

## RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN KOEFISIEN DIFUSI *NaCl* PADA MATERIAL KARBON NANOPORI

### DESIGN AND REALIZATION OF INSTRUMENT FOR DETERMINING THE *NaCl* DIFFUSION COEFFICIENT IN NANOPOROUS CARBON MATERIAL

Aziz Apriyanto<sup>1</sup>, Dr. Ismudiaty Puri Handayani<sup>2</sup>, Dr. Memoria Rosi<sup>3</sup>,

<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

<sup>1</sup>ajisaprl@telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>iphandayani@telkomuniveristy.ac.id, <sup>3</sup>memoriarosi@telkomuniversity.ac.id

#### Abstrak

Dalam tugas akhir ini dilakukan penelitian untuk mengetahui koefisien difusi ion *NaCl* terhadap material karbon nanopori dengan bahan aktivasi *KOH*. Perhitungan koefisien difusi dilakukan dengan menggunakan data perubahan konduktivitas listrik yang terjadi pada larutan murni (*aquadest*) yang terhubung dengan wadah yang berisi larutan *NaCl* 0.5 mol/l. Sistem pengukuran dilengkapi dengan katup pemisah antara wadah pertama dengan wadah kedua yang akan terbuka ketika proses pengukuran perubahan konduktivitas listrik pada wadah dimulai. Pengukuran perubahan konduktivitas listrik pada wadah kedua akan tercatat secara otomatis oleh mikrokontroler Arduino. Proses perpindahan molekul  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  terjadi dari wadah pertama menuju wadah kedua melalui membran karbon nanopori. Penelitian ini diawali dengan mengetahui karakterisasi hubungan antara kenaikan konsentrasi *NaCl* pada larutan terhadap konduktivitas listrik larutan tersebut. Hasil karakterisasi menunjukkan ada hubungan linier antara konsentrasi *NaCl* dengan konduktivitas larutan. Dengan menggunakan prinsip hukum Fick, nilai koefisien difusi ditentukan berdasarkan perubahan konsentrasi *NaCl* pada wadah yang mula-mula berisi larutan murni (*aquadest*). Perubahan konsentrasi ini tercermin pada perubahan konduktivitas larutan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai koefisien difusi untuk ketebalan membran 1 mm adalah  $6.59 \times 10^{-5}$ , untuk ketebalan 2 mm adalah  $4.69 \times 10^{-5}$ , dan untuk ketebalan 3 mm adalah  $2.30 \times 10^{-5}$ . Adanya perbedaan nilai ini diperkirakan karena terdapatnya ketidaksempurnaan pada membran karbon nanopori sehingga molekul-molekul *NaCl* yang berdifusi melalui membran yang lebih tebal akan mengalami lebih banyak hambatan di dalam membran dibandingkan dengan molekul yang melewati membran dengan ketebalan yang lebih rendah.

**Kata kunci:** Koefisien Difusi, Konduktivitas, Konsentrasi, Karbon nanopori

#### Abstract

*In this final project an instrument has been built to study the diffusion coefficient of NaCl through KOH activated nanopore carbon layer. Diffusion coefficient calculation is conducted by using Fick's principle which formulates the relation between changes of concentration as a function of time and the diffusion coefficient. In this study, we observed a linear relation between conductivity and concentration. Hence, we built an instrument which consists of container filled with pure water, a container filled with 0.5 mol/l NaCl water, a nanoporous membrane separating above mentioned container, and electrical conductivity measurement system with arduino microcontroller for real time monitoring of conductivity changes in the pure water filled container. We found that the diffusion coefficient for 1 mm thickness of nanoporous carbon membrane is  $6.59 \times 10^{-5}$ , while they are  $4.69 \times 10^{-5}$ , and  $2.30 \times 10^{-5}$  for 2 mm and 3 mm thickness respectively. These difference value of diffusion coefficient might due to the presence of defects. The Na and Cl ions might have more obstacles when they pass the thicker sample.*

**Keyword:** coefficient diffusion, conductivity, concentration, nanopore carbon

#### 1. Pendahuluan

Difusi merupakan perpindahan molekul dari suatu media dengan konsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah. Gradien konsentrasi molekul terhadap suatu titik dengan titik yang lainnya dan fluks persebaran molekul memiliki kaitan yang erat dengan fenomena difusi [1]. Pada larutan yang mengandung ion, perubahan konsentrasi akibat proses difusi memiliki kaitan yang erat dengan perubahan konduktivitas larutan yang nilainya dapat diukur dengan menggunakan *conductivity meter*. Elektroda pada bagian *conductivity meter* akan menerima respon dari ion-ion yang berada pada larutan tersebut. Semakin banyak konsentrasi ion pada larutan tersebut, maka semakin banyak ion-ion yang akan menyentuh lapisan elektroda, pembacaan konduktivitas dan larutanpun akan semakin besar.

