



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**IDENTIFIKASI LAJU REAKSI PENYISIHAN TIMBAL,  
TEMBAGA, AMONIA, DAN LINEAR ALKIL BENZEN  
SULFONAT DALAM LIMBAH CAIR MELALUI PROSES  
HIBRIDA OZONASI DAN FILTRASI MEMBRAN**

**SKRIPSI**

**DENI FIRMANSYAH  
0706269685**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**IDENTIFIKASI LAJU REAKSI PENYISIHAN TIMBAL,  
TEMBAGA, AMONIA, DAN LINEAR ALKIL BENZEN  
SULFONAT DALAM LIMBAH CAIR MELALUI PROSES  
HIBRIDA OZONASI DAN FILTRASI MEMBRAN**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**DENI FIRMANSYAH  
0706269685**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
KEKHUSUSAN TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Deni Firmansyah**

**NPM : 0706269685**

**Tanda tangan :** 

**Tanggal : 21 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Deni Firmansyah  
NPM : 0706269685  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Identifikasi Laju Reaksi Penysihan Timbal,  
Tembaga, Amonia, dan Linier Alkil Benzen  
Sulfonat dalam Limbah Cair Melalui Proses  
Hibrida Ozonasi dan Filtrasi Membran

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Eva Fathul Karamah, M.T.



Penguji I : Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T.



Penguji II : Ir. Yuliusman, M.Eng.



Penguji III : Ir. Kamarza Mulia, M.Sc., Ph.D.



Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 21 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Kimia pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Ir. Eva Fathul Karamah, MT., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua DTK FTUI.
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng., selaku dosen kordinator mata kuliah skripsi dan pembimbing akademis. Serta seluruh dosen DTK FTUI.
4. Orang tua tercinta dan seluruh keluarga atas segala perhatian dan bantuannya baik moral maupun material serta doanya.
5. Mas Taufik atas bantuannya dalam mencari literatur, Mas Sriyono atas segala bantuan administrasinya, Mas Eko dan dan Mang Ijal buat sebagai pelipur lara disaat penulis mulai jenuh selama penelitian.
6. Teman – teman Teknik Kimia 2007 dan Ekstensi yang setia menemani penulis selama penelitian, serta pihak – pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu selama ini.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Untuk itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan untuk memperbaiki penulisan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 21 Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Deni Firmansyah

NPM : 0706269685

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

”Identifikasi Laju Reaksi Penyisihan Timbal, Tembaga, Amonia,  
dan Linear Alkil Benzen Sulfonat dalam Limbah Cair Melalui  
Proses Hibrida Ozonasi dan Filtrasi Membran”

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Juni 2011

Yang menyatakan



(Deni Firmansyah)

## ABSTRAK

Nama : Deni Firmansyah  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Identifikasi Laju Reaksi Penyisihan Timbal, Tembaga, Amonia, dan Linear Alkil Benzen Sulfonat dalam Limbah Cair Melalui Proses Hibrida Ozonasi dan Filtrasi Membran

Penyisihan bahan kimia berbahaya dari limbah cair dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan menggunakan filtrasi membran. Masalah utama pada filtrasi membran adalah sering terjadinya *fouling*. Untuk mengatasinya dapat dilakukan dengan menggunakan proses *pretreatment* dengan ozonasi. Dari hasil identifikasi laju reaksi penyisihan terhadap data – data penelitian sebelumnya, dengan metode pendekatan hukum pangkat sederhana, didapatkan bahwa nilai konstanta laju reaksi penyisihan dengan proses gabungan ozonasi dan filtrasi membran pada tingkat 1 sampai tingkat 3 masing – masing sebesar:  $3 \times 10^8/\text{M}^2.\text{s}$ ,  $1,5 \times 10^9/\text{M}^2.\text{s}$ , dan  $2 \times 10^9/\text{M}^2.\text{s}$  untuk timbal;  $4,19 \times 10^4/\text{M}^2.\text{s}$ ,  $3 \times 10^{-8} \text{ M/s}$ , dan  $5 \times 10^6/\text{M}^2.\text{s}$  untuk tembaga;  $3 \times 10^{-8} \text{ M/s}$ ,  $3,486/\text{M}^2.\text{s}$ , dan  $2,8315/\text{M}^2.\text{s}$  untuk amonia; serta  $7,7 \times 10^4/\text{M}^2.\text{s}$ ,  $5,6 \times 10^{-2}/\text{M}^{0.5}.\text{s}$ , dan  $0,11/\text{M}^{0.5}.\text{s}$  untuk linier alkil benzen sulfonat.

**Kata kunci:**

*Ozonasi, Membran, Identifikasi, konstanta laju penyisihan*

## ABSTRACT

Name : Deni Firmansyah  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Identification of Degradation Rate of Lead, Copper, Ammonia, and Linear Alkyl Benzene Sulfonate in Wastewater Through Ozone and Membrane Filtration Hybrid Process.

Degradation of hazardous chemicals from the wastewater can be done in various ways, one of them is by using membrane filtration. The main problem in membrane filtration is a frequent occurrence of fouling. To overcome this can be done by using a pretreatment process with ozonasi. From the results of the identification of degradation rate of previous research data, with a simple power-law approach, it was found that the degradation rate constant value with a ozonation and membrane filtration hybrid process at level 1 to level 3, each for:  $3 \times 10^8/\text{M}^2.\text{s}$ ,  $1.5 \times 10^9/\text{M}^2.\text{s}$ , and  $2 \times 10^9/\text{M}^2.\text{s}$  for lead;  $4.19 \times 10^4/\text{M}^2.\text{s}$ ,  $3 \times 10^{-8} \text{ M/s}$ , and  $5 \times 10^6/\text{M}^2.\text{s}$  for copper;  $3 \times 10^{-8} \text{ M/s}$ ,  $3.486/\text{M}^{0.5}.\text{s}$ , and  $2.8315/\text{M}^2.\text{s}$  for ammonia; and  $7.7 \times 10^4/\text{M}^2.\text{s}$ ,  $5.6 \times 10^{-2}/\text{M}^{0.5}.\text{s}$ , and  $0.11/\text{M}^{0.5}.\text{s}$  for linear alkyl benzene sulfonate.

**Keywords:**

*Ozonasi, Membrane, Identification, Constant degradation rate,*

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1. Timbal (Pb).....	6
2.2. Tembaga (Cu) .....	7
2.3. Amonia (NH <sub>3</sub> ).....	9
2.4. Linier Alkil Benzen Sulfonat (LAS) .....	11
2.5. Proses Hibrida Ozonasi – membran.....	13
2.6. Faktor Yang Mempengaruhari Kinetika Kimia Pada Reaksi Ozonasi.....	14
2.7. Penentuan Model Kinetika Empiris dengan Hukum Pangkat Sederhana ..	15
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b> .....	17
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	17
3.2. Prosedur Penelitian.....	18
3.2.1. Studi Literatur .....	18
3.2.2. Pengumpulan Data Kinetia .....	18
3.2.3. Penentuan Persamaan Kinetika .....	18
3.2.4. Pengujian Persamaan Kinetika.....	19
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	20
4.1. Proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran.....	20
4.2 Karakteristik Data .....	23
4.2.1 Karakteristik Data Penyisihan Timbal (Pb) .....	24
4.2.2 Karakteristik Data Penyisihan Tembaga (Cu) .....	25
4.2.3 Karakteristik Data Penyisihan Amonia (NH <sub>3</sub> ) .....	26
4.2.4 Karakteristik Data Penyisihan Linear Alkil Benzen Sulfonat (LAS)...	27
4.3 Identifikasi Laju Penyisihan .....	28
4.3.1. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Timbal.....	29
4.3.2. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Tembaga .....	32
4.3.3. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Amonia .....	35
4.3.4. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Linear Alkil Benzen Sulfonat	39
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	43

5.1. Kesimpulan .....	43
5.2. Saran.....	44
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	45
<b>LAMPIRAN</b> .....	47

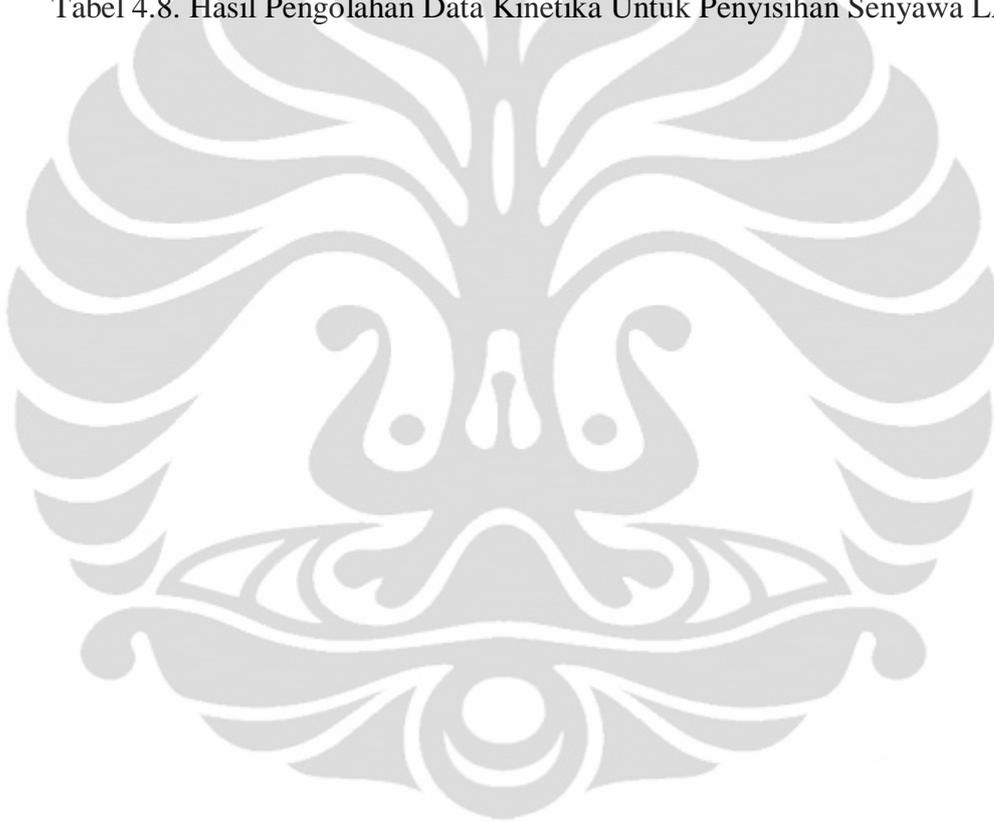


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Struktur Molekul LAS .....	11
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian .....	17
Gambar 4.1.	Skema Pengolahan Limbah Cair Melalui Proses Hibrida Ozonasi dan Filtrasi Membran.....	21
Gambar 4.2.	Bagan <i>Black Box</i> Sistem Proses Ozonasi – Filtrasi Membran .....	22
Gambar 4.3.	Penyisihan Logam Timbal (Pb) Melalui Proses Hibrida Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran .....	24
Gambar 4.4.	Penyisihan Logam Cu Melalui Proses Hibrida Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran .....	25
Gambar 4.5.	Penyisihan NH <sub>3</sub> Melalui Proses Hibrida Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran.....	27
Gambar 4.6.	Laju Alir <i>Permeate</i> Pada Penyisihan Pb .....	31
Gambar 4.7.	Nilai pH Selama Proses Penyisihan Pb.....	32
Gambar 4.8.	Nilai pH Selama Proses Penyisihan Cu .....	34
Gambar 4.9.	Laju Alir <i>Permeate</i> Pada Penyisihan Cu .....	35
Gambar 4.10.	Nilai pH Pada Proses Penyisihan NH <sub>3</sub> .....	39
Gambar 4.11.	Nilai pH Selama Proses Penyisihan LAS.....	42
Gambar 4.12.	Laju alir <i>permeate</i> selama proses penyisihan LAS.....	42

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat Fisik Amonia.....	10
Tabel 2.2. Sifat – sifat Fisika LAS .....	12
Tabel 4.1. Konsentrasi Penyisihan Logam Pb.....	24
Tabel 4.2. Konsentrasi Penyisihan Logam Cu .....	25
Tabel 4.3. Konsentrasi Penyisihan NH <sub>3</sub> .....	26
Tabel 4.4. Konsentrasi dan Persentase Penyisihan LAS.....	28
Tabel 4.5. Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa Pb .....	30
Tabel 4.6. Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa Cu.....	33
Tabel 4.7. Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa NH <sub>3</sub> .....	37
Tabel 4.8. Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa LAS .....	39



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Air adalah salah satu senyawa kimia yang sangat penting bagi kehidupan manusia. Air umumnya digunakan untuk kebutuhan rumah tangga dan industri. Kelangkaan air bersih sudah banyak terjadi di berbagai negara termasuk Indonesia. Dengan penambahan penduduk dan perkembangan kawasan industri yang semakin luas, masalah air adalah masalah yang sangat krusial bagi penduduk Indonesia. Masalah yang sering dikeluhkan masyarakat adalah tentang buruknya kualitas air yang mereka gunakan sehari – hari terutama di wilayah perkotaan. Air bersih yang memenuhi standar atau persyaratan untuk air minum adalah air yang sesuai dengan PERMENKES RI No. 492/MENKES/PER/IV/2010. Semua persyaratan tersebut dapat terpenuhi jika air yang digunakan sebagai air minum oleh masyarakat tidak menimbulkan masalah kesehatan. Air yang digunakan untuk dikonsumsi sebaiknya melalui proses pengolahan yang menjamin kualitas air hasil olahan tersebut tidak terdapat kandungan bahan – bahan kimia berbahaya, partikel – partikel padat yang terkandung dalam air, mikroorganisme dan kandungan logam yang mungkin dapat membahayakan kesehatan manusia.

Beberapa bahan kimia berbahaya yang sering terlarut dalam air permukaan adalah timbal (Pb), tembaga (Cu), amonia (NH<sub>3</sub>), dan liner alkil benzen sulfonat (LAS). Apabila kandungan logam dan senyawa kimia berbahaya tersebut diatas ambang batas akan sangat membahayakan makhluk hidup di sekitarnya. Menurut PERMENKES No. 492/MENKES/PER/IV/2010, ambang batas untuk senyawa tersebut dalam air permukaan untuk air minum masing – masing adalah 0,01 mg/L untuk timbal, 2 mg/L untuk tembaga, 1,5 mg/L untuk amonia, dan 0,005 mg/L untuk LAS (deterjen).

Kelebihan kandungan timbal dan tembaga dalam tubuh menyebabkan gejala seperti rasa logam di mulut, garis hitam pada gusi, muntah – muntah, perubahan kepribadian, kelumpuhan dan kebutaan. Amonia dapat menyebabkan timbulnya gejala gangguan patologis yaitu gangguan terhadap organ – organ

dalam seperti hati, ginjal, dan menimbulkan komplikasi. Sedangkan Pengaruh LAS pada tubuh manusia yaitu dapat menyebabkan iritasi (panas, gatal bahkan mengelupas) pada kulit dan memiliki efek karsinogenik. Dengan mengetahui bahaya – bahaya tersebut maka perlu dilakukan pengolahan air sehingga kandungan logam berat tembaga, timbal dan amonia dalam air sesuai dengan PERMENKES No. 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang syarat – syarat pengolahan air minum.

Ada beberapa proses yang dapat digunakan untuk pengolahan air, salah satu diantaranya adalah dengan metode filtrasi menggunakan membran. Metode pengolahan air dengan menggunakan membran mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode pengolahan lainnya, seperti dapat dilakukan pada temperatur ruang dan tanpa terjadi perubahan fasa, sehingga proses ini lebih ekonomis dalam hal konsumsi energi dibanding dengan proses distilasi.

Salah satu kendala dari proses pemurnian air dengan menggunakan membran adalah sering terjadi *fouling* pada membran yang dapat menyebabkan berkurangnya laju *permeate* pada membran yang berdampak turunnya efisiensi ekonomi unit pengolahan air tersebut. Beberapa hal yang umum dilakukan untuk mengurangi *fouling* dari membran diantaranya ialah melakukan pencucian balik atau *backflushing* membran secara periodik, pembersihan membran dengan bahan kimia, dan melakukan *pretreatment* pada air masukan membran.

Salah satu cara yang digunakan untuk mengurangi *fouling* pada membran adalah dengan melakukan *pretreatment* pada air masukan membran dengan menggunakan proses ozonasi. Proses seperti inilah yang disebut dengan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran. *Pretreatment* dengan menggunakan proses ozonasi ini telah terbukti mampu mencegah terjadinya *fouling* membran dan meningkatkan kualitas hasil dan periode penggunaan membran.

Proses pengolahan air minum menggunakan metode hibrida ozonasi – membran telah banyak dilakukan. Diantaranya yaitu, dengan menggunakan kombinasi proses ozonasi dan membran mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi dari bahan keramik (dengan konfigurasi penginjeksian ozon dan letak membran terpisah) terbukti mampu mengurangi *fouling* yang disebabkan oleh adanya senyawa

organik dan mikroorganisme tetapi untuk *fouling* yang disebabkan oleh senyawa anorganik seperti *bentonite* tidak ada perbedaan yang signifikan antara ada atau tidaknya proses ozonasi (Schlichter, Mavrov, & Chmiel, 2003).

Penelitian lainnya juga telah dilakukan dengan ozonasi gelembung mikro untuk menyisihkan logam besi (Fe) dan mangan (Mn) (Rozi, 2009); penyisihan logam timbal (Pb), tembaga (Cu), dan amonia ( $\text{NH}_3$ ) (Hikmawan, 2009); serta penyisihan amonia ( $\text{NH}_3$ ) dan linier alkil benzene sulfonat (LAS) (Retno, 2009). Ketiga penelitian tersebut hanya sebatas melakukan penelitian tentang kemampuan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran dalam menyisihkan senyawa polutan dalam air tanpa menjelaskan aspek kinetika reaksi penyisihan tersebut.

Oleh karena itu, diperlukan adanya suatu pengembangan aplikasi dari data – data yang dihasilkan dari penelitian tersebut untuk mengidentifikasi laju reaksi penyisihan yang terjadi, yaitu dengan cara melakukan identifikasi laju reaksi. Identifikasi laju reaksi yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah dengan mengaplikasikan data – data yang dihasilkan dari penelitian sebelumnya ke dalam suatu persamaan kinetika empiris sederhana. Tujuannya adalah untuk menentukan parameter kinetika seperti konstanta laju reaksi dan orde reaksi yang terjadi selama proses penyisihan polutan. Dengan cara ini, diharapkan dapat memberikan suatu gambaran mengenai laju reaksi penyisihan polutan dalam air melalui proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah mengidentifikasi laju reaksi penyisihan polutan dalam air yang meliputi penentuan konstanta laju reaksi dan orde reaksi dari suatu model kinetika empiris yang dihasilkan dari pengaplikasian data – data dari penelitian sebelumnya dengan pendekatan matematis sederhana.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kinerja dari proses hibrida ozonasi membran untuk menyisihkan senyawa timbal, tembaga, amonia dan LAS

dengan menentukan persamana laju reaksi penyisihan melalui metode pendekatan hukum pangkat.

#### **1.4. Batasan Masalah**

Batasan – batasan yang berlaku pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data – data yang digunakan dalam penentuan model kinetika empiris adalah data – data dari hasil penelitian Teguh Hikmawan (2009) dan Sri Retno (2009) yang tertulis dalam laporan skripsi mereka.
2. Penentuan model kinetika empiris dilakukan dengan menerapkan metode hukum pangkat sederhana
3. Penentuan konstanta laju reaksi dan orde reaksi dilakukan dengan hukum pangkat sederhana.

#### **1.5. Sistematika Penulisan**

##### **BAB I Pendahuluan**

Berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

##### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Berisi tinjauan literatur mengenai reaksi karakteristik timbal, tembaga, amonia, LAS, pengolahan air dengan metode hibrida ozonasi – membran, faktor – faktor yang mempengaruhi kinetika kimia pada reaksi ozonasi, serta penentuan model kinetika empiris dengan hukum pangkat sederhana.

