vec{r} \, d\tau \tag{2.1}$$

dalam satuan SI momen dipol adalah Coulomb meter (C.m). Persamaan (2.1) menyatakan bahwa momen dipol listrik dihasilkan oleh semua muatan yang terdistribusi terhadap volume yang membentuk dipol listrik.



Gambar 2.5 Sepotong bahan dielektrik yang terpolarisasi, setiap bagian volume dτ digambarkan sebagai dipol d  $\bar{p}$  [Sumber: Reitz, 1993]

Gambar 2.5 menunjukkan suatu bagian volume kecil d $\tau$  dari bahan dielektrik yang secara keseluruhan tidak bermuatan dan setiap dipol pada gambar 2.5 di gambarkan sebagai satu molekul. Jika bahan tersebut terpolarisasi berarti telah terjadi pemisahan muatan positif dan negatif. Bagian volume tersebut dicirikan oleh suatu momen dipol listrik d $\bar{p} = \int_{d\tau} \bar{r} \ dq$ , dan polarisasi didefinisikan sebagai momen dipol listrik persatuan volume.

$$\vec{P}(\vec{r}) = d\vec{p}/d\tau \tag{2.2}$$

Dengan  $\bar{P}(\bar{\tau})$  adalah polarisasi listrik dalam SI adalah C/m² atau dalam satuan besaran listrik adalah volt/meter. Untuk seluruh bahan dielektrik yang terdiri dari beberapa molekul maka polarisasi bahan merupakan penjumlahan momen dipol persatuan volum atau secara matematis di tulis :

this document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the ubmission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of the

$$\vec{P} = N \vec{p}$$
 (2.3)

dengan N adalah banyaknya molekul persatuan volume.

# II. 4 Pergeseran Listrik

Menurut Gauss, keberadaan dielektrikum mengakibatkan rapat muatan total selain dapat ditimbulkan oleh muatan bersih q atau muatan bebas juga ditimbulkan oleh muatan polarisasi qp atau muatan terikat dari bahan dielektrik. Secara matematis dapat ditulis (Reitz, 1993):

$$\oint_{s} \vec{E} \ d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon} (q + q_{p}) \tag{2.4}$$

dengan mengubah integral volume pada persamaan (2.4) menjadi suatu integral permukaan dengan menggunakan teorema divergensi, didapat persamaan dalam bentuk:

$$q_p = -\oint \vec{P} d\vec{A}$$
 (2.5)

persamaan (2.5) menyatakan bahwa polarisasi hanya menyangkut muatan terikat saja yaitu muatan pada permukaan bahan dielektrik. Dengan memasukkan persamaan (2.5) ke persamaan (2.4) didapat :

$$\oint \left( \in \vec{E} + \vec{P} \right) d\vec{A} = q$$
(2.6)

dan dengan menggunakan variabel baru  $\bar{\mathbf{D}}$  disebut pergeseran listrik, dengan persamaan :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \tag{2.7}$$

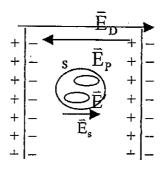
$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{P}} \tag{2.8}$$

dari persamaan (2.6) dan (2.8) maka di dapat :

$$\oint \vec{D} d\vec{A} = q \tag{2.9}$$

persamaan (2.9) menyatakan bahwa pergeseran listrik  $\vec{D}$  hanya menyangkut muatan bebas yaitu muatan pada permukaan konduktor. Satuan dari  $\vec{D}$ ,  $\vec{E}$ , dan  $\vec{P}$  adalalah sama. Untuk ruang hampa  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ , karena tidak ada bahan dielektrik.