Pada superkapasitor, proses difusi terjadi pada medium karbon nanopori yang terletak pada dua buah elektroda. Pada penelitian yang dilakukan oleh A. Celzard et.al [2], pengamatan sifat transport ion pada lapisan karbon nanopori dilakukan dengan memperhatikan perubahan konsentrasi larutan elektrolit sebagai akibat dari proses difusi ion di dalam pelarut. Merujuk pada penelitian sebelumnya [2], pengukuran koefisien difusi ion terhadap karbon nanopori dilakukan untuk menguji sifat transport ion yang melewati karbon nanopori agar dapat menghasilkan material karbon nanopori yang baik bagi superkapasitor [3].

Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan pengukuran koefisien difusi larutan garam NaCl dengan konsentrasi 0,5 mol/l melalui sekat karbon nanopori dengan melakukan analisa perubahan konduktivitas larutan pada temperature ruangan. Pengukuran koefisien difusi dilakukan pada beberapa sample karbon nanopori dengan variasi ketebalan.

2. Dasar Teori

2.1. Teori Dasar Difusi

Proses difusi dijelaskan dalam hukum pertama Fick [2] yang dituliskan pada Persamaan 1.

$$J = -D \frac{dC}{dx} \tag{1}$$

dengan  $J$  merupakan fluks difusi ( $\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ ),  $D$  adalah koefisien difusi ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) dan  $\frac{dC}{dx}$  adalah gradient konsentrasi molekul ( $\text{mol/m}^3$ ). Tanda negatif pada persamaan 1. menunjukkan bahwa proses difusi akan menurunkan gradient konsentrasi. Koefisien difusi ion dalam suatu pelarut dapat ditentukan dengan memanfaatkan data perubahan konduktivitas larutan. Pengukuran perubahan konduktivitas dilakukan untuk mengetahui perubahan konsentrasi garam pada larutan tersebut.

Dalam penelitian ini, digunakan dua buah wadah yang masing-masing berisi larutan NaCl dan pelarut murni. Proses difusi ion akan terjadi pada sample karbon nanopori dengan jarak yang merupakan ketebalan sample karbon nanopori tersebut ( $L$ ). Fenomena difusi pada sistem yang digunakan pada penelitian ini akan menggunakan Persamaan 2.

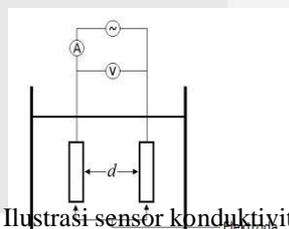
$$D = \frac{VL \cdot C_2}{C_1 t} \tag{2}$$

Proses difusi berlangsung dari wadah dengan larutan konsentrasi tinggi ( $C_1$ ) menuju wadah dengan larutan konsentrasi rendah ( $C_2$ ) melewati sample karbon nanopori dengan luas area ( $S$ ) selama interval waktu tertentu ( $t$ ).

2.2. Teori Dasar Konduktivitas

Konduktivitas larutan menunjukkan kemampuan suatu larutan dalam menghantarkan listrik. Pada larutan garam, daya hantar yang dimiliki larutan tersebut dipengaruhi oleh konsentrasi garam yang terkandung dalam pelarut. Semakin banyak jumlah garam yang terkandung, maka jumlah ion Na dan Cl dalam larutan akan semakin bertambah. Penambahan jumlah ion ini akan menyebabkan kemampuan larutan dalam menghantarkan muatan menjadi semakin baik, yang berarti konduktivitas larutan tersebut akan semakin tinggi.

Pengukuran konduktivitas dilakukan dengan menggunakan *conductivity meter*. Pengukuran konduktivitas listrik larutan dilakukan pada penelitian ini menggunakan sensor konduktivitas 2-pole dengan bahan Platina. Pada sensor konduktivitas 2-pole, tegangan dialiri menuju larutan uji melalui plat elektroda. Besar tegangan tersebut kemudian akan dibaca kembali melalui rangkaian penguat tegangan seperti pada Gambar 2.5. Pembacaan besar tegangan akan berubah bergantung kepada kandungan ion pada larutan uji. Ilustrasi sensor konduktivitas 2-pole dapat dilihat pada Gambar 1.