##### **BAB III Metode Penelitian**

Berisi diagram alir penelitian, bahan – bahan dan peralatan yang digunakan, serta prosedur penelitian yang dilakukan. Termasuk di dalamnya adalah studi literatur, pengumpulan data, penurunan persamaan kinetika dengan hukum pangkat sederhana, dan pengujian persamaan kinetika.

#### BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Berisi uraian dan analisa hasil perumusan model kinetika serta penentuan konstanta laju reaksi dan orde reaksi untuk penyisihan timbal, tembaga, amonia, dan LAS.

#### BAB V Kesimpulan dan Saran

Berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Pembahasan bab ini terbagi menjadi 6 bagian utama, yaitu: Pembahasan mengenai karakteristik timbal, tembaga, amonia, LAS, proses ozonasi – membran, faktor – faktor yang mempengaruhi kinetika kimia pada proses ozonasi, dan penentuan model kinetika dengan hukum pangkat sederhana.

#### 2.1. Timbal (Pb)

Timbal (Pb) pada awalnya adalah logam berat yang secara alami berada di dalam kerak bumi. Namun timbal juga bisa berasal dari kegiatan manusia bahkan mampu mencapai 300 kali lebih banyak dibandingkan Pb alami.

Pb memiliki titik lebur yang rendah, mudah dibentuk, memiliki sifat kimia yang aktif, sehingga bisa digunakan untuk melapisi logam agar tidak muncul pengkaratan. Apabila dicampur dengan logam lain akan terbentuk logam campuran yang lebih baik dari logam murninya. Pb adalah logam lunak berwarna abu – abu kebiruan mengkilap serta mudah dimurnikan dari pertambangan (Widowati, Sationo, & Jusuf, 2008).

Secara alami Pb juga ditemukan di air permukaan. Kadar Pb pada air telaga dan air sungai adalah sebesar 1 – 10  $\mu\text{g/L}$ . Dalam air laut kadar Pb lebih rendah dari dalam air tawar. Laut Bermuda yang dikatakan terbebas dari pencemaran mengandung Pb sekitar 0,07  $\mu\text{g/L}$ . Kandungan Pb dalam air danau dan sungai di USA berkisar antara 1 – 10  $\mu\text{g/L}$ . Secara alami Pb juga ditemukan di udara yang kadarnya berkisar antara 0,0001 – 0,001  $\mu\text{g/m}^3$ . Tumbuh – tumbuhan termasuk sayur – mayur dan padi – padian dapat mengandung Pb. Penelitian yang dilakukan di USA kadarnya berkisar antara 0,1 – 1,0  $\mu\text{g/kg}$  berat kering (Widowati, Sationo, & Jusuf, 2008).

Logam berat Pb yang berasal dari tambang dapat berubah menjadi PbS (galena),  $\text{PbCO}_3$  (*cerusite*) dan  $\text{PbSO}_4$  (*anglesite*) dimana ternyata galena merupakan sumber utama Pb yang berasal dari tambang. Logam berat Pb yang

berasal dari tambang tersebut bercampur dengan Zn (seng) dengan kontribusi 70%, kandungan Pb murni sekitar 20% dan sisanya 10% terdiri dari campuran seng dan tembaga.

Industri yang berpotensi sebagai sumber pencemaran Pb adalah semua industri yang memakai Pb sebagai bahan baku maupun bahan penolong, misalnya:

1. Industri pengecoran maupun pemurnian, industri ini menghasilkan timbal konsentrat (*primary lead*), maupun *secondary lead* yang berasal dari potongan logam (*scrap*).
2. Industri *battery*, industri ini banyak menggunakan logam Pb terutama *lead antimony alloy* dan *lead oxides* sebagai bahan dasarnya.
3. Industri bahan bakar, Pb berupa *tetra ethyl lead* dan *tetra methyl lead* banyak dipakai sebagai anti knock pada bahan bakar, sehingga baik industri maupun bahan bakar yang dihasilkan merupakan sumber pencemaran Pb.
4. Industri kabel, industri kabel memerlukan Pb untuk melapisi kabel. Saat ini pemakaian Pb di industri kabel mulai berkurang, walaupun masih digunakan campuran logam Cd, Fe, Cr, Au dan arsenik yang juga membahayakan untuk kehidupan makhluk hidup.
5. Industri kimia berperan sebagai bahan pewarna. Pada industri ini seringkali dipakai Pb karena toksisitasnya relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan logam pigmen yang lain. Sebagai pewarna merah pada cat biasanya dipakai *red lead*, sedangkan untuk warna kuning dipakai *lead chromate*.

Selain pencemaran berasal dari aktivitas perindustrian, pencemaran logam berat Pb juga berasal dari transportasi. Pencemaran ini terjadi karena bahan bakar yang digunakan menggunakan bensin. Logam Pb ditambahkan kedalam bensin sebagai zat anti ketup. Pencemaran akibat transportasi ini dapat mencemari tanah, air dan udara.

## 2.2. Tembaga (Cu)

Kuprum atau tembaga (Cu) memiliki sistem kubik, yang secara fisika berwarna kuning dan apabila dilihat menggunakan mikroskop akan berwarna pink

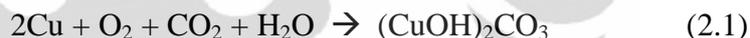
kecoklatan sampai keabuan. Cu termasuk golongan logam, warna merah serta mudah berubah bentuk. Di alam Cu banyak ditemukan dalam bentuk *pyrite*, Fesulfat dan sering bercampur dengan antimony (Sb), merkuri (Hg), timbal (Pb), dan arsen sulfat (Widowati, Sationo, & Jusuf, 2008).

Sifat – sifat fisika tembaga diantaranya sebagai berikut (Rahayu, 2009):

1. Logam berwarna kemerah – merahan dan berkilauan.
2. Dapat ditempa, dibengkokkan, dan merupakan penghantar listrik dan panas yang baik.
3. Memiliki titik didih pada suhu 2.301 °C dan titik leleh pada suhu 1.083 °C.
4. Memiliki berat jenis sekitar 8,92 gram/cm<sup>3</sup>.

Sedangkan sifat – sifat kimia tembaga adalah sebagai berikut (Rahayu, 2009):

1. Dalam udara kering sukar teroksidasi, akan tetapi apabila dipanaskan akan membentuk oksida tembaga (CuO).
2. Dalam udara lembab, akan diubah menjadi senyawa karbonat atau karat basa menurut reaksi:



3. Tidak dapat bereaksi dengan larutan HCl encer dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> encer.
4. Dapat bereaksi dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat maupun HNO<sub>3</sub> encer dan pekat.



Unsur tembaga di alam bisa ditemukan dalam bentuk logam bebas, tetapi lebih banyak ditemukan dalam bentuk mineral. Dalam perairan laut, Cu di temukan dalam bentuk persenyawaan ion seperti CuCO<sub>3</sub>, CuOH dan lain – lain. Pada batuan mineral atau lapisan tanah, Cu ditemukan dalam bentuk seperti kalkosit (Cu<sub>2</sub>S), kovalit (CuS), kalkopirit (CuFeS<sub>2</sub>), bentonit (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>) dan energit (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>). Selain dalam bentuk mineral logam Cu banyak ditemukan dalam bentuk teroksidasi seperti bijih kuprit (Cu<sub>2</sub>O), tenorit (CuO), malasit (Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), Azurit (Cu<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), krisokola (CuSiO<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O) dan bronkanit (Cu<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>SO<sub>4</sub>).

Tembaga masuk ke lingkungan melalui jalur alamiah dan non alamiah. Pada jalur alamiah, logam mengalami sirkulasi perputaran dari kerak bumi ke lapisan tanah, kedalam makhluk hidup, ke dalam kolam air, mengendap dan akhirnya kembali lagi kedalam kerak bumi. Sedangkan jalur non alamiah, unsur Cu masuk ke dalam tatanan lingkungan akibat aktivitas manusia, antara lain dari buangan industri yang menggunakan bahan baku Cu, industri gelangan kapal, industri pengolahan kayu serta limbah rumah tangga.

Tingkat pencemaran Cu di lingkungan tergantung pada aktivitas manusia dan perubahan alam, seperti erosi dan hasil pelapukan batuan oleh air dalam perjalannya. Kandungan logam Cu dalam air apabila melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh pemerintah maka dapat menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan.

Tembaga (Cu) sebenarnya diperlukan bagi perkembangan tubuh manusia, tetapi dalam dosis tinggi dapat menyebabkan gangguan ginjal, muntaber, pusing, lemah, anemia, kramp, konvulsi, shock, koma, dan dapat menyebabkan kematian. Dalam konsentrasi rendah menimbulkan rasa kesat, warna dan korosi pada pipa, sambungan dan peralatan dapur (Slamet, 1994).

### **2.3. Amonia (NH<sub>3</sub>)**

Amonia adalah senyawa kimia dengan rumus NH<sub>3</sub>. Biasanya senyawa ini didapati berupa gas dengan bau tajam yang khas (disebut bau amonia). Walaupun amonia memiliki sumbangan penting bagi keberadaan nutrisi di bumi, amonia sendiri adalah senyawa kaustik dan dapat merusak kesehatan. Amonia yang digunakan secara komersial dinamakan amonia anhidrat. Istilah ini menunjukkan tidak adanya air pada bahan tersebut. Karena amonia mendidih di suhu -33 °C, cairan amonia harus disimpan dalam tekanan tinggi atau temperatur amat rendah. Walaupun begitu, kalor penguapannya amat tinggi sehingga dapat ditangani dengan tabung reaksi biasa di dalam sungkup asap. "Amonia rumah" atau amonium hidroksida adalah larutan NH<sub>3</sub> dalam air. Sifat fisika dari amonia bisa dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

**Tabel 2.1.** Sifat Fisik Amonia

Rumus Molekul	NH <sub>3</sub>
Berat molekul	17,03 gram/g.mol
Titik didih	-33,45 °C
Titik cair normal	-77,7 °C
Temperatur kritis	207,5 °C
Tekanan kritis	111,3 atm
ΔH <sub>f</sub> <sup>o</sup>	-39,222 kJ/mol
Volume kritis	0,08040 m <sup>3</sup> /kg.mol
Warna dan sifat	Tidak berwarna dan berbau tajam (khas amonia)
Fase	Cair jenuh (30 °C; 11,5 atm)
<i>Specific gravity</i>	0,817 (-79 °C); 0,617 (15 °C)
Kelarutan dalam air (25 °C)	0,94%

Sumber : Hernawan, 2008

Sedangkan sifat kimia dari senyawa amonia adalah sebagai berikut (Hernawan, 2009):

1. Amonia dapat membentuk campuran, mudah terbakar dengan udara pada nilai ambang batas (16,25% volume).
2. Bahaya ledakan amonia akan semakin meluas apabila kontak dengan oksigen pada temperatur serta tekanan tinggi di atmosfer.
3. Reaksi oksidasi – reduksi

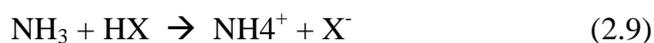
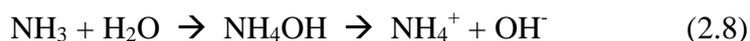


Jika tanpa katalis



4. Reaksi substitusi

Masuknya ion H<sup>+</sup> dalam amonia, yang sering disebut amoniasasi.



5. Reaksi amonolisis

Reaksi amonia dengan senyawa lain dimana amonia bereaksi sebagai gugus NH<sub>2</sub>.

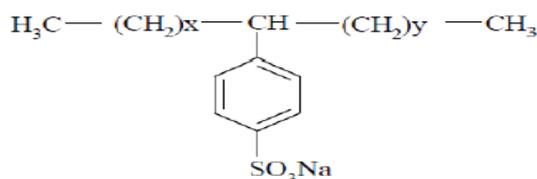


Amonia dapat menjadi limbah organik yang beracun dan berbahaya. Amonia yang terlarut dalam lingkungan perairan merupakan masalah besar karena dapat membahayakan kesehatan manusia dan merusak lingkungan. Berdasarkan data Lembaga Kajian Ekologi dan Konservasi Lahan Basah tahun 2003, delapan sungai di Bekasi telah tercemar oleh limbah amonia. Kandungan amonia di Sungai Blencong – Bekasi mencapai 11,60 mg/L; Sungai Bojong mencapai 19,52 mg/L; dan Sungai Kaliabang Hilir mencapai 59,06 mg/L. Selain itu, didapatkan tambahan data bahwa bahan baku air yang dikelola PT Thames PAM Jaya atau TPJ, yang berasal dari Kali Malang, tercemar amonia berkadar tinggi, yakni 1,77 ppm. Sedangkan berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan R.I Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010, konsentrasi amonia yang diperbolehkan berada dalam air bersih adalah sebesar 1,5 mg/L.

Kontak dengan gas amonia berkonsentrasi tinggi dapat menyebabkan kerusakan paru – paru dan bahkan kematian. Amonia juga dapat menyebabkan timbulnya gejala gangguan patologis yaitu gangguan terhadap organ – organ dalam seperti hati, ginjal dan menimbulkan komplikasi.

#### 2.4. Linier Alkil Benzen Sulfonat (LAS)

Surfaktan (*surface active agent*) merupakan zat aktif permukaan yang mempunyai ujung berbeda yaitu bagian hidrofil dan hidrofob. Bahan aktif ini berfungsi menurunkan tegangan permukaan air sehingga dapat melepaskan kotoran yang menempel pada permukaan bahan. Secara garis besar, terdapat empat kategori surfaktan yaitu anionik, kationik, ionik dan amfoterik. Linear Alkil benzen Sulfonat (LAS) merupakan salah satu surfaktan dalam bentuk anionik. Senyawa LAS dapat dilihat pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Struktur Molekul LAS

Sumber : Retno, 2009

Untuk sifat – sifat fisika dari LAS, dapat dilihat Tabel 2.2 berikut ini:

**Tabel 2.2.** Sifat – sifat Fisika LAS

Rumus Molekul	$C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$
Berat Molekul	348 gram/g.mol
Titik Didih	637 °C
Titik Leleh	277 °C
Densitas	1198,4 kg/m <sup>3</sup>
Wujud dan Warna	Cair dan bening
Kapasitas Panas	0,6 kcal/kg.K
Viskositas	23,87 cp

Sumber : [www.chemicalland21.com](http://www.chemicalland21.com)

Sedangkan sifat – sifat kimia dari LAS adalah sebagai berikut sangat larut dalam air dan bersifat sebagai surfaktan yang menimbulkan busa.

LAS merupakan campuran kompleks homolog yang berbeda panjang rantai alkil (C10 – C13) dan isomer posisi fenil 2 sampai 5-fenil, yang masing – masing memiliki sebuah cincin aromatik tersulfonasi pada posisi para dan melekat pada sebuah rantai alkil linier pada posisi manapun dengan pengecualian dari terminal satu (1-fenil).

LAS merupakan surfaktan sintetis karena biaya yang relatif rendah, memiliki kinerja yang baik dan mudah terdegradasi atau ramah lingkungan karena memiliki rantai lurus. LAS digunakan sebagai deterjen rumah tangga, seperti deterjen serbuk, serbuk *laundry* (deterjen serbuk *laundry*), cairan *laundry* (deterjen cair), produk pencuci peralatan rumah tangga dan pembersih. Selain itu, LAS juga digunakan dalam industri tekstil dan fiber, bahan kimia, dan pertanian (HERA, 2009).

Menurut Asosiasi Pengusaha Deterjen Indonesia (APEDI), surfaktan anionik yang digunakan di Indonesia saat ini adalah alkil benzen sulfonat rantai bercabang (ABS) sebesar 40% dan alkil benzen sulfonat rantai lurus (LAS) sebesar 60%, dengan produksi deterjen Indonesia rata – rata pertahun sebesar 380 ribu ton. Sedangkan tingkat konsumsinya, menurut hasil survey yang dilakukan oleh Pusat Audit Teknologi di wilayah Jabotabek pada tahun 2002, per kapita rata – rata sebesar 8,232 kg. (<http://buletin.melsa.net.id>)

LAS pada kondisi aerob (cukup oksigen dan mikroorganisme) mudah terurai. Tetapi, LAS tidak dapat terurai pada kondisi anaerob (tidak terdapat udara), sehingga jika permukaan air memang sudah menghitam seperti kondisi sungai Jakarta, akan terjadi kondisi anaerobik yang tidak memungkinkan LAS terurai. LAS yang tidak terurai ini memiliki efek sangat toksik bagi organisme (cukup dapat mematikan ikan dalam kadar 3 – 10 mg/L) dan bersifat bioakumulatif (tersimpan dalam jaringan) (Retno, 2009).

Keberadaan LAS umumnya sebagai deterjen rumah tangga dapat memberikan dampak jika kontak dengan kulit baik secara langsung maupun tidak langsung, terhirup dan tertelan dari sisa pencucian yang terakumulasi di peralatan makan dan minum. Paparannya diperkirakan 4 µg/kg berat badan/hari. Pada beberapa percobaan yang dilakukan terhadap tikus, LAS dengan konsentrasi 500 – 2480 mg/kg berat badan dapat bersifat racun akut. LAS juga bersifat racun akut pada konsentrasi 9,1 mg/L untuk alga, pada konsentrasi 4,1 mg/L untuk invertebrata, dan pada konsentrasi 3,5 mg/L untuk ikan (HERA, 2009).

## 2.5. Proses Hibrida Ozonasi – membran

Proses pengolahan air minum biasanya menggunakan gabungan antara membran mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi sebagai *pretreatment* terhadap nanofiltrasi atau osmosis balik yang dirangkai secara seri. Kekurangan dari proses ini adalah biaya produksi dan kemungkinan terjadinya *fouling* tinggi. Mikroorganisme seperti bakteri atau virus akan dipisahkan dalam jumlah yang besar pada tahap pertama, tetapi tidak dihilangkan seluruhnya. Hal ini akan mengakibatkan peningkatan konsentrasi mikroorganisme pada air masukan pada tahap selanjutnya sehingga menyebabkan terjadinya *biofouling* pada membran.

Untuk mengurangi biaya produksi, tahap kedua dihilangkan, tetapi dilakukan proses disinfeksi pada air keluaran. Namun hal ini juga tidak dapat mengurangi terjadinya *fouling* karena seperti yang terjadi pada proses sebelumnya, mikroorganisme pada air masukan pada mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi tidak dapat dihilangkan seluruhnya (Slichter, Mavrov, & Chmiel, 2003).

Untuk mengatasi masalah *fouling* ini dapat dilakukan suatu *pretreatment* terhadap air masukan membran, yaitu dengan menginjeksikan ozon kepada air masukan dari mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi. Dengan penginjeksian ozon ini

diharapkan mikroorganisme penyebab *biofouling* ini dapat dihilangkan (Rozi, 2009).

## 2.6. Faktor Yang Mempengaruhi Kinetika Kimia Pada Reaksi Ozonasi

Ada sejumlah variabel yang mempengaruhi Kinetika reaksi, yang utamanya adalah sebagai berikut:

### a) Konsentrasi.

Semakin banyak molekul yang terlibat, kemungkinan terjadi tumbukan makin besar, reaksi terjadi lebih cepat. Dalam reaksi ozonasi, konsentrasi/dosis ozon penting sebagai dasar untuk merancang pembangkit ozon dan sistem kontak.

### b) Suhu

Hampir semua reaksi menjadi lebih cepat bila suhu dinaikkan karena kalor yang diberikan akan menambah energi kinetik partikel reaktan. Akibatnya jumlah dan energi tumbukan bertambah besar. Dalam proses ozonasi sangat berpengaruh pada tersedianya ozon dalam larutan. Semakin besar suhu, kelarutan ozon akan semakin kecil, sementara laju reaksi akan meningkat dengan naiknya suhu. Dalam proses ozonasi akan lebih baik reaksi dilaksanakan pada suhu rendah, karena jumlah ozon lebih banyak dalam larutan pada suhu tersebut. Semakin tinggi temperatur, nilai eksponen negatif semakin kecil, sehingga nilai  $k$  semakin besar, yang berarti bahwa laju semakin cepat.