# II. 5 Medan Molekul



Gambar 2. 6 medan molekul di dalam rongga s dalam sistem muatan polarisasi [Sumber : Reitz, 1993]

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of

Medan listrik yang menyebabkan polarisasi molekul disebut medan molekul,  $\vec{E}_{\rm m}$ . medan ini merupakan medan listrik pada tempat kedudukan molekul dalam dielektrik, dan yang dihasilkan oleh semua sumber luar dan oleh semua molekul yang terpolarisasi dalam bahan kecuali molekul di titik yang ditinjau.

$$\vec{E}_{m} = \vec{E}_{D} + \vec{E}_{p} + \vec{E}_{s} + \vec{E}'$$
 (2.10)

dengan  $\vec{E}_D$  adalah medan listrik primer yang ditimbulkan oleh pelat sejajar bermuatan ditulis dengan persamaan  $\vec{E}_D = \frac{\sigma}{\epsilon} \hat{n}$ ,  $\vec{E}_P$  adalah medan yang ditimbulkan oleh muatan polarisasi pada permukaan luar dielektrik dengan rapat permukaan muatan polarisasi  $\sigma_P = \vec{P} \cdot \hat{n} = \vec{P} \cdot \vec{E}_s$  adalah medan yang ditimbulkan oleh muatan polarisasi pada permukaan s dengan rongga berbentuk bola  $\vec{E}_s = \frac{1}{3 \epsilon_0} \vec{P}$ , dan  $\vec{E}'$  adalah medan lokal yang ditimbulkan oleh semua dipol di dalam s. Karena  $\vec{E} = \vec{E}_D + \vec{E}_P$ , maka persamaan (2.10) dapat ditulis:

$$\vec{\mathbf{E}}_{m} = \vec{\mathbf{E}} + \frac{1}{3 \in_{0}} \vec{\mathbf{P}} + \vec{\mathbf{E}}' \tag{2.11}$$

Medan  $\vec{E}'$  akan berharga nol jika di dalam rongga s terdapat banyak dipol yang diarahkan sejajar tetapi tersebar secara acak kedudukannya, dan jika tidak ada hubungan antara kedudukan dipol tersebut. Inilah keadaan yang mungkin paling

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this content is a submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this content is a submission of the purpose of preservation.

banyak terdapat di dalam gas atau zat cair. Demikian juga jika dipol didalam rongga s terletak pada kedudukan atom pada kristal berbentuk kubik (kristal dengan kesimetrian tinggi).  $\vec{E}'$  tidak sama dengan nol jika bahan mengandung beberapa macam molekul, sehingga  $\vec{E}'$  pada berbagai kedudukan molekul dapat berbeda, hal inilah yang menyebabkan sifat kelistrikan yang anisotrop (Reitz, 1993).

Rapat permukaan muatan polarisasi diberikan oleh komponen polarisasi yang tegak lurus permukaan tersebut, dan rapat volume muatan polarisasi merupakan ukuran ketidakseragaman polarisasi didalam bahan . masing-masing ditulis dengan  $\sigma_P = \bar{P} \cdot \hat{n} \ \text{dan} \ \rho_P = -\nabla \cdot \bar{P} \quad \text{(Reitz, 1993)}. \text{ Sehingga muatan polarisasi total bahan dielektrik didefinisikan :}$ 

$$q_{P} = \int_{v} (-\nabla \cdot \vec{P}) d\tau + \oint_{s} \vec{P} \cdot \hat{n} d\vec{A}$$
 (2.12)

q<sub>p</sub> harus sama dengan nol, karena berdasarkan penalaran bahwa dielektrik secara keseluruhan tidak bermuatan titik. Hasil ini dapat segera terlihat dari persamaan (2.12), yang jelas mempunyai harga nol sebagai akibat teorema divergensi.

Dari tinjauan secara makroskopik, perilaku bahan dielektrik hanya ditentukan oleh hubungan yang diperoleh dari percobaan, yang disebut persamaan dasar. Bila arah polarisasi selalu sama dengan arah medan listrik penyebab polarisasi itu, maka bahan tersebut isotrop, kategori ini meliputi zat alir, padatan polikristalin dan amorf. sehingga dari persamaan (2.11) dapat didefinisikan dengan persamaan dasar (Reitz, 1993):

document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translat mission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of