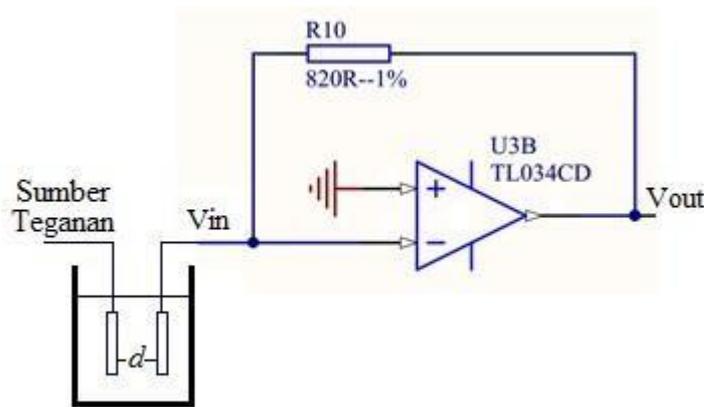
Gambar 1. Ilustrasi sensor konduktivitas 2-pole

Pada Gambar 1, pengukuran resistansi larutan uji dapat dilakukan pada daerah diantara kedua buah elektroda. Pada pengukuran konduktivitas, larutan uji yang memiliki nilai resistansi akan diberikan tegangan yang besarnya tetap melalui elektroda. Resistansi yang dimiliki larutan uji tersebut dapat diketahui dengan persamaan:

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{d}{A} \tag{3}$$

Dengan  $R$  adalah resistansi ( $\Omega$ ),  $d$  merupakan jarak antara kedua elektroda (cm),  $\sigma$  merupakan konduktivitas listrik (mS/cm), dan  $A$  merupakan luas penampang elektroda

( $\sigma$ ). Di dalam *conductivity meter*, terdapat hambatan referensi ( $R_{10}$ ). Hambatan referensi ini berfungsi untuk mengetahui besar hambatan yang dimiliki larutan uji melalui perbandingan tegangan yang diberikan ke larutan uji ( $V_{in}$ ) terhadap tegangan yang terbaca pada rangkaian penguat ( $V_{out}$ ) seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2 Rangkaian Penguat Tegangan *Conductivity meter*

Sinyal tegangan output dapat diketahui dengan mengalikan tegangan input dari sumber tegangan yang telah melewati larutan uji dengan perbandingan  $R_{10}$  dan resistansi larutan ( $R$ ). Tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian pada Gambar 2 dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$V_{out} = \frac{R_{10}}{R} \times V_{in} \tag{4}$$

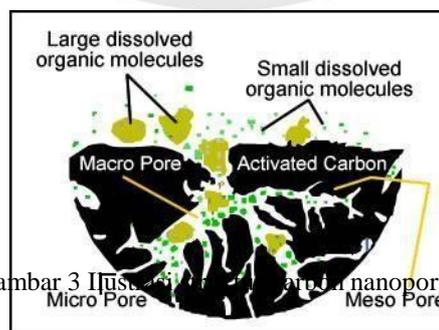
dengan mensubstitusikan Persamaan 3 ke 4, maka konduktivitas ( $\sigma$ ) dapat dituliskan.

$$\sigma = \frac{a/A}{R_{10} \times V_{in}} \times V_{out} \tag{5}$$

dengan  $\sigma$  adalah konduktivitas larutan ( $S/cm$ ),  $R_{10}$  hambatan pembanding pada rangkaian ( $\Omega$ ),  $V_{in}$  adalah tegangan input Gambar 2,  $V_{out}$  merupakan konstanta yang biasa dikenal dengan *cell constant* ( $cm^{-1}$ ) yang nilainya bergantung pada dimensi sensor. Tegangan output ( $V_{out}$ ) yang terukur kemudian akan dikonversi mejadi data konduktivitas oleh mikrokontroller melalui analog to digital converter.