### c) Katalis Reaksi

Katalis yang berinteraksi dengan reaktan akan memberikan jalur baru yang energi aktivasinya lebih rendah dari semula, sehingga reaksi lebih cepat terjadi. Penggunaan katalis dalam ozonasi dapat dilakukan jika kontaminan sukar diuraikan secara sempurna. Dengan adanya katalis akan dipercepat dekomposisi ozon menjadi OH dan selanjutnya radikal hidroksida akan berperan dalam reaksi degradasi. Beberapa katalis yang dapat digunakan diantaranya adalah karbon aktif, besi oksida, dan zeolit mangan

d) pH (Tingkat Keasaman)

Tingkat keasaman (pH) dapat mempengaruhi tindakan ozon pada bahan organik, yang dapat berupa ozonasi *direct* atau *indirect* (tanpa radikal). Reaksi yang berbeda ini akan menghasilkan produk oksidasi yang berbeda dan dibatasi dengan model kinetika yang juga berbeda. Pada pH rendah, ozon akan bereaksi secara eksklusif dengan senyawa yang mempunyai gugus spesifik melalui reaksi selektif seperti elektrofilik, nukleofilik atau reaksi penambahan dipolar (hal inilah yang disebut ozonasi *direct*). Sebaliknya, pada kondisi dasar, ozon akan terdekomposisi menghasilkan radikal OH yang merupakan pengoksidasi kuat dan bereaksi dengan jenis senyawa organik dan anorganik yang beragam pada air (hal inilah yang disebut ozonasi *indirect*). Umumnya, pada kondisi asam ( $\text{pH} < 4$ ) didominasi oleh ozonasi *direct*, pada pH 4 – 9 ozonasi *direct* dan *indirect* terjadi, dan pada pH > 9 didominasi ozonasi *indirect*.

### 2.7. Penentuan Model Kinetika Empiris dengan Hukum Pangkat Sederhana

Salah satu metode untuk menentukan model kinetika empiris adalah dengan Hukum Pangkat Sederhana (*Simple Power Law*). Tujuannya adalah untuk menentukan nilai konstanta laju reaksi dan orde reaksi yang kemudian akan dievaluasi dengan data percobaan. Model kinetika ini dipilih karena mudah untuk diaplikasikan karena hanya membutuhkan data konsentrasi dan waktu.

Reaksi ozonasi senyawa polutan dapat dituliskan secara sederhana sebagai berikut:



dengan A adalah polutan, Oz adalah ozon, dan P adalah produk.

Dengan Hukum Pangkat Sederhana, hubungan laju reaksi penyisihan polutan A dengan konsentrasi reaktan dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k.C_A^m.C_{\text{Oz}}^n \quad (2.12)$$

Dengan menggunakan *pseudo – nth order* pada ozon, maka hubungan tersebut dapat dirubah menjadi (Beltrán, 2004):

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k'.C_A^m \quad (2.13)$$

Dimana  $k' = k.C_{O_2}^n$ .

Dari persamaan (2.13), kita dapat mendapatkan orde reaksi untuk polutan A,  $m$ . Solusi persamaannya dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

Untuk  $m = 1$

$$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -k'.t \quad (2.14)$$

Untuk  $m \neq 1$

$$C_A^{1-m} - C_{A0}^{1-m} = (m-1).k'.t \quad (2.15)$$

Solusi persamaan (2.14) dan (2.15) dapat diperoleh dengan memplot grafik  $\ln \frac{C_A}{C_{A0}}$  vs  $t$  dengan slope  $-k'$  untuk nilai  $m = 1$ . Sedangkan untuk  $m \neq 1$ , dapat diselesaikan dengan memplot grafik  $(C_A^{1-m} - C_{A0}^{1-m})$  vs  $t$  dengan slope  $(m-1)k'$ . dengan cara ini, nilai  $k'$  dan  $m$  akan diperoleh.

Selanjutnya untuk menentukan orde reaksi ozon,  $n$ , dan nilai konstanta laju reaksi,  $k$ , dapat dicari dengan cara berikut:

$$\ln(k') = \ln(k) + n.\ln(C_{O_2}) \quad (2.16)$$

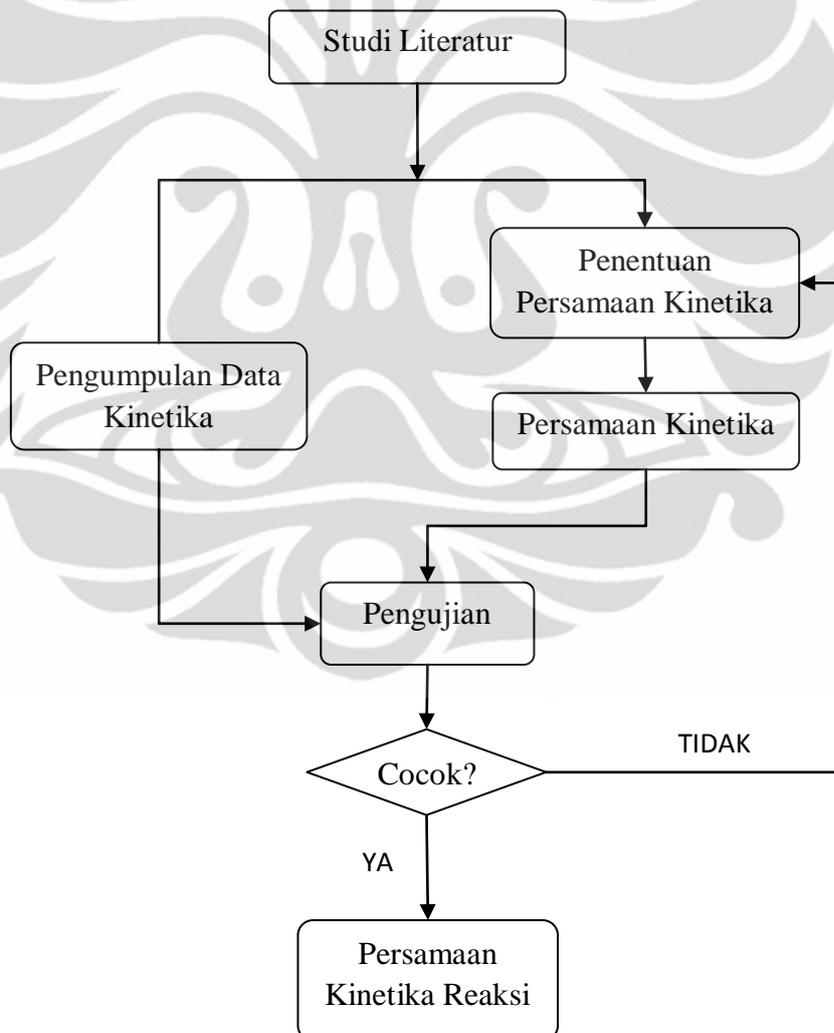
Dengan memplot grafik  $\ln(k')$  vs  $\ln(C_{O_2})$  dengan slope  $n$  maka nilai  $k$  dapat diperoleh.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini terdiri dari studi pendahuluan kinetika, penurunan persamaan kinetika, dan pengujian data kinetika untuk mendapatkan persamaan kinetika reaksi.

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian identifikasi laju reaksi ini dilakukan sesuai dengan diagram alir seperti pada Gambar 3.1 berikut ini.



**Gambar 3.1.** Diagram Alir Penelitian

## 3.2. Prosedur Penelitian

### 3.2.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan materi – materi yang diperlukan dalam penelitian ini. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mencari materi – materi yang dibutuhkan dari berbagai sumber yang ada, baik dari internet maupun dari buku – buku dan jurnal – jurnal yang ada perpustakaan.

### 3.2.2. Pengumpulan Data Kinetia

Data kinetika yang digunakan pada penelitian ini adalah data percobaan dari penelitian sebelumnya yang belum ada pembahasan tentang kinetika reaksi yang terjadi. Data kinetika yang dibutuhkan adalah berupa konsentrasi reaktan dan waktu. Data kinetika yang dipakai adalah data hasil penelitian skripsi Teguh Hikmawan (2009) dan Sri Retno P (2009).

### 3.2.3. Penentuan Persamaan Kinetika

Metode untuk menentukan persamaan kinetika pada penelitian ini adalah dengan menerapkan Hukum Pangkat Sederhana (Simple Power Law). Tujuannya adalah untuk menentukan nilai konstanta laju reaksi dan orde reaksi yang kemudian akan dievaluasi dengan data percobaan.

Reaksi ozonasi senyawa polutan dapat dituliskan secara sederhana sebagai berikut:



dengan A adalah polutan, Oz adalah ozon, dan P adalah produk.

Dengan Hukum Pangkat Sederhana, hubungan laju reaksi penyisihan polutan A dengan konsentrasi reaktan dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k.C_A^m C_{Oz}^n \quad (3.2)$$

Dengan menggunakan *pseudo – nth order* pada ozon, maka hubungan tersebut dapat dirubah menjadi (Beltrán, Fernando J., 2004):

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k'.C_A^m \quad (3.3)$$

Dimana  $k' = k.C_{Oz}^n$ .

Dari persamaan (3.3), kita dapat mendapatkan orde reaksi untuk polutan A,  $m$ . Solusi persamaannya dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

Untuk  $m = 1$

$$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -k't \quad (3.4)$$

Untuk  $m \neq 1$

$$C_A^{1-m} - C_{A0}^{1-m} = (m-1)k't \quad (3.5)$$

Solusi persamaan (3.4) dan (3.5) dapat diperoleh dengan memplot grafik  $\ln \frac{C_A}{C_{A0}}$  vs  $t$  dengan slope  $-k'$  untuk nilai  $m = 1$ . Sedangkan untuk  $m \neq 1$ , dapat diselesaikan dengan memplot grafik  $(C_A^{1-m} - C_{A0}^{1-m})$  vs  $t$  dengan slope  $(m-1)k'$ . dengan cara ini, nilai  $k'$  dan  $m$  akan diperoleh.

Selanjutnya untuk menentukan orde reaksi ozon,  $n$ , dan nilai konstanta laju reaksi,  $k$ , dapat dicari dengan cara berikut:

$$\ln(k') = \ln(k) + n \cdot \ln(C_{oz}) \quad (3.6)$$

Dengan memplot grafik  $\ln(k')$  vs  $\ln(C_{oz})$  dengan slope  $n$  maka nilai  $k$  dapat diperoleh.

### 3.2.4. Pengujian Persamaan Kinetika

Setelah mendapatkan persamaan kinetika, langkah berikutnya adalah menguji persamaan kinetika tersebut dengan data kinetika. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan persamaan kinetika yang sesuai dengan data kinetika yang ada. Pengujian dilakukan dengan cara melihat nilai regresi linier ( $R^2$ ) dari grafik yang diperoleh dalam penentuan orde reaksi pada polutan ( $m$ ). Pada penelitian ini, Persamaan kinetika dikatakan benar atau yang terbaik apabila nilai  $R^2$  mendekati 1 yang mengindikasikan persamaan kinetika tersebut cocok untuk menjadi persamaan kinetika reaksi penyisihan dengan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

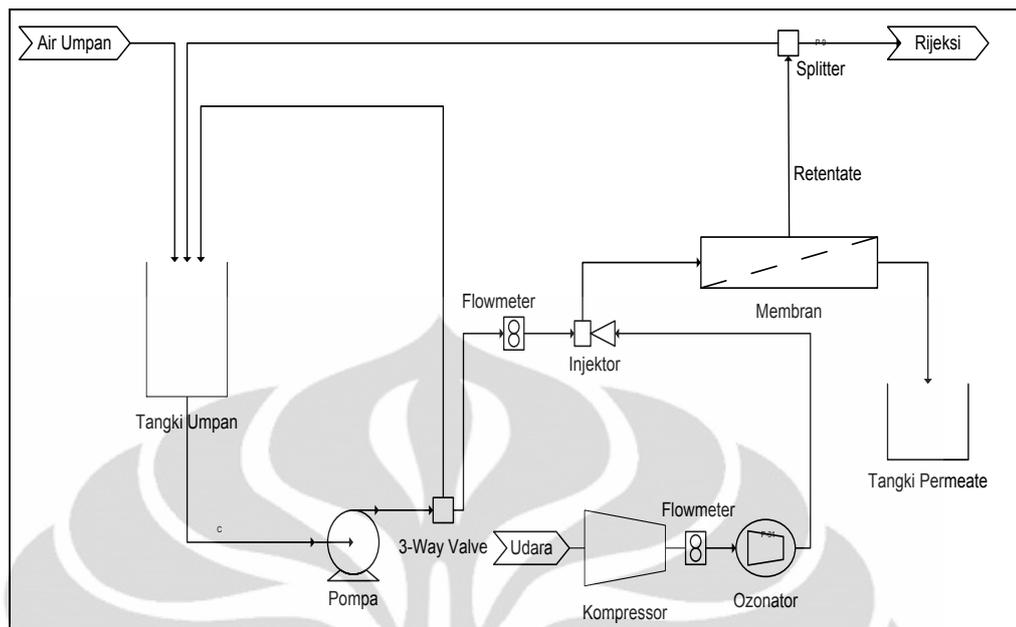
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja dari proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran melalui identifikasi laju reaksi dari data – data penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Pada bagian ini akan dievaluasi tentang identifikasi laju reaksi proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran yang dilakukan, karakteristik data yang diperoleh, dan analisis hasil identifikasi laju reaksi.

#### **4.1. Proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran**

Proses pengolahan air minum biasanya menggunakan gabungan antara mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi sebagai *pretreatment* terhadap nanofiltrasi atau osmosis balik yang dirangkai secara seri. Kekurangan dari proses ini adalah biaya produksi dan kemungkinan terjadinya *fouling* yang tinggi. Mikroorganisme seperti bakteri atau virus akan dipisahkan dalam jumlah yang besar pada tahap pertama, tetapi tidak dihilangkan seluruhnya. Hal ini akan mengakibatkan konsentrasi mikroorganisme pada air masukan pada tahap selanjutnya sehingga menyebabkan terjadinya *biofouling* pada membran.

Untuk mengurangi biaya produksi, tahap kedua dihilangkan, tetapi dilakukan proses disinfeksi pada air keluaran. Namun hal ini juga tidak dapat mengurangi terjadinya *fouling* karena seperti yang terjadi pada proses sebelumnya, mikroorganisme pada air masukan pada mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi tidak dapat dihilangkan seluruhnya (Schlichter, Mavrov, Chmiel, 2003).

Untuk mengatasi masalah *fouling* ini dapat dilakukan suatu *pretreatment* terhadap air masukan membran, yaitu dengan menginjeksikan ozon kepada air masukan dari mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi. Dengan penginjeksian ozon ini diharapkan mikroorganisme penyebab *biofouling* ini dapat dihilangkan (Rozi, F. 2009). Skema dari proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Skema Pengolahan Limbah Cair Melalui Proses Hibrida Ozonasi dan Filtrasi Membran

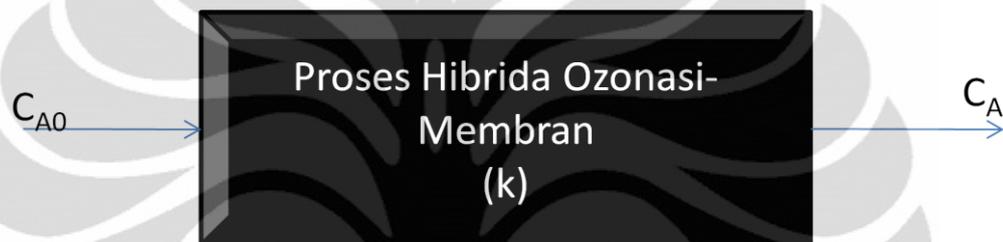
Sumber: Rozi, 2009

Dari gambar tersebut, dapat dijelaskan bahwa air umpan yang berasal dari *reservoir* dialirkan ke sistem dengan menggunakan pompa, sebagian dari air tersebut dialirkan kembali menuju *reservoir*. Air yang menuju sistem kemudian dilewatkan ke injektor. Dalam injektor, kecepatan aliran air akan meningkat sehingga akan menurunkan tekanan dalam ruang sehingga memungkinkan ozon yang dihasilkan oleh ozonator dimasukkan ke dalam *suction port* dan ikut ke dalam aliran. Saat aliran dengan kecepatan tinggi ini menuju keluaran injektor, kecepatannya berkurang namun tekanannya akan meningkat kembali, namun tekanan keluaran ini masih lebih rendah dibandingkan tekanan masukan injektor. Gelembung yang dihasilkan oleh injektor mazzei ini adalah gelembung mikro.

Ketika ozon sudah terlarut dalam air terjadi proses oksidasi senyawa organik maupun anorganik yang ada di dalam air oleh ozon. Setelah itu air akan melewati membran untuk memisahkan partikel – partikel yang ada dalam air. Pada penelitian ini dilakukan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran secara bertingkat tiga (*retentate* hasil filtrasi dimasukkan lagi ke dalam reservoir untuk diproses kembali, *recycle* terhadap *retentate* dilakukan dua kali).

Untuk identifikasi laju reaksi dari proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran ini, diambil asumsi bahwa proses hibrida ini merupakan

proses satu kesatuan. Sehingga untuk membahas mengenai kinetika yang terjadi, pembahasan dilakukan secara menyeluruh, artinya tidak ada pembahasan secara terpisah untuk identifikasi laju reaksi ozonasi saja atau membran saja. Hal ini didasari dengan data – data yang didapatkan dari penelitian sebelumnya hanya tersedia data – data konsentrasi awal dari polutan pada umpan dan pada hasil pengolahan (*permeate*). Sehingga harus dilakukan identifikasi laju reaksi secara menyeluruh. Secara sederhana, sistem proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran ini bisa diasumsikan sebuah bagan *Black Box* sesuai dengan Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Bagan *Black Box* Sistem Proses Ozonasi – Filtrasi Membran.  $C_{A0}$  = Konsentrasi Awal Polutan;  $C_A$  = Konsentrasi Akhir Polutan; dan  $k$  = Konstanta Laju Reaksi Sistem.

Dari Gambar 4.1, dapat diturunkan suatu rumus kinetika sederhana yang dapat menggambarkan fenomena kinetika yang terjadi pada proses hibrida ozonasi dan filtrasi membran.

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^n \quad (4.1)$$

Apabila persamaan (4.1) dilinearisasi dengan menukar posisi  $C_A^n$  dan  $dt$  dan kemudian mengintegrasikan kedua sisi, maka persamaan tersebut akan berubah seperti berikut:

$$C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n} = (n-1)k(t-t_0) \quad (4.2)$$

Pengecualian untuk  $n = 1$ .

$$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -k(t-t_0) \quad (4.3)$$

Persamaan (4.2) dan (4.3) adalah persamaan yang digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan persamaan laju reaksi dan parameter laju reaksi

berupa orde reaksi ( $n$ ) dan konstanta laju reaksi ( $k$ ). Persamaan ini adalah penyederhanaan persamaan-persamaan pada Sub Bab 3.2.3 dikarenakan pada persamaan tersebut dibutuhkan konsentrasi ozon terhadap waktu yang tidak didapatkan atau tidak dapat terdeteksi pada titik pengambilan sampel di *permeate* pada saat penelitian sebelumnya sehingga persamaan – persamaan tersebut tidak dapat digunakan. Ozon tidak terdeteksi dikarenakan beberapa sebab, diantaranya:

1. produktivitas ozon yang kecil daripada konsentrasi polutan yang harus didegradasi
2. reaksi antara polutan dan ozon sangat cepat atau spontan sehingga ozon tidak terdeteksi.
3. Ozon terurai menjadi radikal hidroksil atau oksigen di dalam air hasil pengolahan.

Dengan kata lain, fenomena kinetika hanya dipengaruhi oleh konsentrasi polutan dan pengaruh ozon dapat diwakilkan dari nilai konstanta laju reaksi yang diperoleh.

Untuk mendapatkan parameter kinetika berupa nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) dan orde reaksi ( $n$ ), dapat dilakukan dengan memplot grafik hubungan antara

$C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n}$  atau  $\ln \frac{C_A}{C_{A0}}$  sebagai sumbu Y terhadap  $(t - t_0)$  sebagai sumbu X

dengan mentaksir nilai  $n$ . Dari grafik yang dihasilkan tersebut kita memperoleh nilai  $k$  yang merupakan komponen dalam slope dari grafik untuk berbagai nilai  $n$ . Grafik dengan nilai regresi ( $R^2$ ) yang paling mendekati 1 adalah grafik yang dipilih dari nilai  $n$  yang paling cocok sehingga didapatkan nilai  $k$  dan nilai  $n$  pada grafik yang dipilih tersebut.