on for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

$$\vec{P}_{m} = \chi \in_{0} \vec{E}_{m} \tag{2.13}$$

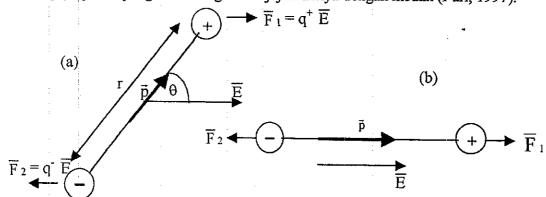
dengan  $\chi$  disebut suseptibilitas listrik dari bahan.  $\chi$  ini menyatakan sulit tidaknya suatu bahan untuk terpolarisasi. Untuk ruang hampa  $\chi=0$ , sehingga  $\vec{P}=0$ . Dengan menerapkan persamaan (2.13) dan  $\epsilon=\epsilon_0+\chi$  ke persamaan (2.7) didapat persamaan untuk  $\vec{D}$  dalam bahan isotrop, yaitu:

$$\bar{D} = \in \bar{E}$$
(2.14)

sehingga konstanta dielektrik  $\in_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \frac{\chi}{\epsilon_0}$ . Satuan  $\epsilon_1 \in \epsilon_0$ , dan  $\chi$  adalah sama yaitu  $C^2/N.m^2$ , sehingga  $\epsilon_r$  tidak memiliki satuan.

## II. 6 Polarisabilitas Dipol

Seperti molekul H<sub>2</sub>O, molekul KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> memiliki momen dipol permanen yang disebut dipol. Jika dipol dikenakan medan luar maka setiap dipol mengalami momen gaya puntir yang cenderung mensejajarkannya dengan medan (Puri, 1997).



Gambar 2.7 (a) Dipol listrik yang dikenai medan listrik luar  $\overline{E}$ , (b) Dipol listrik dalam keadaan kesetimbangan.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of

Polarisasi molekul dalam medan listrik ditentukan oleh polarisasbilitas  $\alpha$  dipol. Polarisabilitas didefinisikan sebagai momen dipol suatu molekul persatuan medan yang menyebabkan polarisasi, ditulis dengan persamaan :

$$\alpha = \frac{\bar{p}}{\bar{E}} \tag{2.15}$$

dari persamaan diatas makin besar polarisabilitas molekul, makin besar pula dipol yang diinduksi oleh medan tersebut. Jika ada N molekul per satuan volume, maka polarisasi  $\bar{P} = N\bar{p}_{m}$ , dengan menggabungkan hasil ini dengan persamaan (2.15) maka didapat :

$$\vec{P} = N\alpha \vec{E}_{m} \tag{2.16}$$

Dari persamaan (2.11) dan (2.16) diperoleh:

$$\overline{P} = N \alpha \left( \overline{E} + \frac{1}{3 \epsilon_0} \overline{P} \right)$$
 (2.17)

dari persamaan (2.13) dan persamaan (2.17) maka didapatkan :

$$\chi = \frac{\overline{P}}{\epsilon_0 \, \overline{E}} \tag{2.18}$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translat submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of the purposes of security, back up and preservation. (http://enripts.updip.as.id)

$$= \frac{N\alpha/\epsilon_0}{1-\frac{N\alpha}{3\epsilon_0}}$$

dengan menggunakan persamaan  $\in_r = 1 + \chi$  maka persamaan (2.18) menjadi :

$$\epsilon_{r} = 1 + \frac{N\alpha/\epsilon_{0}}{1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_{0}}}$$

atau

$$\epsilon_{\rm r} = \frac{1 + \frac{2 \,\mathrm{N} \,\alpha}{3 \,\epsilon_{\rm o}}}{1 - \frac{\mathrm{N} \,\alpha}{3 \,\epsilon_{\rm o}}} \tag{2.19}$$

dari persamaan diatas dapat ditulis :