### 2.3. Karbon Nanopori

Karbon nanopori merupakan material karbon aktif yang memiliki ukuran pori dalam rentang mikropori (<2nm), mesopori (2-50nm), dan makropori (>50nm). Distribusi ukuran pori ini memiliki pengaruh terhadap nilai kapasitansi pada superkapasitor. Bagian mikropori aka mejadi tempat penyimpanan ion, sedangkan bagian mesopori akan menjadi jalur akses ion menuju mikropori. Ilustrasi struktur pori pada karbon nanopori diberikan oleh Gambar 3.

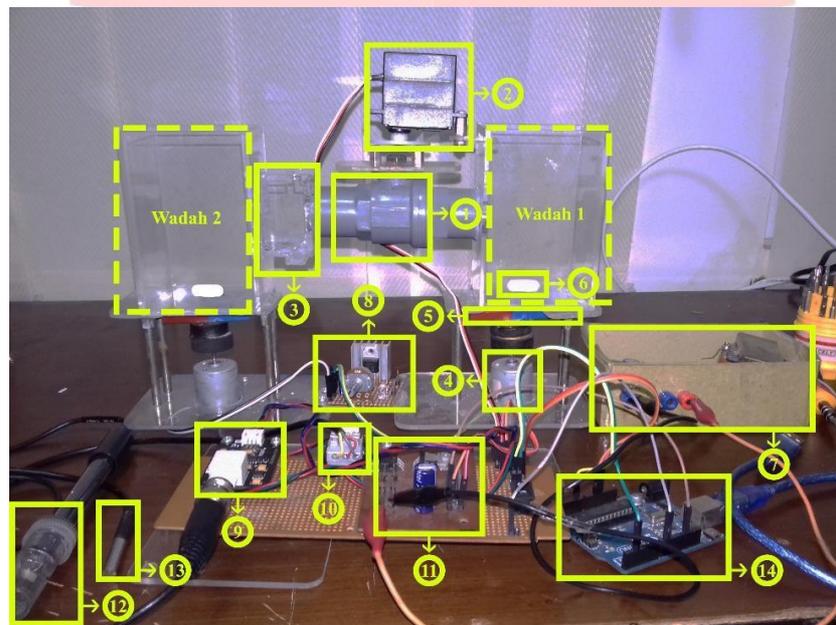


Gambar 3 Ilustrasi struktur pori pada karbon nanopori [8]

Pada *device* superkapasitor, karbon nanopori merupakan elektroda yang akan menyimpan ion-ion elektrolit sebagai pembawa muatan. Ion-ion elektrolit tersebut akan mengalami difusi menuju pori pada elektroda karbon nanopori. Pengukuran koefisien difusi pada karbon nanopori merupakan hal yang penting untuk menganalisa transport ion pada elektroda superkapasitor. Koefisien difusi ini dapat mempengaruhi besarnya resistansi serial yang terukur pada superkapasitor [3].