#### 4.2 Karakteristik Data

Data – data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data – data hasil eksperimen sebelumnya yang belum dikaji dari sisi kinetika kimia. Data yang digunakan adalah data konsentrasi dari senyawa – senyawa yang telah didegradasi oleh proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran ini, yaitu Timbal (Pb), Tembaga (Cu), Amonia ( $\text{NH}_3$ ), dan Linear Alkil Benzen Sulfonat (LAS). Data tersebut merupakan hasil analisis dengan *Absorption Atomic*

*Spectrophotometer* (AAS) untuk senyawa Pb dan Cu, metode spektrofotometri untuk  $\text{NH}_3$ , dan *Methylene Blue Active Substance* (MBAS) untuk LAS.

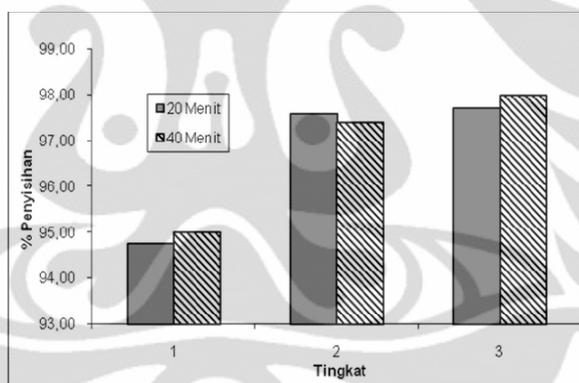
#### 4.2.1 Karakteristik Data Penyisihan Timbal (Pb)

Penyisihan logam Pb ini dilihat dari konsentrasi ion  $\text{Pb}^{2+}$  yang terkandung dalam air olahan berdasarkan hasil reaksi oksidasi antara  $\text{Pb}^{2+}$  dengan ozon yang menghasilkan  $\text{PbO}_2$  berupa endapan yang berwarna hitam (Hikmawan, 2009).

**Tabel 4.1.** Konsentrasi Penyisihan Logam Pb

Waktu (Menit)	Konsentrasi Logam Pb		
	Tingkat 1 (ppm)	Tingkat 2 (ppm)	Tingkat 3 (ppm)
0	3,7615	3,5826	3,3945
20	0,1972	0,0872	0,078
40	0,1881	0,0938	0,0688

Sumber: Hikmawan, 2009



**Gambar 4.3.** Penyisihan Logam Timbal (Pb) Melalui Proses Hibrida Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran

Sumber: Hikmawan, 2009

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa penyisihan logam timbal cukup besar, dimana pada tingkat 1 penyisihan yang terjadi sebesar 94,99%, pada tingkat ke-2 penyisihan yang terjadi sebesar 97,38 %, dan pada tingkat ke-3 sebesar 97,97 %. Semakin besarnya persentase penyisihan ini dikarenakan semakin banyaknya logam timbal yang membentuk endapan dan tersaring oleh membran. Sedangkan pada Tabel 4.1 terlihat konsentrasi logam timbal yang cenderung berkurang dari setiap tingkatan penyisihan. Namun, terdapat penyimpangan yang terjadi pada tingkat 2 dimana terjadi peningkatan konsentrasi timbal pada menit ke 40. Hal ini

kemungkinan disebabkan larutnya sebagian endapan sehingga kembali menjadi ion logam timbal akibat perubahan nilai pH pada penyisihan tingkat 2.

Secara keseluruhan, penyisihan yang terjadi cukup baik, akan tetapi pada tingkat ke-3, dimana keluaran pada tingkat tersebut merupakan hasil pengolahan akhir, masih tersisa sekitar 0,0688 ppm timbal yang masih ada dalam *permeate* (Tabel 4.1), sedangkan berdasarkan PERMENKES RI No. 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang syarat – syarat dan pengawasan air bersih untuk air minum dimana konsentrasi Pb maksimal adalah sebesar 0,01 ppm. Dengan demikian, air hasil pengolahan belum dapat digunakan sebagai air minum.

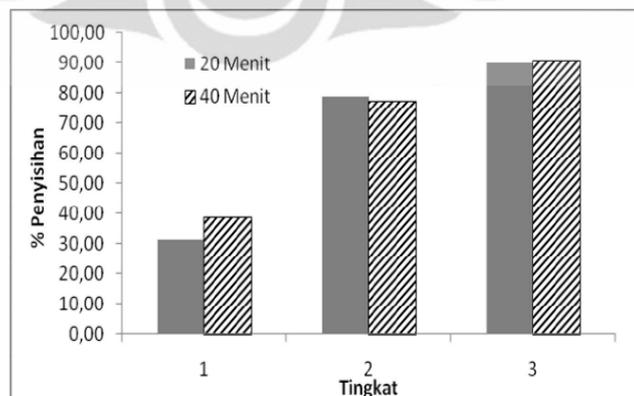
#### 4.2.2 Karakteristik Data Penyisihan Tembaga (Cu)

Penyisihan logam Cu ini dilihat dari konsentrasi ion  $\text{Cu}^{2+}$  yang terkandung dalam air olahan berdasarkan hasil reaksi antara  $\text{Cu}^{2+}$  dengan radikal OH hasil dekomposisi ozon dalam air dan menghasilkan endapan  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  yang berwarna biru (Hikmawan, 2009).

Tabel 4.2. Konsentrasi Penyisihan Logam Cu

Waktu (Menit)	Konsentrasi Logam Cu		
	Tingkat 1 (ppm)	Tingkat 2 (ppm)	Tingkat 3 (ppm)
0	6,0007	4,7993	4,0406
20	4,1112	1,0043	0,4035
40	3,6664	1,0811	0,3811

Sumber: Hikmawan, 2009



Gambar 4.4. Penyisihan Logam Cu Melalui Proses Hibrida Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran

Sumber: Hikmawan, 2009

Pada proses penyisihan logam tembaga terlihat pada Gambar 4.4 dimana pada tingkat 1 penyisihan yang terjadi sebesar 38,9 %, penyisihan pada tingkat 2 sebesar 77,47 % dan penyisihan pada tingkat 3 sebesar 90,57 %.

Meningkatnya jumlah penyisihan ini bukan dikarenakan oleh proses ozonasi, tetapi dikarenakan oleh semakin selektifnya fungsi membran sehingga dapat menyaring endapan  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ . Hal ini dikarenakan senyawa tembaga bervalensi +2 tidak bisa mengalami oksidasi. Dengan demikian proses penyisihan senyawa ini lebih cenderung pada pemisahan oleh membran.

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa penyisihan logam tembaga cukup besar, dimana penyisihan yang terjadi cukup baik, akan tetapi pada tingkat ke-3, dimana keluaran pada tingkat tersebut merupakan hasil pengolahan akhir, masih tersisa sekitar 0,3811 ppm timbal yang masih ada dalam *permeate*. Sedangkan berdasarkan PERMENKES RI No. 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang syarat – syarat dan pengawasan air bersih untuk air minum dimana konsentrasi Pb maksimal adalah sebesar 2 ppm. Dengan demikian, air hasil pengolahan sudah dapat digunakan sebagai air minum.

#### 4.2.3 Karakteristik Data Penyisihan Amonia ( $\text{NH}_3$ )

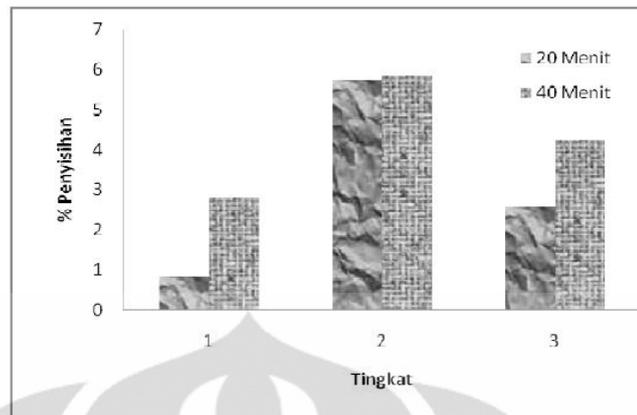
Pada proses ozonasi pada senyawa amonia ini berdasarkan oksidasi senyawa amonia membentuk senyawa nitrat dan nitrit

Tabel 4.3. Konsentrasi Penyisihan  $\text{NH}_3$

Waktu (Menit)	Konsentrasi Logam Cu		
	Tingkat 1 (ppm)	Tingkat 2 (ppm)	Tingkat 3 (ppm)
0	51,567	51,363	44,654
20	51,139	48,419	43,502
40	50,130	48,355	42,763

Sumber: Hikmawan, 2009

Dari Tabel 4.3 dan Gambar 4.5 penurunan konsentrasi dari amonia relatif kecil. Pada proses ini, penyisihan senyawa amonia tidak terlalu besar disebabkan oleh kurang reaktifnya senyawa amonia terhadap proses ozonasi. Selain itu, Pada proses oksidasi senyawa amonia tidak terjadi pengendapan hal ini menyebabkan kerja dari membran tidak seberat pada saat melakukan ozonasi logam timbal dan tembaga.



**Gambar 4.5.** Penyisihan  $\text{NH}_3$  Melalui Proses Hibrida Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran

Sumber: Hikmawan, 2009

Konsentrasi amonia yang tersisa pada *permeate* relatif besar dan jauh diatas ambang batas yang diatur dalam PERMENKES RI No. 492/MENKES/PER/IV/2010 dimana kandungan  $\text{NH}_3$  dalam air untuk minum harus lebih kecil dari 1,5 ppm. Sehingga air hasil olahan belum dapat dikatakan aman untuk dikonsumsi menjadi air minum.

#### 4.2.4 Karakteristik Data Penyisihan Linear Alkil Benzen Sulfonat (LAS)

Hasil konsentrasi penyisihan dengan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran dapat dilihat pada Tabel 4.4, penyisihan LAS dapat berjalan dengan baik dengan diperoleh konsentrasi LAS dari air *permeate* tingkat tiga sebesar 3,392 mg/L dan persen penyisihan pada tingkat 1, tingkat 2, dan tingkat 3 masing – masing sebesar 52,98 %, 59,27 %, dan 66,53 %. Peningkatan persentase LAS dapat disebabkan karena kondisi pH larutan umpan yang cenderung meningkat.

Air *permeate* tingkat tiga diperoleh sebesar 3,392 mg/L (dapat dilihat pada Tabel 4.4). Dari data tersebut dapat dinyatakan bahwa proses hibrida ozonasi – membran dapat menyisihkan LAS yang tidak dapat terdegradasi menjadi senyawa yang dapat terdegradasi. Berdasarkan salah satu penelitian dinyatakan bahwa senyawa LAS dapat terdegradasi dalam kondisi aerob pada konsentrasi < 10 mg/L (Mehrvar et. al, 2005).

**Tabel 4.4.** Konsentrasi dan Persentase Penyisihan LAS

Tingkat	Waktu (menit)	Konsentrasi LAS (ppm)	Persentase Penyisihan (%)
1	0	33,328	52,98
	20	20,149	
	40	15,671	
2	0	23,899	59,27
	20	14,532	
	40	9,733	
3	0	10,134	66,53
	20	5,458	
	40	3,392	

Sumber: Retno, 2009

Jika dilihat berdasarkan parameter nilai deterjen untuk air minum menurut PERMENKES RI No. 492/MENKES/PER/IV/2010, nilai deterjen maksimum yang diperbolehkan sebesar 0,005 mg/L, sedangkan hasil tersebut berada di atas 0,005 mg/L. Artinya air *permeate* dari hasil proses ini belum memenuhi persyaratan kualitas air sebagai air minum. Perlu adanya pengolahan kembali atau pengkondisian pada unit pengolahan air.

### 4.3 Identifikasi Laju Penyisihan

Pada bagian ini, akan dibahas mengenai hasil dari identifikasi laju reaksi dengan menggunakan suatu pendekatan matematis sederhana. Metode yang digunakan adalah menggunakan metode hukum pangkat sederhana untuk memperoleh parameter kinetika berupa nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) dan orde reaksi ( $n$ ). Metode ini dipilih karena cukup mudah untuk diaplikasikan. Penurunan persamaan kinetika yang digunakan adalah persamaan (4.1) yang kemudian dilinearisasi menjadi persamaan (4.2) dan (4.3).

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada bagian Sub Bab 4.1, nilai  $k$  dan nilai  $n$  merupakan hasil plot grafik antara variabel yang terdapat pada persamaan (4.2) dan (4.3). variabel yang digunakan adalah  $C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n}$  atau

$\frac{\ln C_A}{\ln C_{A0}}$  yang diplot sebagai sumbu Y dan  $(t - t_0)$  yang diplot sebagai sumbu X.

Dari grafik yang dihasilkan, akan diperoleh suatu persamaan linier dimana slope dari grafik tersebut adalah  $-k$  atau  $(n - 1)k$ . nilai  $k$  bergantung pada nilai  $n$  yang nilainya merupakan nilai taksiran dari 0 sampai 3 dengan interval 0,5. Nilai  $n$

terbaik adalah nilai  $n$  yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) mendekati nilai 1, akan dipilih sebagai nilai  $n$  yang memberikan nilai  $k$  yang terbaik sehingga akan terbentuk suatu persamaan kinetika yang menggambarkan proses penyisihan senyawa dengan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran.

#### 4.3.1. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Timbal

Identifikasi laju penyisihan senyawa timbal bertujuan untuk mendapatkan persamaan laju reaksi penyisihan yang sesuai untuk menggambarkan proses penyisihan yang terjadi. Dengan persamaan (4.1) dan mengganti  $C_A$  dengan  $[Pb]$  yang berarti konsentrasi senyawa Pb, maka

$$\frac{d[Pb]}{dt} = -k[Pb]^n \quad (4.4)$$

Apabila persamaan (4.4) dilinearisasi, maka akan menghasilkan

$$[Pb]^{1-n} - [Pb]_0^{1-n} = (n-1)k(t-t_0) \quad (4.5)$$

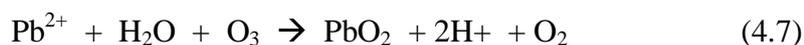
Dengan pengecualian untuk  $n = 1$

$$\ln \frac{[Pb]}{[Pb]_0} = -k(t-t_0) \quad (4.6)$$

Persamaan (4.5) dan (4.6) akan digunakan sebagai persamaan linear  $y = ax + b$  dimana yang diperoleh dari plot grafik dengan menggunakan data – data pada Tabel 4.1. Plot grafik dapat dilihat pada LAMPIRAN 1.

Tabel 4.5 menunjukkan nilai – nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) dan nilai regresi linear ( $R^2$ ) untuk masing – masing taksiran nilai orde reaksi ( $n$ ) pada setiap tingkat penyisihan senyawa Pb. Nilai – nilai tersebut berasal dari plot grafik untuk masing – masing nilai taksiran  $n$  dari 0 sampai 3 dengan interval 0,5.

Pada tingkat 1, dari Tabel 4.5 terlihat bahwa nilai  $n$  yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) yang paling mendekati 1, yaitu sebesar 0,78, adalah pada saat orde reaksi ( $n$ ) sama dengan 3. Hal ini menunjukkan bahwa pada tingkat 1, laju reaksi penyisihan Pb sangat dipengaruhi oleh konsentrasi dari Pb itu sendiri. Perubahan konsentrasi pada awal reaksi memberikan dampak yang signifikan terhadap laju reaksi penyisihan. Hal ini terjadi karena pada tingkat 1 terjadi reaksi oksidasi logam timbal oleh ozon yang menghasilkan endapan  $PbO_2$ . Reaksinya dapat dilihat pada persamaan (4.7).



Sementara itu, nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) untuk proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran pada saat  $n$  sama dengan 3 adalah sebesar  $3 \times 10^8/\text{M}^2.\text{s}$ . Sehingga apabila dibuat suatu persamaan kinetika yang menggambarkan laju penyisihan Pb pada tingkat 1, akan tersusun seperti persamaan (4.8).

$$r_{Pb1} = -\frac{d[Pb]}{dt} = 3 \times 10^8 [Pb]^3 \quad (\text{M/s}) \quad (4.8)$$

**Tabel 4.5.** Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa Pb

Penyisihan	N	$k$ ( $\text{M}^{(1-n)}.\text{s}^{-1}$ )	$R^2$
tingkat 1	0	$9,00 \times 10^{-9}$	0,702
	0,5	$4,00 \times 10^{-6}$	0,706
	1	$1,00 \times 10^{-3}$	0,714
	1,5	0,806	0,727
	2	$5,15 \times 10^2$	0,743
	2,5	$3,72 \times 10^4$	0,762
	<b>3</b>	<b><math>3,00 \times 10^8</math></b>	<b>0,78</b>
tingkat 2	0	$8,00 \times 10^{-9}$	0,701
	0,5	$4,00 \times 10^{-6}$	0,706
	1	$1,00 \times 10^{-3}$	0,717
	1,5	1,282	0,738
	2	$1,13 \times 10^3$	0,764
	2,5	$1,33 \times 10^6$	0,792
	<b>3</b>	<b><math>1,50 \times 10^9</math></b>	<b>0,819</b>
tingkat 3	0	$8,00 \times 10^{-9}$	0,702
	0,5	$4,00 \times 10^{-6}$	0,709
	1	$1,00 \times 10^{-3}$	0,728
	1,5	1,452	0,763
	2	$1,42 \times 10^3$	0,806
	2,5	$1,33 \times 10^6$	0,849
	<b>3</b>	<b><math>2,00 \times 10^9</math></b>	<b>0,887</b>

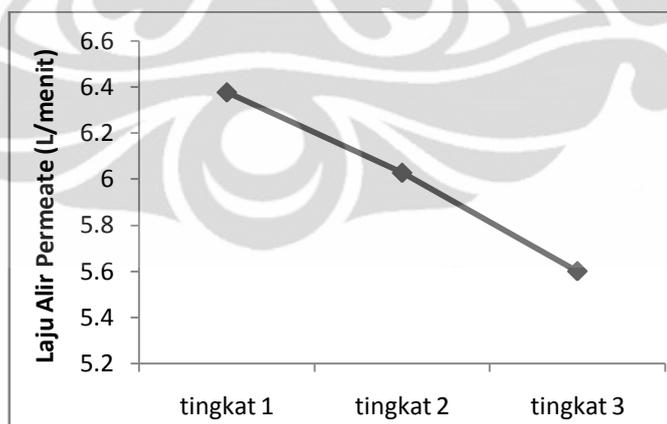
Kemudian pada tingkat 2, terlihat dalam Tabel 4.5 bahwa nilai taksiran orde reaksi ( $n$ ) yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) yang terbaik (mendekati 1) diperoleh pada saat nilai  $n$  sama dengan 3 dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,819. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat kedua, perubahan konsentrasi Pb masih memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap laju dari reaksi penyisihan Pb. Nilai konstanta laju reaksi penyisihan Pb pada tingkat 2 mengalami peningkatan menjadi  $1,5 \times 10^9/\text{M}^2.\text{s}$  sehingga penyisihan Pb juga

mengalami peningkatan. Persamaan (4.9) merupakan persamaan kinetika yang sesuai untuk kondisi pada penyisihan tingkat 2.

$$r_{Pb2} = -\frac{d[Pb]}{dt} = 1,5 \times 10^9 \cdot [Pb]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.9)$$

Selanjutnya dari Tabel 4.5, terlihat bahwa pada tingkat 3, nilai  $n$  yang memberikan nilai  $R^2$  terbaik juga pada saat  $n$  sama dengan 3. Pada saat  $n$  sama dengan 3, nilai  $R^2$  dan nilai  $k$  yang dihasilkan masing – masing adalah 0,887 dan  $2 \times 10^9/\text{M}^2 \cdot \text{s}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat 3, laju reaksi penyisihan lebih cepat daripada tingkat 1 dan tingkat 2 dikarenakan akumulasi endapan  $\text{PbO}_2$  sudah semakin banyak dan menjenuhkan membran. Hal ini terlihat pada nilai  $k$  yang lebih besar dan laju alir *permeate* yang semakin kecil (Gambar 4.6) serta pH yang meningkat cukup drastis (Gambar 4.7) daripada tingkat 1 dan tingkat 2. Peningkatan pH ini menandakan semakin besar ozon yang terdekomposisi menjadi radikal OH dan ikut bereaksi dengan ion Pb yang tidak teroksidasi membentuk senyawa  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  yang berwarna putih (Hikmawan, 2009). Jika dibuat persamaan kinetiknya, persamaan (4.10) merupakan persamaan kinetika yang sesuai untuk menggambarkan proses penyisihan Pb tingkat 3.

$$r_{Pb3} = -\frac{d[Pb]}{dt} = 2 \times 10^9 \cdot [Pb]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.10)$$

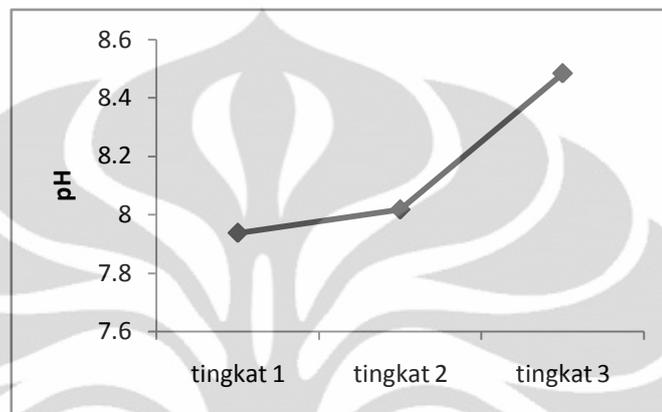


**Gambar 4.6.** Laju Alir *Permeate* Pada Penyisihan Pb

Sumber : Hikmawan, 2009 (Telah diolah kembali)

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa apabila dilihat dari segi kinetika, kinerja proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran dalam penyisihan senyawa Pb dapat dikatakan cukup berhasil apabila dilihat dari

nilai  $n$  dan  $k$  yang cukup besar. Namun demikian, persamaan kinetika ini masih harus dikaji lebih lanjut dikarenakan validasi  $R^2$  dari persamaan kinetika masih jauh dari yang diinginkan. Hal ini dapat disebabkan oleh kualitas dan kuantitas data yang kurang memadai untuk dibuat dalam suatu persamaan kinetika dengan metode hukum pangkat.