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \tag{2.20}$$

# П. 7 Hubungan antara Konstanta Dielektrik dengan Temperatur.

Dari persamaan (2.19) konstanta dielektrik dapat ditulis (Kittel, 1998):

$$\epsilon_{\rm r} = \frac{1 + \frac{2 \alpha}{3 \epsilon_0} \sum_{\rm j} N_{\rm j} \alpha_{\rm j}}{1 - \frac{\alpha}{3 \epsilon_0} \sum_{\rm j} N_{\rm j} \alpha_{\rm j}} \tag{2.21}$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that JNDIP-IR may, without changing the content, translate submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of submission for purposes of security, track-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

dimana  $\alpha_j$  adalah elektron polarisabilitas ionic dari j ion dan  $N_j$  adalah jumlah ion j per unit volum. Persamaan diatas dapat dasumsikan bahwa medan lokal dari atom

sebanding dengan 
$$\overline{E} + \frac{\overline{P}}{3\epsilon_0}$$
 untuk  $\sum_j N_j \alpha_j = 3\epsilon_0$  dengan

$$\frac{\epsilon_{r} - 1}{\epsilon_{r} + 2} = \frac{1}{3\epsilon_{0}} \sum_{i} N_{i} \alpha_{i}$$
(2.22)

dengan pembagian  $\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$  didapat 1 - 3  $\frac{1}{\epsilon_r}$  dengan mensubsitusikan  $\frac{1}{\epsilon_r} = s$  maka

persamaan (2.22) menjadi:

$$\frac{1}{3 \in_{0}} \sum_{j} N_{j} \alpha_{j} = 1 - 3s$$
 (2.23)

dengan s << 1, konstanta dielektrik menjadi:

$$s \cong \frac{(T - Tc)}{\xi} \tag{2.24}$$

dengan  $\xi$  adalah konstanta, karena  $\epsilon_r = \frac{1}{s}$  maka :

$$\epsilon_{\rm r} = \frac{\xi}{\text{T - Tc}} \tag{2.25}$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of the content of the purpose of preservation (but of the copyright owner(s)).

Energi potensial dipol permanen dalam medan listrik  $\overline{E}$  adalah :

$$U = -p \overline{E} \cos \theta \tag{2.26}$$

Menurut asas mekanika statistik energi molekul harus mencakup energi kinetik  $E_k$  dan energi potensial U. Untuk menghitung populasi / jumlah yang memiliki energi U ditulis dengan persamaan :

$$N = N_0 \cdot e^{E/kT}$$
 (2.27)

Dengan N = distribusi Boltzman

$$N = N_0 \cdot e^{-U/kT} d\Omega$$
 (2.28)

karena energi kmetik molekul tidak begantung pada medan listrik maka sebaran kecepatan dapat diabaikan. Momen dipol efektif adalah komponen dipol sepanjang arah medan, yaitu p  $\cos \theta$ . Dengan menggunakan faktor diatas nilai rata-rata momen dipol efektif adalah :

$$\bar{p} = \frac{\int p \cos \theta \cdot e^{pE_{m} \cos \theta / kT} d\Omega}{\int e^{pE_{m} \cos \theta / kT} d\Omega}$$
(2.29)

dengan  $d\Omega=2$   $\pi$  sin  $\theta$   $d\theta$  dan batas  $\theta$  adalah 0 dan  $\pi$ , maka persamaan (2.29) menjadi :

$$\bar{p} = \frac{p \int_0^{\pi} e^{pE\cos\theta/kT} \cdot \cos\theta \sin\theta \,d\theta}{\int_0^{\pi} e^{pE\cos\theta/kT} \cdot \sin\theta \,d\theta}$$
 (2.30)

misalkan  $x = \frac{pE}{kT}$ ,  $y = \cos\theta$ , dan dy = -  $\sin\theta$  d $\theta$ . persamaan (2.30) menjadi :

$$\bar{p} = \frac{p \int_{-1}^{1} y e^{xy} dy}{\int_{-1}^{1} e^{xy} dy}$$
(2.31)

atau 
$$\frac{p}{p} = \frac{e^{x} + e^{-x}}{e^{x} - e^{-x}} - \frac{1}{x}$$

$$\overline{p} = \coth x - \frac{1}{x} \equiv L(x)$$
 (2.32)

dengan L(x) disebut fungsi langevin. Untuk x << 1 atau  $p \, \overline{E} << k T$ . Untuk medan yang tidak terlalu besar dan untuk temperatur yang tidak terlalu kecil, didapat :

$$L(x) = \frac{x}{3} = \frac{p\overline{E}}{3kT}$$
 (2.33)