### 3. Pembahasan

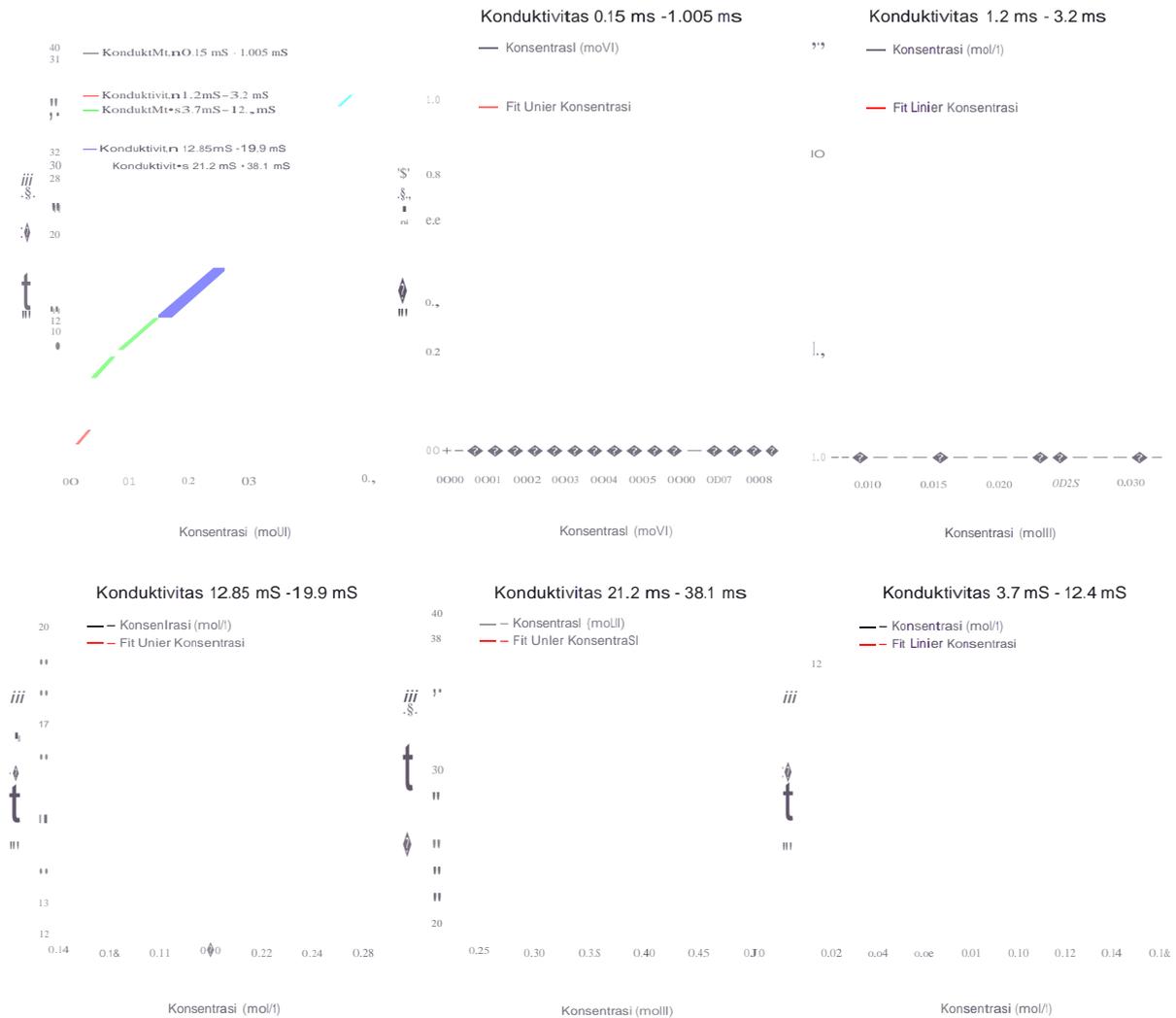
Gambar 3.2 menunjukkan hasil rancangan system pengukuran koefisien difusi yang terdiri atas dua wadah larutan (wadah 1 dan wadah 2) yang dipisahkan oleh katup (1) yang digerakkan oleh motor servo (2) untuk posisi membuka dan menutupnya. Sample karbon nanopori diletakkan pada *platform* (3) yang terletak di antara wadah pertama dan wadah ke dua. Pada bagian bawah masing-masing wadah terdapat motor DC (4) yang pada porosnya terdapat batang magnet (5) yang berfungsi memutar kapsul magnet (6) pengaduk yang terdapat di dalam wadah. Motor DC digerakkan oleh catu daya 12 Volt (7) yang tegangannya dapat divariasikan dengan menggunakan rangkaian *voltage regulator* (8). Pada bagian depan wadah terdapat rangkaian pengolah sinyal konduktivitas (9), pengolah sinyal temperatur (10), dan rangkaian *fixed voltage regulator* (11) yang menghasilkan tegangan 5 volt untuk motor servo. Sensor konduktivitas (12) dan sensor temperatur DS18B20 (13) yang diletakkan pada wadah kedua untuk mengukur perubahan konduktivitas dan temperatur larutan. Data yang terbaca oleh sensor kemudian diolah dengan menggunakan Arduino Uno (14).



Gambar 4. Hasil perancangan alat

#### 3.1 Pengaruh Konduktivitas Listrik terhadap Konsentrasi

Untuk mengetahui konsentrasi larutan uji dilakukan pengukuran nilai konduktivitas listrik pada larutan tersebut. Nilai konduktivitas yang terukur kemudian di-plot sebagai fungsi konsentrasi untuk mendapatkan kurva karakterisasi konduktivitas terhadap konsentrasi. Pada pengukuran ini, dibuat beberapa jenis larutan garam pada konsentrasi 0.001 mol/l sampai 0.15 mol/l. Data pengukuran konduktivitas pada masing-masing larutan garam akan menghasilkan persamaan konversi konduktivitas menjadi konsentrasi. Namun, hasil yang diperoleh tidak memenuhi *trend* linier yang kontinu, sehingga kurva karakterisasi dipisah menjadi beberapa daerah linier yang berbeda-beda. Seperti grafik pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengukuran konduktivitas listrik sebagai pengaruh perubahan konsentrasi NaCl

Titik berwarna hitam merupakan nilai konduktivitas dan garis merah merupakan *fitting* linier yang dilakukan. Variabel sumbu-x merupakan nilai konsentrasi yang telah ditetapkan sebelumnya, sedangkan variabel sumbu-y merupakan nilai konduktivitas listrik dari larutan uji yang terukur dari alat standar.