**Gambar 4.7.** Nilai pH Selama Proses Penyisihan Pb

Sumber : Hikmawan, 2009 (Telah diolah kembali)

#### 4.3.2. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Tembaga

Identifikasi laju reaksi untuk penyisihan senyawa tembaga (Cu) bertujuan untuk mendapatkan persamaan kinetika yang sesuai untuk menggambarkan proses penyisihan yang terjadi. Dengan persamaan (4.1) dengan mengganti  $C_A$  dengan  $[Cu]$  yang berarti konsentrasi senyawa Cu, maka

$$\frac{d[Cu]}{dt} = -k[Cu]^n \quad (4.11)$$

Apabila persamaan (4.11) dilinearisasi, maka akan menghasilkan

$$[Cu]^{1-n} - [Cu]_0^{1-n} = (n-1)k(t-t_0) \quad (4.12)$$

Dengan pengecualian untuk  $n = 1$

$$\ln \frac{[Cu]}{[Cu]_0} = -k(t-t_0) \quad (4.13)$$

Persamaan (4.13) dan (4.14) akan digunakan sebagai persamaan linear  $y = ax + b$  dimana yang diperoleh dari plot grafik dengan menggunakan data – data pada Tabel 4.2. Hasil plot grafik dapat dilihat pada LAMPIRAN 2.

Tabel 4.6 menunjukkan nilai-nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) dan nilai regresi linear ( $R^2$ ) untuk masing-masing taksiran nilai orde reaksi ( $n$ ) pada setiap

tingkat penyisihan senyawa Cu. Nilai-nilai tersebut berasal dari plot grafik untuk masing-masing nilai taksiran  $n$  dari 0 sampai 3 dengan interval 0,5.

**Tabel 4.6.** Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa Cu

Penyisihan	$n$	$k$ ( $M^{(1-n)} \cdot s^{-1}$ )	$R^2$
tingkat 1	0	$2,00 \times 10^{-8}$	0,864
	0,5	$2,00 \times 10^{-6}$	0,879
	1	$2,27 \times 10^{-4}$	0,895
	1,5	$2,60 \times 10^{-2}$	0,911
	2	3,056	0,926
	2,5	$3,57 \times 10^2$	0,94
	<b>3</b>	<b><math>4,19 \times 10^4</math></b>	<b>0,953</b>
tingkat 2	<b>0</b>	<b><math>3,00 \times 10^{-8}</math></b>	<b>0,681</b>
	0,5	$4,00 \times 10^{-6}$	0,67
	1	$7,58 \times 10^{-4}$	0,655
	1,5	0,13	0,635
	2	23,5	0,611
	2,5	$4,42 \times 10^3$	0,583
	3	$1,00 \times 10^6$	0,552
tingkat 3	0	$3,00 \times 10^{-8}$	0,705
	0,5	$6,00 \times 10^{-6}$	0,711
	1	$1,00 \times 10^{-3}$	0,721
	1,5	0,278	0,736
	2	73,91	0,754
	2,5	$2,14 \times 10^4$	0,775
	<b>3</b>	<b><math>5,00 \times 10^6</math></b>	<b>0,796</b>

Pada tingkat 1, dari Tabel 4.6 terlihat bahwa nilai  $n$  yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) yang paling mendekati 1, yaitu sebesar 0,953, adalah pada saat orde reaksi ( $n$ ) sama dengan 3. Hal ini menunjukkan bahwa pada tingkat 1, laju reaksi penyisihan Cu sangat dipengaruhi oleh konsentrasi dari Cu itu sendiri. Perubahan konsentrasi pada awal reaksi memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap laju reaksi penyisihan. Sementara itu, nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) untuk proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran pada saat  $n$  sama dengan 3 cukup besar, yaitu sebesar  $4,19 \times 10^4/M^2 \cdot s$ . Nilai  $k$  yang relatif cukup besar ini disebabkan oleh sifat Cu bervalensi +2 yang tidak mungkin dioksidasi oleh ozon atau radikal OH, tetapi menghasilkan endapan dari hasil reaksi dengan ion OH<sup>-</sup>. Sehingga dapat dibuat suatu persamaan kinetika yang

sesuai untuk menggambarkan kinerja dari proses penyisihan Cu pada tingkat 1 yaitu persamaan (4.14)

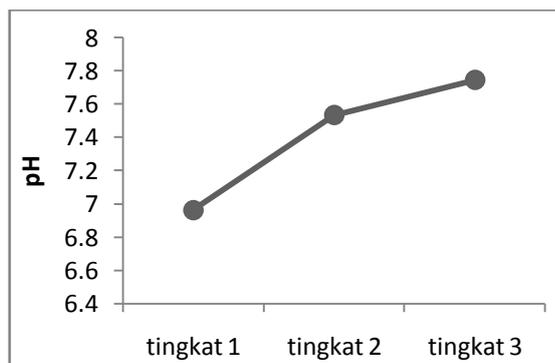
$$r_{Cu1} = -\frac{d[Cu]}{dt} = 4.19 \times 10^4 [Cu]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.14)$$

Selanjutnya untuk tingkat 2, terlihat dalam Tabel 4.6 bahwa nilai taksiran orde reaksi ( $n$ ) yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) yang terbaik diperoleh pada saat nilai  $n$  sama dengan 0 dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,681. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat kedua, perubahan konsentrasi Cu tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap kecepatan dari reaksi penyisihan Cu. Disamping itu, nilai  $k$  yang didapatkan pada harga taksiran  $n$  sama dengan 0 sangat kecil, yaitu sebesar  $3 \times 10^{-8}$  M/s. Dengan nilai  $k$  yang sangat kecil, menandakan hampir tidak terjadi reaksi sama sekali terhadap ion Cu. Akan tetapi, laju reaksi penyisihan Cu meningkat yang terlihat dari persentase penyisihan sebesar 77,47%. Peningkatan ini disebabkan oleh semakin selektifnya membran dalam melakukan filtrasi endapan  $Cu(OH)_2$  yang tersaring oleh membran akibat reaksi antara ion Cu dengan ion  $OH^-$  yang terbentuk pada tingkat 1 (persamaan 4.15). Pembentukan ion  $OH^-$  ini adalah hasil dari dekomposisi ozon dalam air yang menyebabkan pH air naik (Persamaan 4.15 dan Gambar 4.8).



Apabila dibuat persamaan kinetiknya, persamaan (4.17) merupakan persamaan kinetika yang cocok untuk kondisi pada penyisihan tingkat 2.

$$r_{Cu2} = -\frac{d[Cu]}{dt} = 3 \times 10^{-8} \text{ (M/s)} \quad (4.17)$$

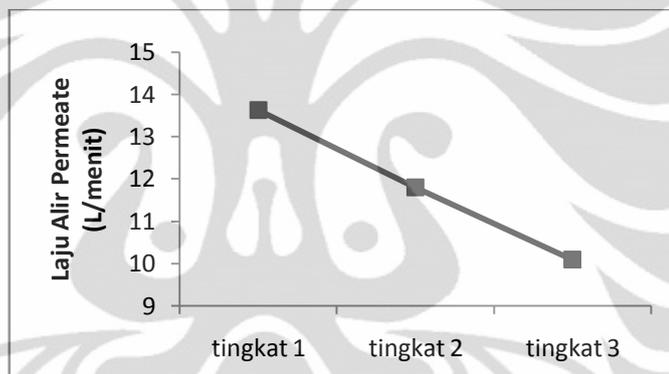


**Gambar 4.8.** Nilai pH Selama Proses Penyisihan Cu

Sumber : Hikmawan, 2009 (Telah diolah kembali)

Berdasarkan Tabel 4.6, untuk tingkat 3, nilai  $n$  yang memberikan nilai  $R^2$  terbaik sama dengan nilai  $n$  pada tingkat 1, yaitu 3, dimana pada nilai  $n$  tersebut nilai  $R^2$  pada tingkat 3 sebesar 0,796. Namun, nilai  $k$  pada tingkat 3 lebih besar daripada tingkat 1, yaitu sebesar  $5,00 \times 10^6 / M^2 \cdot s$ . Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat 3, laju reaksi penyisihan sangat cepat dikarenakan nilai  $k$  dan nilai  $n$  yang cukup besar. Besarnya nilai  $n$  dan  $k$  ini diakibatkan oleh semakin selektifnya membran dalam menyaring endapan  $Cu(OH)_2$  yang semakin banyak terbentuk. Pembentukan endapan yang semakin banyak ini menyebabkan laju alir permeate pada membran menjadi semakin kecil (Gambar 4.9). Persamaan (4.18) merupakan persamaan kinetika yang menggambarkan proses penyisihan Cu tingkat 3.

$$r_{Cu3} = -\frac{d[Cu]}{dt} = 5,00 \times 10^6 \cdot [Cu]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.18)$$



**Gambar 4.9.** Laju Alir Permeate Pada Penyisihan Cu

Sumber : Hikmawan, 2009 (Telah diolah kembali)

Dari uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa apabila dilihat dari segi kinetika, kinerja proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran dalam penyisihan senyawa Cu dapat dikatakan cukup berhasil. Akan tetapi, nilai  $R^2$  yang dihasilkan dari data-data penyisihan Cu dengan metode hukum pangkat masih jauh dari yang diharapkan, terutama pada tingkat 2 dan 3. Sehingga untuk tingkat 2 dan 3, model persamaan hukum pangkat belum cukup menggambarkan kinetika proses penyisihan yang terjadi.

#### 4.3.3. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Amonia

Identifikasi laju reaksi untuk penyisihan senyawa amonia ( $NH_3$ ) bertujuan untuk mendapatkan persamaan kinetika yang sesuai untuk menggambarkan proses

penyisihan amonia yang terjadi. Dengan persamaan (4.1) dengan mengganti  $C_A$  dengan  $[NH_3]$  yang berarti konsentrasi senyawa  $NH_3$ , maka

$$\frac{d[NH_3]}{dt} = -k[NH_3]^n \quad (4.19)$$

Apabila persamaan (4.19) dilinearisasi, maka akan menghasilkan

$$[NH_3]^{1-n} - [NH_3]_0^{1-n} = (n-1)k(t-t_0) \quad (4.20)$$

Dengan pengecualian untuk  $n = 1$

$$\ln \frac{[NH_3]}{[NH_3]_0} = -k(t-t_0) \quad (4.21)$$

Persamaan (4.20) dan (4.21) akan digunakan sebagai persamaan linear  $y = ax + b$  dimana yang diperoleh dari plot grafik dengan menggunakan data – data pada Tabel 4.3. Hasil plot grafik dapat dilihat pada LAMPIRAN 3.

Tabel 4.7 menunjukkan nilai – nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) dan nilai regresi linear ( $R^2$ ) untuk masing – masing taksiran nilai orde reaksi ( $n$ ) pada setiap tingkat penyisihan senyawa  $NH_3$ . Nilai – nilai tersebut berasal dari plot grafik untuk masing – masing nilai taksiran  $n$  dari 0 sampai 3 dengan interval 0,5.

Untuk tingkat 1, dari Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa nilai  $n$  yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) yang paling mendekati 1, yaitu sebesar 0,938, adalah pada saat orde reaksi ( $n$ ) sama dengan 0. Hal ini menunjukkan bahwa pada tingkat 1, laju reaksi penyisihan  $NH_3$  tidak dipengaruhi oleh konsentrasi dari  $NH_3$  itu sendiri. Perubahan konsentrasi pada awal reaksi tidak memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap laju reaksi penyisihan.

Disamping itu, nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) untuk proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran pada saat  $n$  sama dengan 0 sangat kecil, yaitu  $3,00 \times 10^{-8}$  M/s. Hal ini menyebabkan persentase penyisihan pada tingkat 1 kecil sekali, yaitu hanya sebesar 2,79 %. Kecilnya persentase penyisihan disebabkan oleh lemahnya laju reaksi penyisihan  $NH_3$  dikarenakan sifat senyawa ini yang kurang reaktif dengan ozon dan kondisi pH sistem yang terlalu mendekati netral. Pada tingkat ini pun proses filtrasi membran masih tergolong belum optimal.

**Tabel 4.7.** Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa NH<sub>3</sub>

Penyisihan	n	k (M <sup>(1-n)</sup> .s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
tingkat 1	<b>0</b>	<b>3,00 x 10<sup>-8</sup></b>	<b>0,938</b>
	0,5	6,00 x 10 <sup>-7</sup>	0,937
	1	1,08 x 10 <sup>-5</sup>	0,936
	1,5	1,98 x 10 <sup>-4</sup>	0,935
	2	3,61 x 10 <sup>-3</sup>	0,935
	2,5	6,60 x 10 <sup>-2</sup>	0,934
	3	1,2055	0,933
tingkat 2	0	9,00 x 10 <sup>-8</sup>	0,719
	0,5	1,60 x 10 <sup>-6</sup>	0,719
	1	3,00 x 10 <sup>-5</sup>	0,719
	1,5	5,54 x 10 <sup>-4</sup>	0,72
	2	1,02 x 10 <sup>-2</sup>	0,72
	2,5	1,89 x 10 <sup>-1</sup>	0,721
	<b>3</b>	<b>3,486</b>	<b>0,721</b>
tingkat 3	0	5,00 x 10 <sup>-8</sup>	0,981
	0,5	1,00 x 10 <sup>-6</sup>	0,982
	1	2,00 x 10 <sup>-5</sup>	0,982
	1,5	3,70 x 10 <sup>-4</sup>	0,984
	2	7,00 x 10 <sup>-3</sup>	0,984
	2,5	1,43 x 10 <sup>-1</sup>	0,985
	<b>3</b>	<b>2,8315</b>	<b>0,986</b>

Apabila dibuat suatu persamaan kinetika yang sesuai untuk menggambarkan kinerja dari proses penyisihan NH<sub>3</sub> pada tingkat 1 maka persamaan (4.22) adalah persamaan yang terbentuk.

$$r_{NH_3,1} = -\frac{d[NH_3]}{dt} = 3,00 \times 10^{-8} \text{ (M/s)} \quad (4.22)$$

Kemudian untuk tingkat 2, dapat dilihat dalam Tabel 4.7 bahwa nilai taksiran orde reaksi (*n*) yang memberikan harga regresi linear (R<sup>2</sup>) yang tidak terlalu baik (jauh dari 1) dan yang terbaik diperoleh pada saat nilai *n* berada pada nilai 3 dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,721. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat kedua, perubahan konsentrasi NH<sub>3</sub> sangat memberikan dampak yang signifikan terhadap kecepatan dari reaksi penyisihan NH<sub>3</sub>. Pada tingkat ini kemungkinan mulai terbentuk radikal OH yang mampu mengoksidasi sebagian kecil NH<sub>3</sub>

menjadi senyawa nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dan akan dioksidasi lebih lanjut membentuk senyawa nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) (Von Gutten, 2002).

Di samping itu, nilai  $k$  yang didapatkan pada harga taksiran  $n$  sama dengan 3 cukup kecil, yaitu  $3,486/\text{M}^2\cdot\text{s}$ . Dengan nilai  $k$  yang cukup kecil, persentase pada tingkat 2 juga tidak jauh berbeda dengan tingkat 1, hanya saja meningkat sedikit menjadi sebesar 5,86%. Jika dibuat persamaan kinetiknya, persamaan (4.23) merupakan persamaan kinetika yang cocok untuk kondisi pada penyisihan tingkat 2.

$$r_{\text{NH}_3,2} = -\frac{d[\text{NH}_3]}{dt} = 3,486[\text{NH}_3]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.23)$$

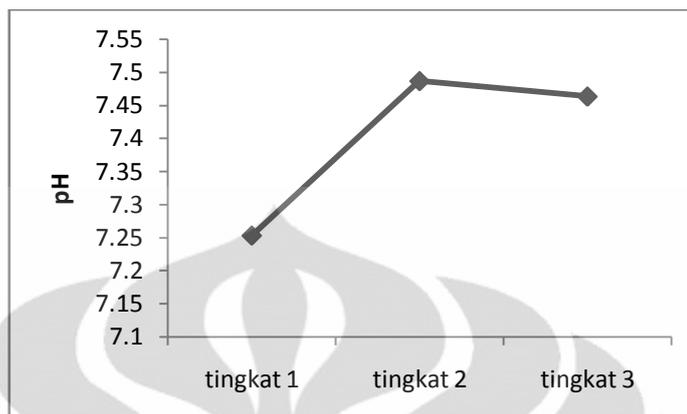
Berdasarkan Tabel 4.7, pada tingkat 3, nilai  $n$  yang memberikan nilai  $R^2$  terbaik adalah nilai  $n$  sebesar 3, dimana pada nilai  $n$  tersebut nilai  $R^2$  sama dengan 0,986. Namun, nilai  $k$  pada tingkat 3 lebih kecil daripada tingkat 2, yaitu sebesar  $2,8315/\text{M}^2\cdot\text{s}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat 3, laju reaksi penyisihan kembali turun sejalan dengan nilai  $k$  yang sangat kecil dan membuat persentase penyisihan  $\text{NH}_3$  menjadi hanya sebesar 4,32 %.