Dari persamaan (2.32) dan (2.33) polarisasi P menjadi:

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of submission for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

$$\overline{P} = N\overline{p} = \frac{Np^2\overline{E}}{3kT}$$
 (2.34)

Dan polarisabilitas dipol per molekul adalah :

$$\alpha_{\rm d} = \frac{{\rm p_0}^2}{3{\rm kT}} \tag{2.35}$$

Dari persamaan (2.35) untuk nilai polarisablitas pada molekul polar adalah (Wangness, 1986):

$$\alpha_{t} = \alpha + \alpha_{d} = \alpha + \frac{p_0^2}{3kT}$$
(2.36)

dari persamaan (2.20) dan (2.36) diperoleh:

$$\alpha + \frac{p_0^2}{3kT} = \frac{3 \in_0 (\in_r - 1)}{N(\in_r + 2)}$$

maka:

$$\frac{(\in_{r}-1)}{(\in_{r}+2)} = \frac{N}{3\in_{0}} \left(\alpha + \frac{p_{0}^{2}}{3kT}\right)$$

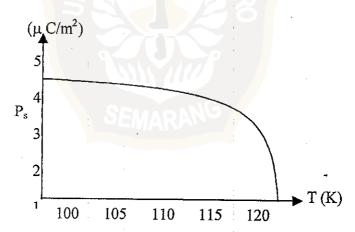
$$(2.37)$$

## II. 8 Hukum Currie-Weiss

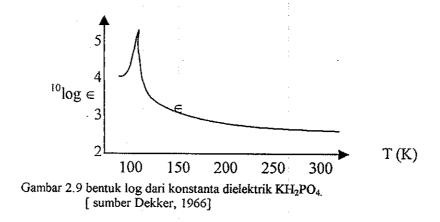
Hukum Currie-Weiss mengatakan bahwa suseptibilitas suatu zat paramagnetik berbanding terbalik dengan suhu termodinamik (T). Konstanta dielektrik KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> pada temperatur curie mengikuti aturan Currie-Weiss (Dekker, 1966):

$$\epsilon_{\rm r} = B + \frac{C}{\left(T - T_{\rm c}\right)} \tag{2.38}$$

dengan T adalah temperatur dalam K dan B adalah konstanta sebesar 4,5 dan C adalah konstanta Currie sebesar 3100. Persamaan ini berlaku untuk suhu diatas temperatur Currie Pada gambar 2.8 dan 2.9 menperlihatkan sifat KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> terhadap pengaruh temperatur.



Gambar 2.8 pengutuban spontan dari KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> sebagai fungsi temperatur. [sumber Dekker, 1966]



## II. 9 Ferroelektrik

Ferroelektrik adalah fenomena dengan polarisasi spontan, artinya polarisasi material tanpa pengaruh medan luar. Kristal ferroelektrik memiliki pusat positif dan negatif yang tidak berhimpit sehingga momen dipol tidak sama dengan nol ferroelektrik mengalami temperatur transisi yang disebut temperatur Currie.

Dari persamaan (2.15) diatas bahwa medan molekul  $\vec{E}_m$  yang menyebabkan polarisasi molekul satu-satu. Pada sebagian besar persoalan, polarisasi sebanding dengan medan  $\vec{E}$ , sehingga  $\vec{E}_m$  menjadi nol jika  $\vec{E}$  menuju nol, tetapi pada keadaan tertentu dengan polarisasi tetap (atau spontan), jika  $\vec{E}$  dibuat nol, maka  $\vec{E}_m = \frac{1}{3 \in_0} \vec{P}$  atau dengan kata-kata, jika ada polarisasi  $\vec{P}$ , maka tinbul medan listrik pada molekul, yang cenderung mempolarisasikan molekul itu, dan jika hasil ini dimasukkan kepersamaan (2.14) didapat (Kittel, 1996).:

$$\frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = 1 \tag{2.39}$$

this document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate ubmission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of