Ketika data pada Gambar 4.2 diperbesar untuk melihat perubahan data yang lebih jelas, akan terlihat beberapa daerah yang menyimpang dari *trend* linier. Daerah-daerah tersebut yang akan dipisahkan dan diambil persamaan liniernya secara terpisah. Adapun hasil pengukuran untuk mengetahui pengaruh konduktivitas listrik terhadap konsentrasi dapat dilihat pada Tabel 1.

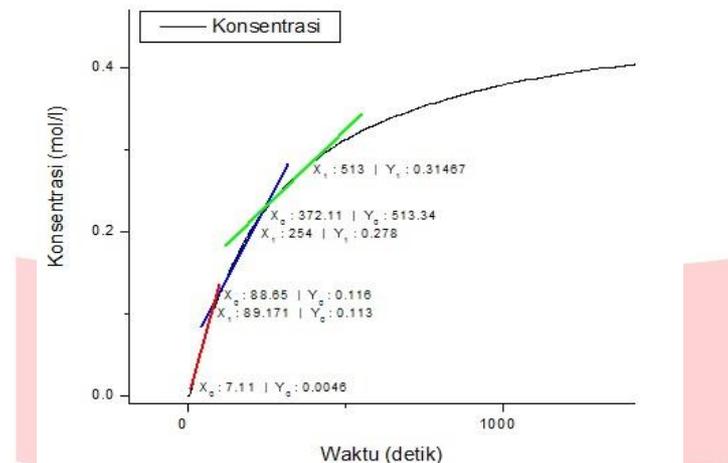
Tabel 1. Persamaan linier pada masing-masing kurva linier

Konsentrasi (mol/l)	Persamaan	Tingkat Ketelitian (%)
0.001 – 0.0075	$y = 130.51x + 0.043$	99.39
0.0105 – 0.03	$y = 93.901x + 0.3778$	98.35
0.035 – 0.145	$y = 78.87x + 1.1152$	99.22
0.15 – 0.255	$y = 67.621x + 2.6587$	99.52
0.26 – 0.5	$y = 71.004x + 2.7572$	99.55

### 3.2 Pengujian Sample

#### 3.2.1 Pengujian Sample Ketebalan 1 mm

Pengujian pengukuran koefisien difusi dilakukan pada sample karbon nanopori dengan ketebalan 1 mm. Hasil pengukuran perubahan konsentrasi dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva perubahan konsentrasi terhadap waktu

Dari Gambar 4.9, dapat dilihat terdapat beberapa garis lurus pada 3 daerah. Ketiga daerah tersebut dipilih berdasarkan perilaku yang paling mendekati linier dari daerah lainnya. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang paling mendekati bentuk linier sempurna. Masing-masing daerah linier akan dimasukkan ke model persamaan 2.8 untuk dibandingkan daerah mana yang hasilnya sama atau mendekati dengan sample yang lainnya. Dari ketiga daerah linier tersebut, didapatkan masing-masing persamaan linier. Nilai koefisien difusi untuk masing-masing daerah linier dapat dilihat pada Tabel 2.

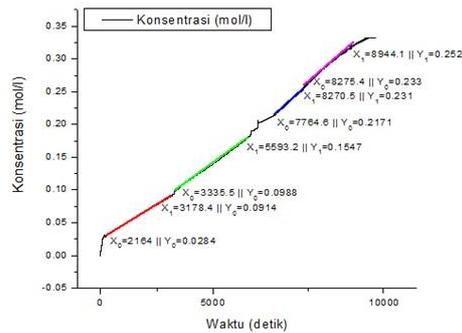
Tabel 2. Hasil perhitungan koefisien difusi pada ketiga daerah linier