Penurunan laju ini dapat disebabkan oleh semakin besarnya konsentrasi ion nitrit dan nitrat yang terbentuk sehingga menurunkan pH sistem proses penyisihan (Gambar 4.10). selain itu, selektivitas membran dalam menyaring  $\text{NH}_3$  tidak terlalu optimal dalam proses penyisihan ini karena proses ini tidak menghasilkan banyak endapan seperti pada penyisihan Pb dan Cu. Persamaan (4.24) adalah persamaan kinetika yang dapat menggambarkan proses penyisihan amonia tingkat 3.

$$r_{\text{NH}_3,3} = -\frac{d[\text{NH}_3]}{dt} = 2,8315.[\text{NH}_3]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.24)$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa apabila dilihat dari segi kinetika, kinerja proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran dalam penyisihan senyawa  $\text{NH}_3$  belum begitu optimal terlihat dari lambatnya laju reaksi penyisihan yang disebabkan oleh nilai  $k$  yang relatif kecil. Hal ini dikarenakan sifat amonia yang kurang reaktif terhadap ozon dan pH sistem yang kurang besar. Reaksi  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  dengan ozon berlangsung sangat lambat, diperkirakan konstanta kecepatan reaksinya dengan ozon sekitar  $20/\text{M}\cdot\text{s}$  (atau mendekati 0) dengan  $t_{1/2} = 96$  jam sedangkan proses oksidasi oleh radikal

hidroksida dapat berlangsung lebih cepat yaitu  $9,7 \times 10^7/\text{M.s.}$ (Urs von Gunten, 2002).



**Gambar 4.10.** Nilai pH Pada Proses Penyisihan  $\text{NH}_3$   
Sumber : Hikmawan, 2009 (Telah diolah kembali)

#### 4.3.4. Identifikasi Laju Penyisihan Senyawa Linear Alkil Benzen Sulfonat

Identifikasi laju reaksi untuk penyisihan senyawa Linear Alkil Benzen Sulfonat (LAS) bertujuan untuk mendapatkan persamaan kinetika yang sesuai untuk menggambarkan proses penyisihan LAS yang terjadi. Dengan persamaan (4.1) dengan mengganti  $C_A$  dengan  $[\text{LAS}]$  yang berarti konsentrasi senyawa LAS, maka

$$\frac{d[\text{LAS}]}{dt} = -k[\text{LAS}]^n \quad (4.25)$$

Apabila persamaan (4.25) dilinearisasi, maka akan menghasilkan

$$[\text{LAS}]^{1-n} - [\text{LAS}]_0^{1-n} = (n-1)k(t-t_0) \quad (4.26)$$

Dengan pengecualian untuk  $n = 1$

$$\ln \frac{[\text{LAS}]}{[\text{LAS}]_0} = -k(t-t_0) \quad (4.27)$$

Persamaan (4.26) dan (4.27) akan digunakan sebagai persamaan linear  $y = ax + b$  dimana yang diperoleh dari plot grafik dengan menggunakan data – data pada Tabel 4.4. Hasil plot grafik dapat dilihat pada LAMPIRAN 4.

Tabel 4.8 menunjukkan nilai – nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) dan nilai regresi linear ( $R^2$ ) untuk masing – masing taksiran nilai orde reaksi ( $n$ ) pada setiap tingkat penyisihan senyawa LAS. Nilai – nilai tersebut berasal dari plot grafik untuk masing – masing nilai taksiran  $n$  dari 0 sampai 3 dengan interval 0,5.

**Tabel 4.8.** Hasil Pengolahan Data Kinetika Untuk Penyisihan Senyawa LAS

Penyisihan	n	$k$ ( $M^{(1-n)} \cdot s^{-1}$ )	$R^2$
tingkat 1	0	$2,00 \times 10^{-8}$	0,91
	0,5	$2,00 \times 10^{-6}$	0,934
	1	$3,35 \times 10^{-4}$	0,957
	1,5	$4,00 \times 10^{-2}$	0,975
	2	4,978	0,99
	2,5	$6,17 \times 10^2$	0,998
	<b>3</b>	<b><math>7,70 \times 10^4</math></b>	<b>1</b>
tingkat 2	0	$2,00 \times 10^{-8}$	0,959
	0,5	$2,00 \times 10^{-6}$	0,981
	1	$3,82 \times 10^{-4}$	0,995
	<b>1,5</b>	<b><math>5,60 \times 10^{-2}</math></b>	<b>1</b>
	2	8,489	0,994
	2,5	$1,29 \times 10^3$	0,981
	3	$2,01 \times 10^5$	0,96
tingkat 3	0	$9,00 \times 10^{-9}$	0,942
	0,5	$2,00 \times 10^{-6}$	0,973
	1	$4,68 \times 10^{-4}$	0,993
	<b>1,5</b>	<b>0.11</b>	<b>1</b>
	2	27,21	0,992
	2,5	$6,80 \times 10^3$	0,972
	3	$1,74 \times 10^6$	0,944

Pada tingkat 1, dari Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa nilai  $n$  yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) sama dengan 1 adalah pada saat orde reaksi ( $n$ ) sama dengan 3. Hal ini menunjukkan bahwa pada tingkat 1, laju reaksi penyisihan LAS sangat dipengaruhi oleh konsentrasi dari LAS itu sendiri. Perubahan konsentrasi pada awal reaksi memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap laju reaksi penyisihan. Hal ini seiring dengan nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) untuk proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran pada saat  $n$  sama dengan 3 cukup besar, yaitu  $7,70 \times 10^4/M^2 \cdot s$ . Besarnya nilai  $k$  ini mengindikasikan bahwa pada tingkat 1 terjadi reaksi oksidasi LAS oleh radikal OH lebih dominan terjadi daripada reaksi oksidasi dengan ozon. Rendahnya persentase penyisihan disebabkan oleh kinerja membran dalam melakukan proses filtrasi belum cukup optimal untuk menyisihkan LAS pada penyisihan tingkat 1. Dengan demikian, dapat dibuat suatu persamaan kinetika

yang sesuai untuk menggambarkan kinerja dari proses penyisihan LAS pada tingkat 1 yaitu persamaan (4.28)

$$r_{LAS1} = -\frac{d[LAS]}{dt} = 7,70 \times 10^4 [LAS]^3 \text{ (M/s)} \quad (4.28)$$

Kemudian untuk tingkat 2, terlihat dalam Tabel 4.8 bahwa nilai taksiran orde reaksi ( $n$ ) yang memberikan harga regresi linear ( $R^2$ ) sama dengan 1 diperoleh pada saat nilai  $n$  sama dengan 1,5. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat kedua, perubahan konsentrasi LAS masih cukup memberikan dampak yang signifikan terhadap kecepatan dari reaksi penyisihan LAS.

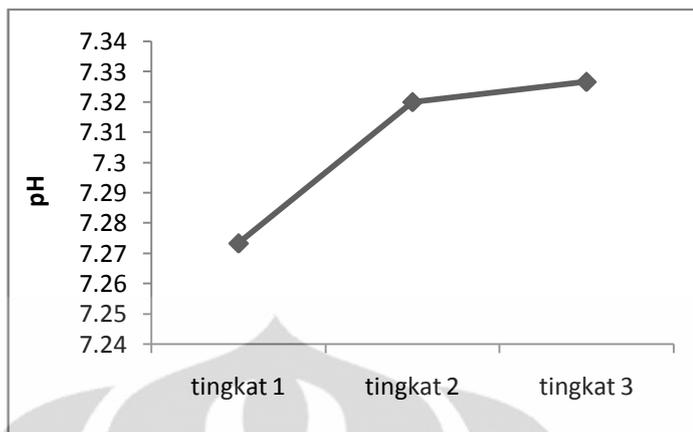
Namun, nilai  $k$  yang didapatkan pada harga taksiran  $n$  sama dengan 1,5 menjadi lebih kecil daripada tingkat 1, yaitu sebesar  $5,60 \times 10^{-2}/M^{0,5}$ .s. Meskipun dengan nilai  $k$  yang lebih kecil daripada tingkat 1, persentase penyisihan LAS menjadi meningkat, yaitu sebesar 59,27 %. Peningkatan ini disebabkan oleh meningkatnya pH (Gambar 4.11) yang dapat meningkatkan kinerja proses ozonasi LAS serta terjadinya *fouling* pada membran yang menurunkan laju alir *permeatena*. Jika dibuat persamaan kinetiknya, persamaan (4.29) merupakan persamaan kinetika yang sesuai untuk kondisi pada penyisihan tingkat 2.

$$r_{LAS2} = -\frac{d[LAS]}{dt} = 5,60 \times 10^{-2} [LAS]^{1,5} \text{ (M/s)} \quad (4.29)$$

Berdasarkan Tabel 4.8, pada tingkat 3, nilai  $n$  yang memberikan nilai  $R^2$  terbaik kembali diperoleh juga pada saat  $n$  sama dengan 1,5, dimana pada nilai  $n$  tersebut nilai  $R^2$  sama dengan 1. Namun, nilai  $k$  pada tingkat 3 lebih besar daripada tingkat 2, yaitu sebesar  $0,11/M^{0,5}$ .s. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tingkat 3, laju reaksi penyisihan lebih cepat dikarenakan nilai  $k$  yang lebih besar dan membuat persentase penyisihan LAS menjadi sebesar 66,53 %.

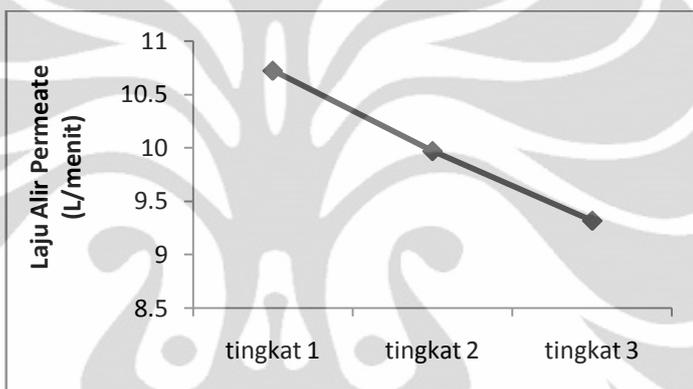
Peningkatan proses penyisihan ini sejalan dengan semakin meningkatnya pH yang sangat berpengaruh dalam proses ozonasi LAS pada bagian *pretreatment* membran. Selain itu, pada tingkat ini juga terbentuk semakin banyak *fouling* pada permukaan membran yang menyebabkan penurunan laju alir pada bagian *permeate* (Gambar 4.12). Persamaan (4.30) merupakan persamaan kinetika yang menggambarkan proses penyisihan Pb tingkat 3.

$$r_{LAS3} = -\frac{d[LAS]}{dt} = 0,11 \cdot [LAS]^{1,5} \text{ (M/s)} \quad (4.30)$$



**Gambar 4.11.** Nilai pH Selama Proses Penyisihan LAS

Sumber : Retno, 2009 (Telah diolah kembali)



**Gambar 4.12.** Laju alir *permeate* selama proses penyisihan LAS

Sumber : Retno, 2009 (Telah diolah kembali)

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa apabila dilihat dari segi kinetika, kinerja proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran dalam penyisihan senyawa LAS belum begitu optimal terlihat dari lambatnya laju reaksi penyisihan yang disebabkan oleh nilai  $k$  untuk tingkat 2 dan 3 yang relatif kecil. Hal ini dikarenakan sifat LAS yang kurang reaktif terhadap ozon dan pH sistem yang kurang besar. Reaksi antara ozon dan senyawa LAS berlangsung lambat ( $k_{O_3} = 3,68/M.s$ ), namun bereaksi cepat dengan radikal hidroksida ( $k_{OH\cdot} = 1,16.10^{10}/M.s$ ). Reaksi antara radikal hidroksida dengan gugus sulfonat, gugus benzena dan gugus hidrokarbon pada rantai lurus yang terdapat pada senyawa LAS berlangsung cepat sehingga akan meningkatkan penyisihan LAS (Bealtran, 2000).

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari Penelitian mengenai identifikasi laju reaksi dari reaksi penyisihan Timbal (Pb), Tembaga (Cu), Amonia (NH<sub>3</sub>), dan Linear Alkil Benzen Sulfonat (LAS) melalui proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran yang telah dilakukan, dimana identifikasi laju reaksi tersebut dilakukan dengan pendekatan matematis sederhana menggunakan metode hukum pangkat, dapat ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya:

1. Dari data – data yang diperlukan untuk identifikasi laju reaksi, diketahui bahwa proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran merupakan salah satu alternatif dari teknologi pengolahan air minum yang efektif dalam menyisihkan senyawa – senyawa seperti timbal, tembaga, dan LAS. Sedangkan untuk senyawa amonia, proses hibrida ini masih belum efektif.
2. Dikarenakan ketidaktersediaan data konsentrasi ozon pada air hasil olahan, maka persamaan kinetika hanya dipengaruhi oleh konstanta laju reaksi dari proses gabungan dan konsentrasi polutan.
3. Pada identifikasi laju reaksi proses penyisihan timbal, diketahui bahwa nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) pada tingkat 1 sebesar  $3 \times 10^8 / M^2 \cdot s$ , tingkat 2 sebesar  $1,5 \times 10^9 / M^2 \cdot s$ , dan tingkat 3 sebesar  $2 \times 10^9 / M^2 \cdot s$ .
4. Pada identifikasi laju reaksi proses penyisihan tembaga, dihasilkan nilai konstanta laju reaksi ( $k$ ) pada tingkat 1, tingkat 2, dan tingkat 3 masing-masing sebesar  $4,19 \times 10^4 / M^2 \cdot s$ ,  $3 \times 10^{-8} M/s$ , dan  $5 \times 10^6 / M^2 \cdot s$ .
5. Pada identifikasi laju reaksi proses penyisihan amonia, menjelaskan bahwa laju penyisihan amonia sangat kecil dimana konstanta laju reaksi penyisihan amonia pada tingkat 1, tingkat 2, dan tingkat 3 masing-masing hanya sebesar  $3,00 \times 10^{-8} M/s$ ,  $3,486 / M^2 \cdot s$ , dan  $2,8315 / M^2 \cdot s$ .

6. Pada identifikasi laju reaksi proses penyisihan linier alkil benzene sulfonat, didapatkan konstanta laju reaksi penyisihan pada tingkat 1, tingkat 2, dan tingkat 3 masing-masing sebesar  $7,70 \times 10^4/M^2.s$ ,  $5,60 \times 10^{-2}/M^{0.5}.s$ , dan  $0,11/M^{0.5}.s$ .
7. Air hasil olahan proses hibrida ozonasi gelembung mikro dan filtrasi membran masih belum layak dikonsumsi sebagai air minum dikarenakan masih berada diatas ambang batas yang diatur dalam PERMENKES RI No. 492/MENKES/PER/IV/2010, hanya penyisihan senyawa tembaga yang dapat dikatakan cukup berhasil menurunkan konsentrasi sampai dibawah ambang batas.
8. Sebagian persamaan kinetika yang dihasilkan masih belum cukup sesuai untuk menggambarkan kinetika penyisihan yang terjadi dikarenakan nilai koefisien korelasi regresi ( $R^2$ ) untuk sebagian data dengan persamaan yang dihasilkan masih jauh dari harapan.

## 5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya

1. Diharapkan pada penelitian selanjutnya, dapat diperoleh data mengenai konsentrasi ozon residual agar pengolahan data untuk identifikasi laju reaksi dapat dilakukan baik terhadap polutan maupun terhadap ozon.
2. Dikarenakan pentingnya pengaruh pH terhadap proses ozonasi, maka pada penelitian selanjutnya diharapkan untuk menambahkan variasi pH agar bisa terlihat secara signifikan perubahan pH terhadap proses penyisihan polutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2008). [www.chemicaland21.com](http://www.chemicaland21.com). Tanggal akses 1 April 2011.
- Anonim2. (2004). *Penggunaan Deterjen Bagi Kesehatan dan Lingkungan*. *Buletin Melsa Edisi 46*. <http://buletin.melsa.net.id/news/46deterjen.html>. Tanggal Akses 1 April 2011.
- Bealtran, Fernando J. (2004). *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Treatment*. Florida : Lewis Publishers.
- Bealtran, Fernando J., Juan F. Garcia – Araya and Pedro M. Alvarez. (2000). “Sodium Dodecylbenzenesulfonate Removal from Water and Wastewater 1. Kinetics of Decomposition of Ozone.” *American Chemical Society* (2000).
- Gunten, Urs von. (2002). “Ozonation of Drinking Water : Part I. Oxidation Kinetics and Products Formation.” *Water Research* (2002).
- HERA. (2009). *Linear Alkylbenzene Sulphonate*. Tanggal akses 1 April 2011.
- Hermawan, Donik. (2008). *Perancangan Pabrik Ammonium Nitrate dari Ammonia dan Asam Nitrat Kapasitas 150.000 Ton/Tahun. Tugas Akhir*. Surakarta: Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Hikmawan, Teguh. (2009). *Proses Pengolahan Air yang Mengandung Tembaga, Timbal, dan Amonia dengan Proses Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran*. *Skripsi*. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Lembaga Kajian Ekologi dan Konservasi Lahan Basah. (2003). *Selamatkan Sungai di Indonesia, Terapkan Pajak Bagi Pencemar*. Terranet: [www.terranet.or.id](http://www.terranet.or.id). Tanggal akses 1 April 2011.
- Mehrvar, Mehrab, Gelareh Bankian and Nabil Abdel – Jabbar. (2005). “Effects of Pilot – Plant Photochemical Pre – Treatment (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) on The Biodegradability of Aqueous Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)”. *International Journal of Photoenergy* (2005).

- Menteri Kesehatan Republik Indonesia. (2010). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum.*
- Metcalf & Eddy. Inc. (Tchobangoglous, G. & F.L. Burton).(1991). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse.* Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Rahayu, Suparni Setyowati. (2009). *Proses Elektroplating Tembaga – Nikel – Khrom.* Situs Kimia Indonesia: [www.chem-is-try.org](http://www.chem-is-try.org).
- Retno P., Sri. (2009). *Teknologi Pengolahan Air yang Mengandung Linear Alkil Benzen Sulfonat (LAS) dan Amonia dengan Proses Oksidasi Lanjut dan Filtrasi Membran.* Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Rozi, Fahrur. (2009). *Studi Hidrodinamika dan Uji Kinerja Penyisihan Logam Besi(Fe) dan Mangan (Mn) pada Unit Pengolahan Air yang Menggunakan Proses Ozonasi Gelembung Mikro dan Filtrasi Membran.* Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Schlichter, B., V. Mavrov, H. Chmiel. (2003). “Study of a Hybrid Process Combining Ozonation and Membrane Filtration – Filtration of Model Sulitions”. *Desalination*, Vol.156, 257 – 265.
- Slamet, Juli Soemirat. (1994). *Kesehatan Lingkungan.* Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Widowati, Wahyu., Sationo, Astiana, dan Jusuf, Raymond. (2008). *Efek Toksik Logam.* Yogyakarta: Penerbit Andi.