Persaman (2.39) merupakan syarat untuk pengutuban tetap atau ferroelektrik Bahan yang dikenai medan  $\vec{E}$  akan mengubah arah dipol. Orientasi dipol-dipol molekul akan mensejajarkan diri ke arah medan. Ketika pensejajaran sempurna dari semua dipol, berarti polarisasi mengalami kejenuhan (saturasi). Jika arah orientasi dipol-dipol merupakan deretan sejajar yang searah, berarti bahan yang tersusun dari molekul-molekul ini bersifat ferroelektrik. Tetapi jika terjadi deretan sejajar bergantiganti arah dari dari molekul ke molekul dengan orientasi dipol yang teratur dan momen dipol bersih nol disebut antiferroelektrik. Untuk deretan orientasi dipol yang teratur tetapi momen dipol tidak sama dengan nol, bahan tersebut disebut ferielektrik. Contoh bahan ferroelektrik adalah KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> dengan Tc = 123 K. Sedangkan temperatur Currie ferroelektrik adalah suhu temperatur Currie dimana bahan ferroelektrik mengalami transisi fasa struktur ke dalam kondisi tertentu dimana polarisasi spontan lenyap bila tidak dikenai medan listrik luar. Untuk bahan KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> perubahan struktur yang terjadi dari bentuk orthorombik menjadi tetragonal (West, 1984).

## II. 10 Pelat sejajar

ission for purposes of security, pack-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

Apabila sebuah pelat logam diberi suatu muatan netto, muatan ini akan menyebar sendiri keseluruh permukaan luar pelat tersebut, dan jika tebal pelat itu merata dalam luasnya, muatan akan tersebar merata persatuan luasnya dan sama pada kedua permukaannya (Sears, Zemansky, 1994).

is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translated

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$
Permukaan 1
Permukaan 2
$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1$$

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2$$

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2$$

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2$$

Gambar 2. 10 medan listrik di dalam dan diluar pelat konduktor bermuatan

Misalkan  $\sigma$  rapat muatan permukaan pada kedua belah permukaan pelat. Di titik a, komponen kuat medan listrik  $E_1$  yang ditimbulkan muatan permukaan pada muka kiri pelat itu, mengarah ke kiri dan besarnya  $\frac{\sigma}{2 \in_0} \overline{n}$ . Komponen  $E_2$  yang ditimbulkan muatan permukaan pada muka kanan pelat itu, juga mengarah ke kiri dan besarnya  $\frac{\sigma}{2 \in_0} \overline{n}$ . Besar kuat medan resultan E karena itu ialah  $\frac{\sigma}{\epsilon_0} \overline{n}$ . Di titik b, di dalam pelat, arah kedua komponen kuat medan listrik berlawanan dan resultannya sama dengan nol. Di titik c, kedua komponen itu juga dipertambahkan dan besar resultannya ialah  $\frac{\sigma}{\epsilon_0} \overline{n}$ , mengarah ke kanan.

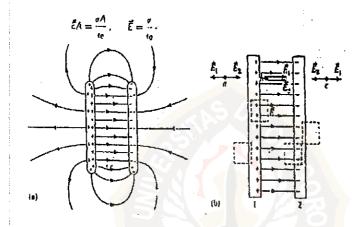
Apabila dua buah pelat logam pararel yang luas dan-jarak yang memisahkannya sama besar, seperti ditunjukkan dalam gambar 2.11, diberi muatan yang sama besar dan berlawanan tanda, medan diantara dan disekitarnya mendekati seperti yang diperlihatkan dalam gambar 2.11 (a). sebagian besar muatan itu mengumpul pada permukaan-permukaan pelat yang saling berhadapan, dan medan di

document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translated and some some some some some some copy of the content of the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of the content of t

sion for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

ruang pemisah pada hakekatnya merata sebesar  $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ , sedangkan pada permukaan luar

kedua pelat itu hanya ada sedikit muatan, dan penyebaran medan pada tepi pelat agak merumbai. Apabila jarak pemisahnya dibuat jauh lebih kecil dari luas pelatnya, perumbaian tersebut relatif akan berkurang dan biasanya diabaikan untuk penyederhanaan perhitungan, karena itu medan antara dua pelat bermuatan dan berlawanan tanda dianggap merata seperti gambar 2.11 (b), dan muatannya tersebar secara merata pada permukaan yang berhadapan.