Daerah	Parameter					
	Gradien ( $m$ )	Volume ( $V$ )	Tebal Sample ( $L$ )	Luas Area Sample ( $A$ )	Konsentrasi Awal ( $C_1$ )	Koefisien Difusi
Merah	0.00137	0.207 $dm^3$	0.01 $dm$	0.628 $dm^2$	0.5 $mol/l$	$4.52 \times 10^{-4} cm^2/s$
Biru	0.000399897	0.207 $dm^3$	0.01 $dm$	0.628 $dm^2$	0.5 $mol/l$	$6.59 \times 10^{-5} cm^2/s$
Hijau	0.000264767	0.207 $dm^3$	0.01 $dm$	0.628 $dm^2$	0.5 $mol/l$	$8.73 \times 10^{-5} cm^2/s$

Dari Tabel 2, terdapat perbedaan pada nilai koefisien difusi pada masing-masing daerah. Hal ini disebabkan oleh perilaku kurva yang tidak selalu linier pada setiap waktunya. Hasil pengukuran koefisien difusi pada sample lainnya akan dibandingkan untuk melihat daerah mana yang memiliki nilai yang sama atau mendekati. Jika hasilnya sama atau mendekati, maka daerah tersebut yang dapat menghasilkan data valid nilai koefisien difusi.

#### 3.2.2 Pengujian Sample Ketebalan 2 mm

Pengujian selanjutnya yaitu menggunakan sample dengan ketebalan 2 mm. Hasil pengukuran sample 2 mm dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva perubahan konsentrasi terhadap waktu

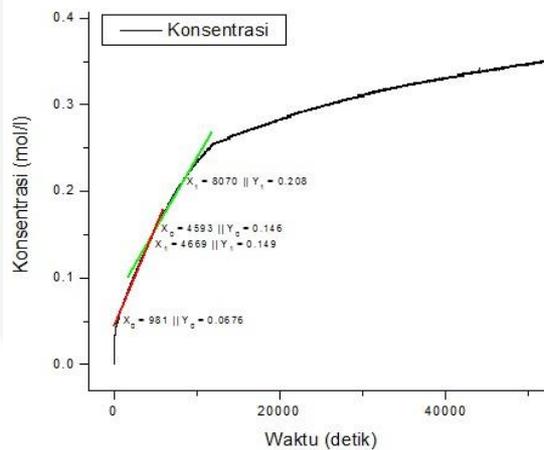
Dari Gambar 7 dapat terlihat 4 daerah linier yang mampu diamati. Koefisien difusi dari keempat daerah linier tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan koefisien difusi pada masing-masing daerah linier

Daerah	Parameter					
	Gradien (m)	Volume (V)	Tebal Sample (L)	Luas Area Sample (A)	Konsentrasi Awal (C <sub>1</sub> )	Koefisien Difusi
Merah	2.084E-5	0.207 <i>dm</i> <sup>3</sup>	0.02 <i>dm</i>	0.628 <i>dm</i> <sup>2</sup>	0.5 <i>mol/l</i>	4.11x10 <sup>-5</sup> <i>cm</i> <sup>2</sup> /s
Hijau	2.73E-5	0.207 <i>dm</i> <sup>3</sup>	0.02 <i>dm</i>	0.628 <i>dm</i> <sup>2</sup>	0.5 <i>mol/l</i>	4.69x10 <sup>-5</sup> <i>cm</i> <sup>2</sup> /s
Biru	2.79E-05	0.207 <i>dm</i> <sup>3</sup>	0.03 <i>dm</i>	0.628 <i>dm</i> <sup>2</sup>	0.5 <i>mol/l</i>	5.51x10 <sup>-5</sup> <i>cm</i> <sup>2</sup> /s
Ungu	2.91E-05	0.207 <i>dm</i> <sup>3</sup>	0.03 <i>dm</i>	0.628 <i>dm</i> <sup>2</sup>	0.5 <i>mol/l</i>	5.76x10 <sup>-5</sup> <i>cm</i> <sup>2</sup> /s

### 3.2.3 Pengujian Sample Ketebalan 3 mm

Pengujian selanjutnya dilakukan pada sample dengan ketebalan 3 mm. Hasil pengujian sample 3 mm dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva perubahan konsentrasi terhadap waktu