## LAMPIRAN

### LAMPIRAN 1. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TIMBAL

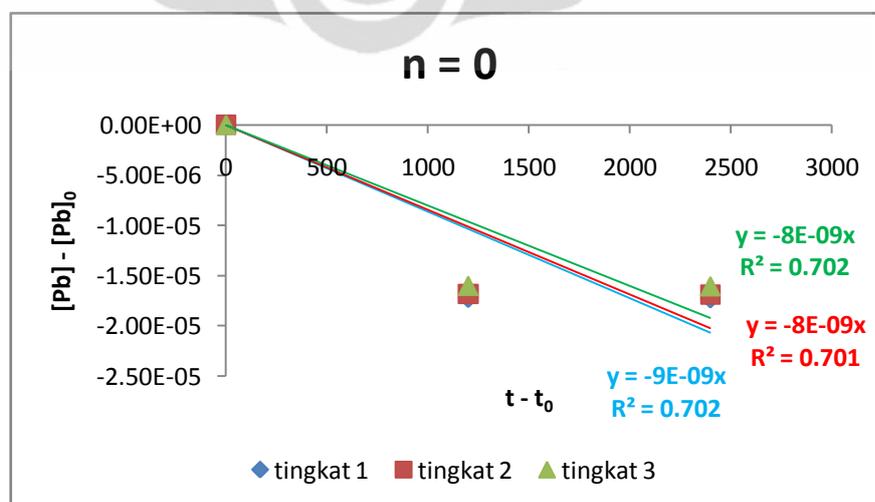
#### Data Penyisihan Senyawa Timbal (Data Kinetika)

Tingkat	Waktu (s)	konsentrasi Pb (ppm)	konsentrasi Pb (M)
1	0	3,7615	$1,82 \times 10^{-5}$
	1200	0,1972	$9,52 \times 10^{-7}$
	2400	0,1881	$9,08 \times 10^{-7}$
2	0	3,5826	$1,73 \times 10^{-5}$
	1200	0,0872	$4,53 \times 10^{-7}$
	2400	0,0938	$4,21 \times 10^{-7}$
3	0	3,3945	$1,64 \times 10^{-5}$
	1200	0,078	$3,76 \times 10^{-7}$
	2400	0,06883	$3,32 \times 10^{-7}$

#### Pengolahan Data Kinetika

- $n = 0$

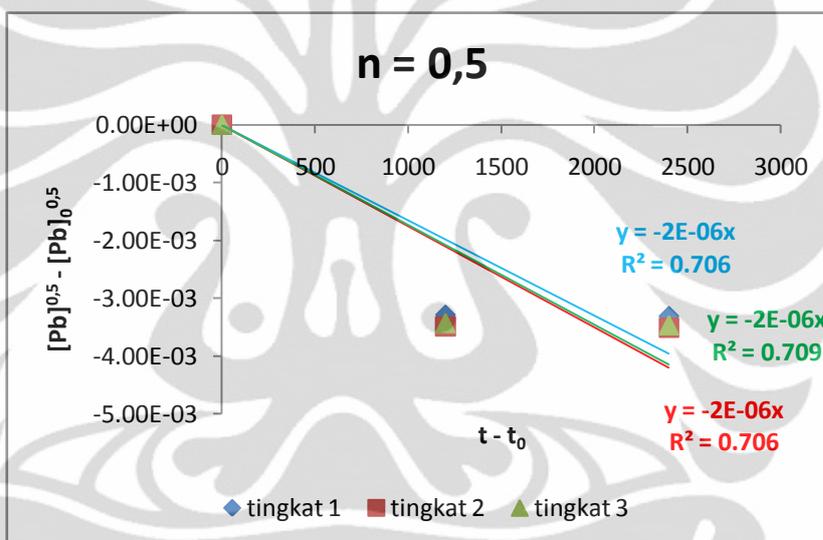
Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Pb] - [Pb]_0$ (Y)
1	0	0
	1200	$-1,72 \times 10^{-5}$
	2400	$-1,72 \times 10^{-5}$
2	0	0
	1200	$-1,68 \times 10^{-5}$
	2400	$-1,69 \times 10^{-5}$
3	0	0
	1200	$-1,60 \times 10^{-5}$
	2400	$-1,61 \times 10^{-5}$



**LAMPIRAN 1. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TIMBAL (lanjutan)**

- $n = 0,5$

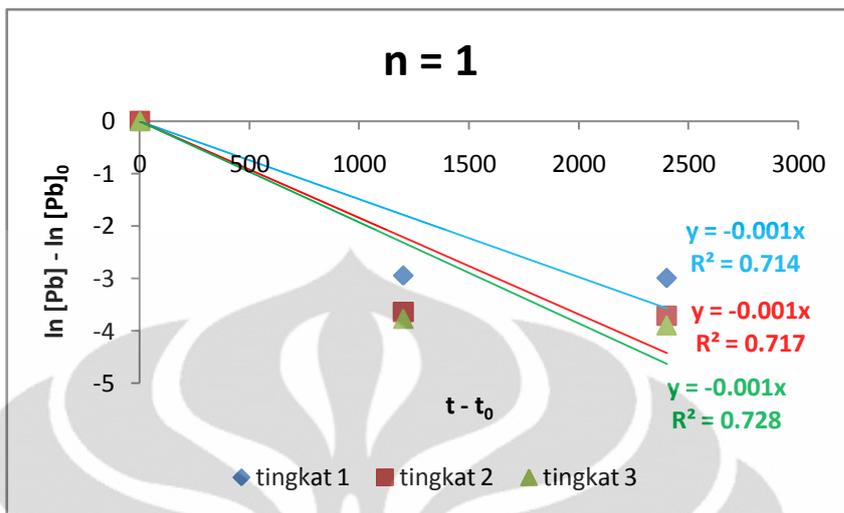
Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Pb]^{0.5}$	$[Pb]^{0.5} - [Pb]_0^{0.5}$ (Y)
1	0	$4,26 \times 10^{-3}$	0
	1200	$9,76 \times 10^{-4}$	$-3,29 \times 10^{-3}$
	2400	$9,53 \times 10^{-4}$	$-3,31 \times 10^{-3}$
2	0	$4,16 \times 10^{-3}$	0
	1200	$6,73 \times 10^{-4}$	$-3,49 \times 10^{-3}$
	2400	$6,49 \times 10^{-4}$	$-3,51 \times 10^{-3}$
3	0	$4,05 \times 10^{-3}$	0
	1200	$6,14 \times 10^{-4}$	$-3,43 \times 10^{-3}$
	2400	$5,76 \times 10^{-4}$	$-3,47 \times 10^{-3}$



- $n = 1$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$\ln [Pb]$	$\ln [Pb] - \ln [Pb]_0$ (Y)
1	0	-10,9166	0
	1200	-13,8650	-2,9484
	2400	-13,9122	-2,9956
2	0	-10,9654	0
	1200	-14,6080	-3,6426
	2400	-14,6810	-3,7156
3	0	-11,0193	0
	1200	-14,7925	-3,7732
	2400	-14,9176	-3,8983

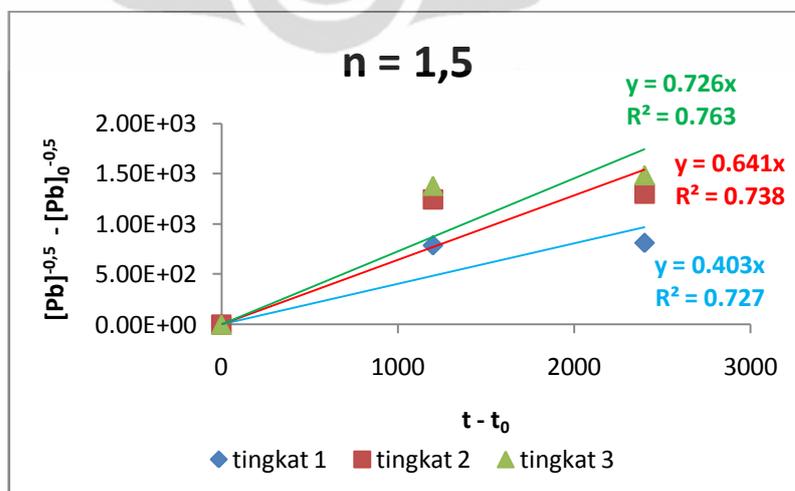
**LAMPIRAN 1. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TIMBAL (lanjutan)**



$k = -\text{slope}$

- **n = 1,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Pb]^{-0,5}$	$[Pb]^{-0,5} - [Pb]_0^{-0,5}$ (Y)
1	0	$2,35 \times 10^2$	0
	1200	$1,03 \times 10^3$	$7,90 \times 10^2$
	2400	$1,05 \times 10^3$	$8,15 \times 10^2$
2	0	$2,40 \times 10^2$	0
	1200	$1,49 \times 10^3$	$1,25 \times 10^3$
	2400	$1,54 \times 10^3$	$1,30 \times 10^3$
3	0	$2,47 \times 10^2$	0
	1200	$1,63 \times 10^3$	$1,38 \times 10^3$
	2400	$1,74 \times 10^3$	$1,49 \times 10^3$

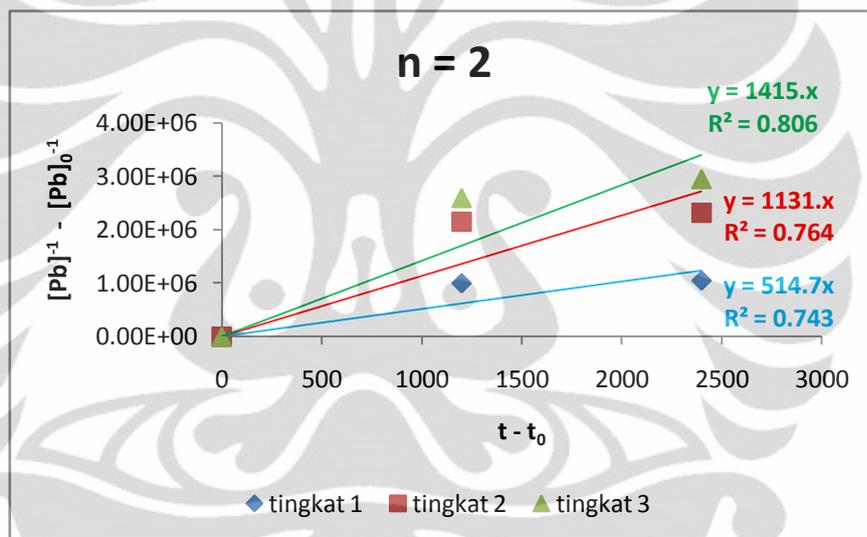


$k = 2 \times \text{slope}$

**LAMPIRAN 1. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TIMBAL (lanjutan)**

- **n = 2**

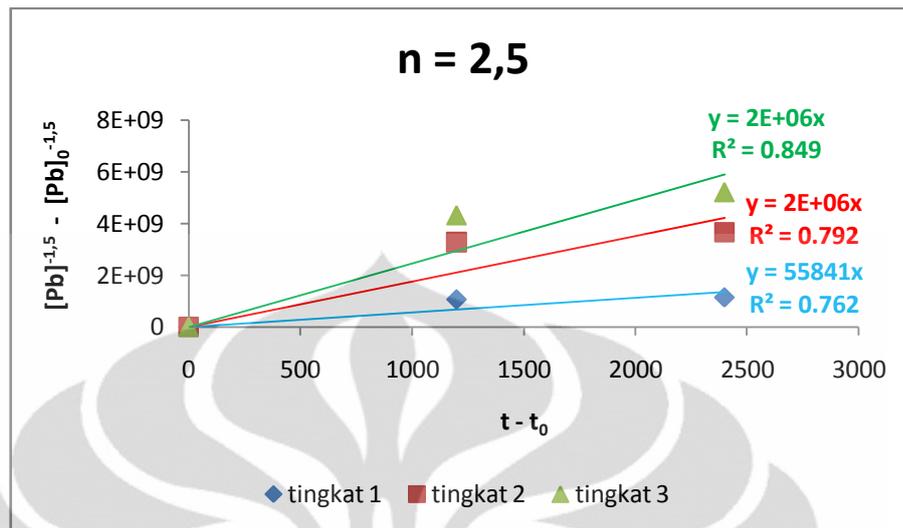
Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Pb]^{-1}$	$[Pb]^{-1} - [Pb]_0^{-1}$ (Y)
1	0	$5,51 \times 10^4$	0
	1200	$1,05 \times 10^6$	$9,96 \times 10^5$
	2400	$1,10 \times 10^6$	$1,05 \times 10^6$
2	0	$5,78 \times 10^4$	0
	1200	$2,21 \times 10^6$	$2,15 \times 10^6$
	2400	$2,38 \times 10^6$	$2,32 \times 10^6$
3	0	$6,10 \times 10^4$	0
	1200	$2,66 \times 10^6$	$2,60 \times 10^6$
	2400	$3,01 \times 10^6$	$2,95 \times 10^6$



- **n = 2,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Pb]^{-1,5}$	$[Pb]^{-1,5} - [Pb]_0^{-1,5}$ (Y)
1	0	$1,29 \times 10^7$	0
	1200	$1,08 \times 10^9$	$1,06 \times 10^9$
	2400	$1,16 \times 10^9$	$1,14 \times 10^9$
2	0	$1,39 \times 10^7$	0
	1200	$3,28 \times 10^9$	$3,27 \times 10^9$
	2400	$3,66 \times 10^9$	$3,65 \times 10^9$
3	0	$1,51 \times 10^7$	0
	1200	$4,33 \times 10^9$	$4,31 \times 10^9$
	2400	$5,22 \times 10^9$	$5,21 \times 10^9$

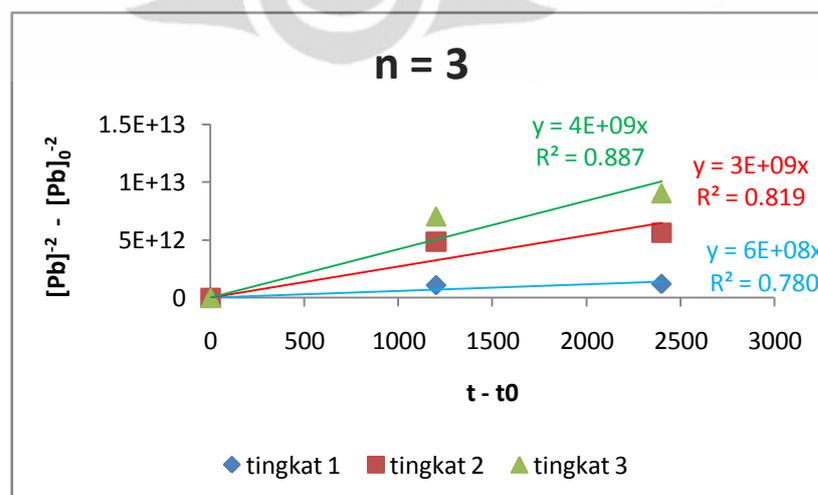
**LAMPIRAN 1. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TIMBAL (lanjutan)**



$$k = \text{slope}/1,5$$

• **n = 3**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Pb]^{-2}$	$[Pb]^{-2} - [Pb]_0^{-2}$ (Y)
1	0	$3,03 \times 10^9$	0
	1200	$1,10 \times 10^{12}$	$1,10 \times 10^{12}$
	2400	$1,21 \times 10^{12}$	$1,21 \times 10^{12}$
2	0	$3,34 \times 10^9$	0
	1200	$4,88 \times 10^{12}$	$4,88 \times 10^{12}$
	2400	$5,65 \times 10^{12}$	$5,64 \times 10^{12}$
3	0	$3,73 \times 10^9$	0
	1200	$7,06 \times 10^{12}$	$7,05 \times 10^{12}$
	2400	$9,06 \times 10^{12}$	$9,06 \times 10^{12}$



$$k = \frac{1}{2} \times \text{slope}$$

**LAMPIRAN 2. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TEMBAGA**

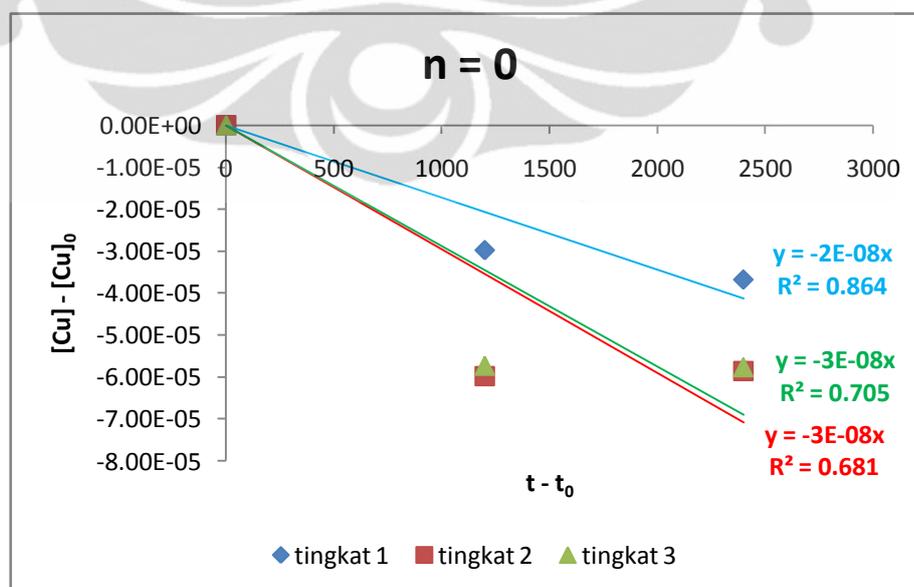
**Data Penyisihan Senyawa Tembaga (Data Kinetika)**

Tingkat	t (s)	Konsentrasi Cu (ppm)	Konsentrasi Cu (M)
1	0	6,0007	$9,45 \times 10^{-5}$
	1200	4,1112	$6,47 \times 10^{-5}$
	2400	3,6664	$5,77 \times 10^{-5}$
2	0	4,7993	$7,56 \times 10^{-5}$
	1200	1,0042	$1,58 \times 10^{-5}$
	2400	1,0811	$1,70 \times 10^{-5}$
3	0	4,0406	$6,36 \times 10^{-5}$
	1200	0,4035	$6,35 \times 10^{-6}$
	2400	0,3811	$6,00 \times 10^{-6}$

**Pengolahan Data Kinetika**

- $n = 0$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Cu] - [Cu]_0$ (Y)
1	0	0
	1200	$-2,98 \times 10^{-5}$
	2400	$-3,68 \times 10^{-5}$
2	0	0
	1200	$-5,98 \times 10^{-5}$
	2400	$-5,86 \times 10^{-5}$
3	0	0
	1200	$-5,73 \times 10^{-5}$
	2400	$-5,76 \times 10^{-5}$

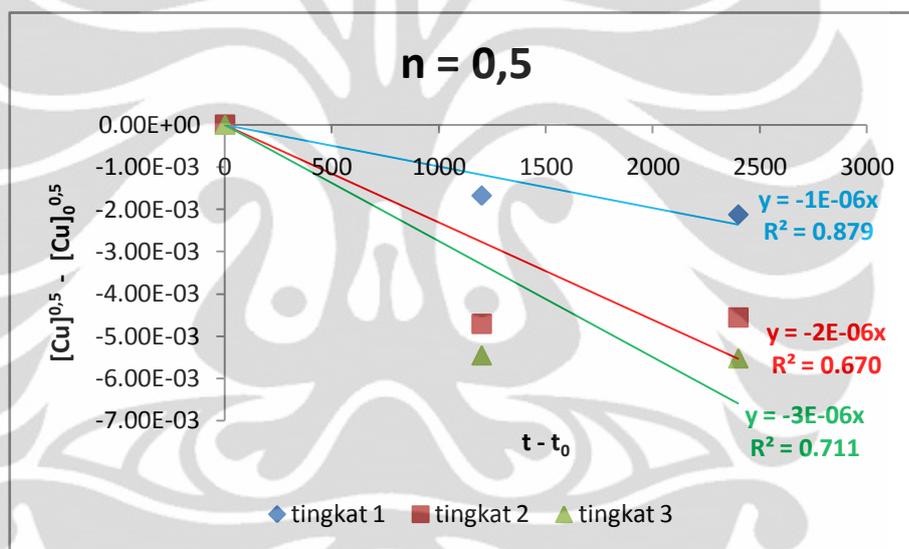


$k = -\text{slope}$

**LAMPIRAN 2. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TEMBAGA (lanjutan)**

- $n = 0,5$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Cu]^{0,5}$	$[Cu]^{0,5} - [Cu]_0^{0,5}$ (Y)
1	0	$9,72 \times 10^{-3}$	0
	1200	$8,05 \times 10^{-3}$	$-1,67 \times 10^{-3}$
	2400	$7,60 \times 10^{-3}$	$-2,12 \times 10^{-3}$
2	0	$8,69 \times 10^{-3}$	0
	1200	$3,98 \times 10^{-3}$	$-4,72 \times 10^{-3}$
	2400	$4,13 \times 10^{-3}$	$-4,57 \times 10^{-3}$
3	0	$7,98 \times 10^{-3}$	0
	1200	$2,52 \times 10^{-3}$	$-5,46 \times 10^{-3}$
	2400	$2,45 \times 10^{-3}$	$-5,53 \times 10^{-3}$