Gambar 2.11 medan listrik antara dua pelat pararel yang bermuatan berlawanan

Setiap dua konduktor yang dipisahkan oleh isolator dikatakan membentuk kapasitor. Kapasitansi C sebuah kapasitor didefinisikan sebagai perbandingan besar muatan q pada salah satu konduktornya terhadap besar beda potensial V<sub>ab</sub> antara kedua konduktor tersebut :

$$C = \frac{q}{V_{ch}} \tag{2.40}$$

hil document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translat ubmission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy o

sion for purposes of security, back-up and preservation. ( http://eprints.undip.ac.id)

er(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, transla

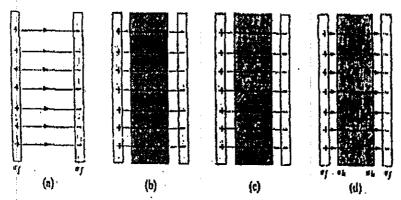
satuan kapasitansi ialah satu coulomb per volt (1 C V<sup>-1</sup>) atau sama dengan satu farad (1F). Dari penjelasan diatas bahwa kuat medan listrik antara sepasang pelat pararel yang amat berdekatan dalam ruang hampa ialah  $E = \sigma/\epsilon_0$  atau dapat juga ditulis  $E = q / \epsilon_0 A$ , dengan  $A (m^2)$  adalah luas tiap pelat dan q muatan salah satu pelat. Karena intensitas listrik atau gradien potensial antar pelat itu merata, beda potensial antara pelat ialah  $V_{ab} = E d = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{qd}{A}$  dengan d (meter) adalah jarak antar pelat, dan dengan menerapkan hasil ini pada persamaan (2.40) maka kapasitansi kapasitor pelat sejajar dalam ruang hampa dapat ditulis dengan (Sears, Zemansky, 1994):

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.41}$$

Bila ada bahan dielektrik diantara pelet sejajar, akan tibul muatan induksi pada permukaan dielektri dan di dalam pelat konduktor, tetapi di dalam konduktor muatan induksi ini akan menghasilkan muatan listrik sehingga kuat medan di dalam konduktor menjadi nol. Dalam dielektrik, muatan induksi menimbulkan muatan listrik induksi. Timbulnya muatan listrik induksi diterangkan dalam polarisasi molekul yang menimbulkan momen dipol listrik atau momen dipol terinduksi seperti terlihat dalam gambar 2.12, dan medan listrik dalam dielektrik adalah E = σ/∈. Hal ini menyatakan bahwa medan listrik dalam dielektrik berharga sama dengan medan listrik tanpa dielektrik, hanya permitivitas ruang hampa ∈₀ diganti dengan permitivitas dielektrik ∈. Dengan demikian kapasitansi kapasitor pelat sejajar juga berubah menjadi (Sutrisno, Gie, 1986):

edium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one





Gambar 2.12 (a) medan listrik antara dua pelat bermuatan berlawanan. (b) sudah ada dielektrik. (c) muatan yang terinduksi pada permukaan dan medannya. (d) medan resultan bila ada dielektrik diantara kedua pelat bermuatan.

## П. 11 Perpindahan Panas

Perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut. Perpindahan panas pada umumnya mengenal tiga cara pemindahan panas yang berbeda. Tiga cara perpindahan panas tersebut yaitu konduksi, radiasi, konveksi (Kreith, 1986).

Konduksi adalah proses perpindahan panas dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Perpindahan panas yang terjadi antara pemanas dan kapasitor adalah perpindahan panas secara konduksi, dimana pemanas menempel langsung pada pelat sejajar dan pelat sejajar menempel langsung pada kapasitor.