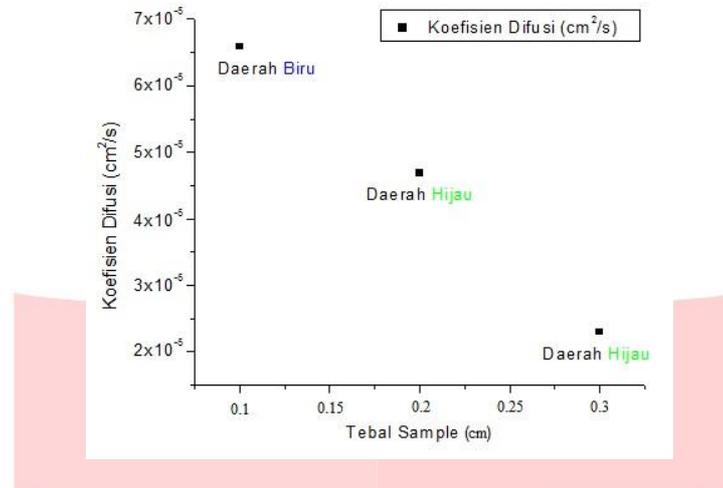
Dari Gambar 7, terlihat bahwa terdapat dua daerah linier terpanjang yang mampu diamati. Kedua daerah ini akan digunakan untuk perhitungan koefisien difusi dan dibandingkan hasil akhirnya dengan sample-sample lainnya. Dari kedua daerah linier tersebut, didapatkan dua buah persamaan linier yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran koefisien difusi pada masing-masing daerah linier

Daerah	Parameter					
	Gradien (m)	Volume (V)	Tebal Sample (L)	Luas Area Sample (A)	Konsentrasi Awal (C <sub>1</sub> )	Koefisien Difusi
Merah	2.17454E-5	0.207 <i>dm</i> <sup>3</sup>	0.03 <i>dm</i>	0.628 <i>dm</i> <sup>2</sup>	0.5 <i>mol/l</i>	2.87x10 <sup>-5</sup> <i>cm</i> <sup>2</sup> /s
Hijau	1.74304E-5	0.207 <i>dm</i> <sup>3</sup>	0.03 <i>dm</i>	0.628 <i>dm</i> <sup>2</sup>	0.5 <i>mol/l</i>	2.30x10 <sup>-5</sup> <i>cm</i> <sup>2</sup> /s

### 3.2.3 Pengaruh Ketebalan Sample Terhadap Koefisien Difusi

Data-data koefisien difusi pada berbagai sample dengan ketebalan yang berbeda yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Nilai koefisien difusi molekul NaCl terhadap masing-masing sample dengan ketebalan yang berbeda.

Data yang diperoleh pada Gambar 4.10 merupakan nilai koefisien difusi pada daerah linier dengan tingkat koefisien korelasi yang terbesar dibandingkan dengan daerah linier lainnya. Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa besar koefisien difusi untuk sample dengan ketebalan yang berbeda bernilai diantara rentang  $2.30 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  sampai  $6.59 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Perbedaan nilai ini dikarenakan kecepatan perpindahan molekul yang melewati membran dengan ketebalan yang lebih besar akan lebih lama dibandingkan melewati membran yang ketebalannya lebih rendah.

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan realisasi sistem pengukuran koefisien difusi NaCl terhadap karbon nanopori, dapat ditarik kesimpulan:

1. Kenaikan konsentrasi NaCl memberikan pengaruh kenaikan nilai konduktivitas listrik larutan secara linier. Hal ini menjadi alasan dikembangkannya instrument berbasis pengukuran konduktivitas untuk menentukan koefisien difusi berdasarkan Hukum Fick pada tugas akhir ini.
2. Koefisien difusi yang diperoleh dari pengolahan data perubahan konduktivitas listrik pada larutan NaCl dengan membran karbon nanopori berubah terhadap ketebalan membran. Terjadinya perbedaan nilai koefisien difusi ini diperkirakan karena adanya ketidaksempurnaan pori pada membrane karbon nanopori sehingga molekul-molekul NaCl yang berdifusi melalui membran yang lebih tebal akan mengalami lebih banyak hambatan di dalam membran dibandingkan dengan molekul yang melewati membran dengan ketebalan yang lebih rendah.

## Daftar Pustaka

- [1] Dea, Yustina (2008) Pengontrolan Gerak dan Pembacaan Respon Mikroelektroda Berbasis Komputer.
- [2] Celzard. A., Collas. F., Marêché., Furdin. G., Rey. I. (2001) Porous Double-layer supercapacitors: pole structure versus series resistance.
- [3] B.E. Conway, Electrochemical Supercapacitors, Kluwer Academic Publisher/Plenum Press, Dordrecht/New York, 1999, pp. 335-452.