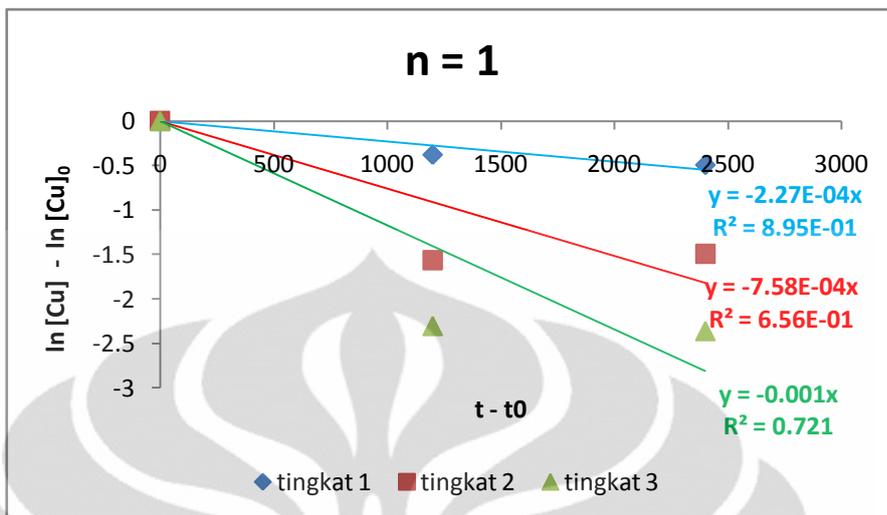


$$k = -2 \times \text{slope}$$

- $n = 1$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$\ln [Cu]$	$\ln [Cu] - \ln [Cu]_0$ (Y)
1	0	-9,2669	0
	1200	-9,6451	-0,3782
	2400	-9,7596	-0,4927
2	0	-9,4903	0
	1200	-11,0546	-1,5643
	2400	-10,9808	-1,4905
3	0	-9,6624	0
	1200	-11,9664	-2,3040
	2400	-12,0235	-2,3611

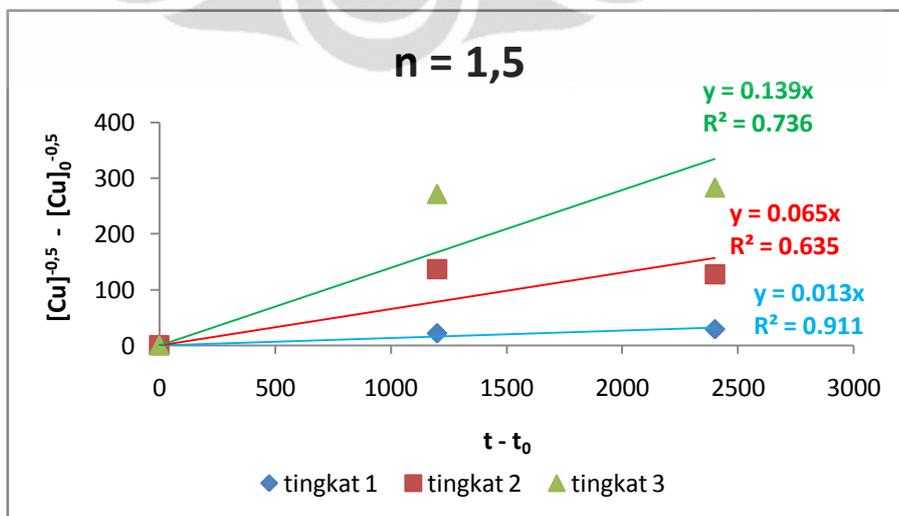
**LAMPIRAN 2. LAJU PENYISIHAN SENYAWA TEMBAGA (lanjutan)**



$k = -\text{slope}$

- **n = 1,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Cu]^{0,5}$	$[Cu]^{0,5} - [Cu]_0^{0,5}$ (Y)
1	0	102,8693	0
	1200	124,2804	21,4111
	2400	131,6033	28,7340
2	0	115,0265	0
	1200	251,4645	136,4380
	2400	242,3561	127,3296
3	0	125,3614	0
	1200	396,7026	271,3412
	2400	408,1947	282,8333

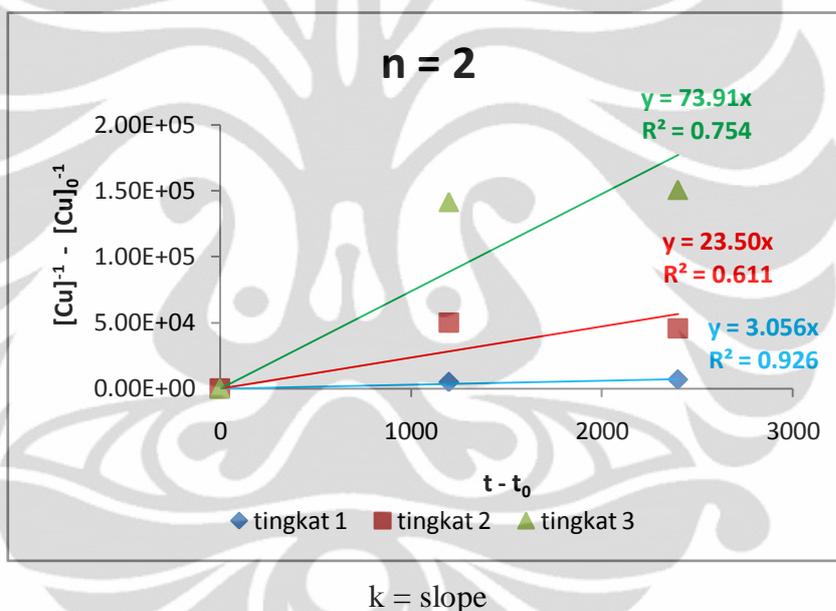


$k = 2 \times \text{slope}$

**LAMPIRAN 2. PENYISIHAN SENYAWA TEMBAGA (lanjutan)**

- $n = 2$

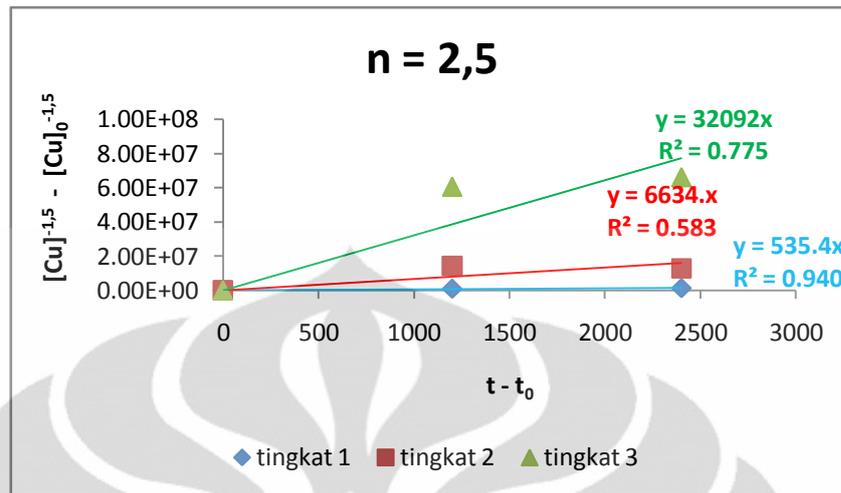
Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{Cu}]^{-1}$	$[\text{Cu}]^{-1} - [\text{Cu}]_0^{-1}$ (Y)
1	0	$1,06 \times 10^4$	0
	1200	$1,54 \times 10^4$	$4,86 \times 10^3$
	2400	$1,73 \times 10^4$	$6,74 \times 10^3$
2	0	$1,32 \times 10^4$	0
	1200	$6,32 \times 10^4$	$5,00 \times 10^4$
	2400	$5,87 \times 10^4$	$4,55 \times 10^4$
3	0	$1,57 \times 10^4$	0
	1200	$1,57 \times 10^5$	$1,42 \times 10^5$
	2400	$1,67 \times 10^5$	$1,51 \times 10^5$



- $n = 2,5$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{Cu}]^{-1,5}$	$[\text{Cu}]^{-1,5} - [\text{Cu}]_0^{-1,5}$ (Y)
1	0	$1,09 \times 10^6$	0
	1200	$1,92 \times 10^6$	$8,31 \times 10^5$
	2400	$2,28 \times 10^6$	$1,19\text{E} \times 10^6$
2	0	$1,52 \times 10^6$	0
	1200	$1,59 \times 10^7$	$1,44 \times 10^7$
	2400	$1,42 \times 10^7$	$1,27 \times 10^7$
3	0	$1,97 \times 10^6$	0
	1200	$6,24 \times 10^7$	$6,05 \times 10^7$
	2400	$6,80 \times 10^7$	$6,60 \times 10^7$

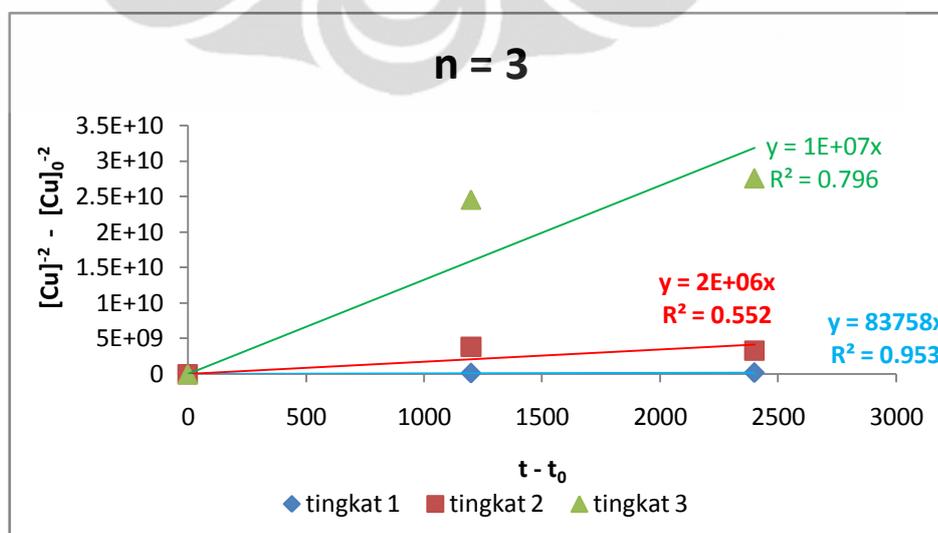
**LAMPIRAN 2. PENYISIHAN SENYAWA TEMBAGA (lanjutan)**



$$k = \text{slope}/1,5$$

• **n = 3**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[Cu]^{-2}$	$[Cu]^{-2} - [Cu]_0^{-2}$ (Y)
1	0	$1,12 \times 10^8$	0
	1200	$2,39 \times 10^8$	$1,27 \times 10^8$
	2400	$3,00 \times 10^8$	$1,88 \times 10^8$
2	0	$1,75 \times 10^8$	0
	1200	$4,00 \times 10^9$	$3,82 \times 10^9$
	2400	$3,45 \times 10^9$	$3,27 \times 10^9$
3	0	$2,47 \times 10^8$	0
	1200	$2,48 \times 10^{10}$	$2,45 \times 10^{10}$
	2400	$2,78 \times 10^{10}$	$2,75 \times 10^{10}$



$$k = \frac{1}{2} \times \text{slope}$$

**LAMPIRAN 3. LAJU PENYISIHAN SENYAWA AMONIA**

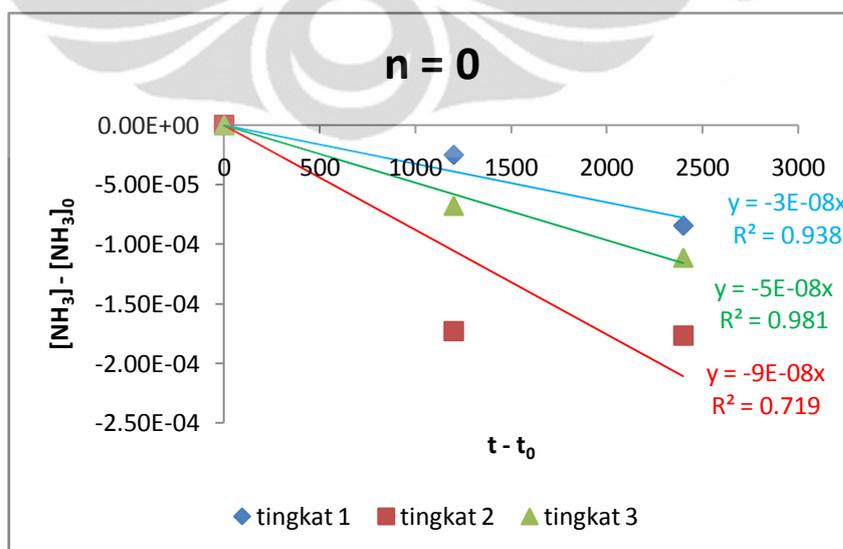
**Data Penyisihan Senyawa Amonia (Data Kinetika)**

Tingkat	Waktu (s)	konsentrasi NH <sub>3</sub> (ppm)	konsentrasi NH <sub>3</sub> (M)
1	0	51,567	$3,03 \times 10^{-3}$
	1200	51,139	$3,01 \times 10^{-3}$
	2400	50,130	$2,95 \times 10^{-3}$
2	0	51,363	$3,02 \times 10^{-3}$
	1200	48,419	$2,85 \times 10^{-3}$
	2400	48,355	$2,84 \times 10^{-3}$
3	0	44,654	$2,63 \times 10^{-3}$
	1200	43,502	$2,56 \times 10^{-3}$
	2400	42,763	$2,52 \times 10^{-3}$

**Pengolahan Data Kinetika**

- $n = 0$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{NH}_3] - [\text{NH}_3]_0$ (Y)
1	0	0
	1200	$-2,52 \times 10^{-5}$
	2400	$-8,45 \times 10^{-5}$
2	0	0
	1200	$-1,73 \times 10^{-4}$
	2400	$-1,77 \times 10^{-4}$
3	0	0
	1200	$-6,78 \times 10^{-5}$
	2400	$-1,11 \times 10^{-4}$

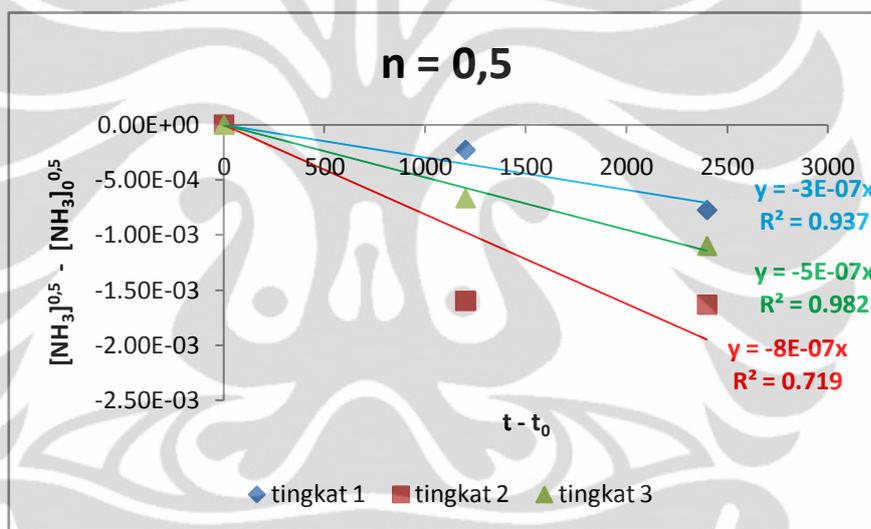


$k = -\text{slope}$

**LAMPIRAN 3. LAJU PENYISIHAN SENYAWA AMONIA (lanjutan)**

- **n = 0,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{NH}_3]^{0,5}$	$[\text{NH}_3]^{0,5} - [\text{NH}_3]_0^{0,5}$ (Y)
1	0	$5,51 \times 10^{-2}$	0
	1200	$5,48 \times 10^{-2}$	$-2,29 \times 10^{-4}$
	2400	$5,43 \times 10^{-2}$	$-7,73 \times 10^{-4}$
2	0	$5,50 \times 10^{-2}$	0
	1200	$5,34 \times 10^{-2}$	$-1,60 \times 10^{-3}$
	2400	$5,33 \times 10^{-2}$	$-1,63 \times 10^{-3}$
3	0	$5,13 \times 10^{-2}$	0
	1200	$5,06 \times 10^{-2}$	$-6,65 \times 10^{-4}$
	2400	$5,02 \times 10^{-2}$	$-1,10 \times 10^{-3}$

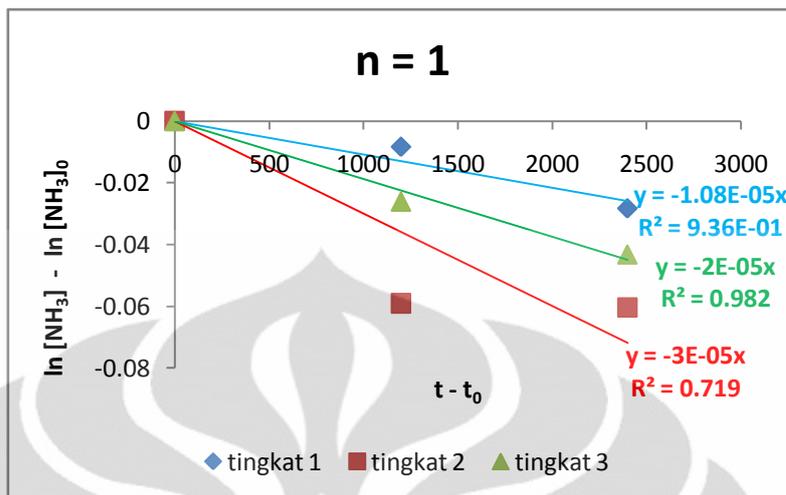


$$k = -2 \times \text{slope}$$

- **n = 1**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$\ln [\text{NH}_3]$	$\ln [\text{NH}_3] - \ln [\text{NH}_3]_0$ (Y)
1	0	-5,7981	0
	1200	-5,8064	$-8,33 \times 10^{-3}$
	2400	-5,8263	$-2,82 \times 10^{-2}$
2	0	-5,8021	0
	1200	-5,8611	$-5,90 \times 10^{-2}$
	2400	-5,8624	$-6,03 \times 10^{-2}$
3	0	-5,9420	0
	1200	-5,9682	$-2,62 \times 10^{-2}$
	2400	-5,9853	$-4,33 \times 10^{-2}$

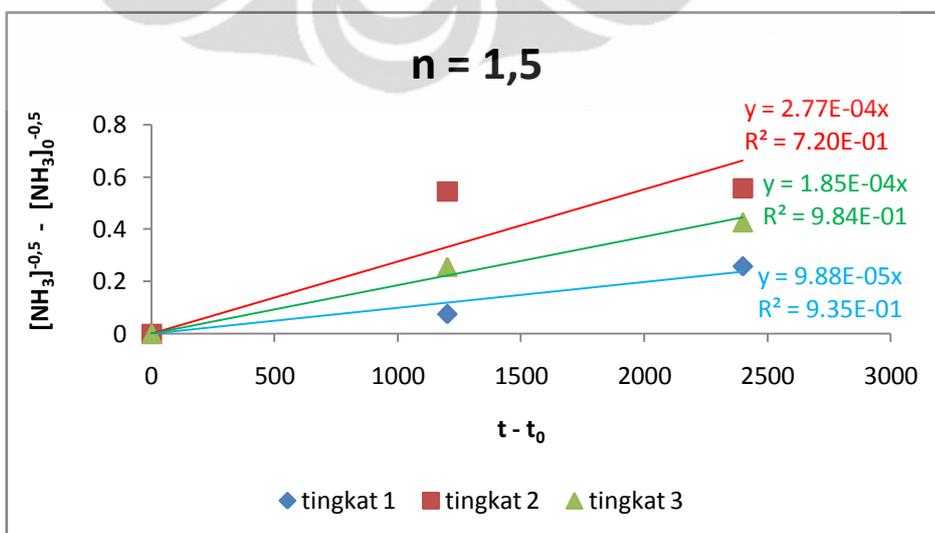
**LAMPIRAN 3. LAJU PENYISIHAN SENYAWA AMONIA (lanjutan)**



$k = -\text{slope}$

• **n = 1,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[NH_3]^{-0,5}$	$[NH_3]^{-0,5} - [NH_3]_0^{-0,5}$ (Y)
1	0	18,1568	0
	1200	18,2326	0,0758
	2400	18,4152	0,2584
2	0	18,1928	0
	1200	18,7377	0,5449
	2400	18,7501	0,5573
3	0	19,5117	0
	1200	19,7683	0,2566
	2400	19,9384	0,4267

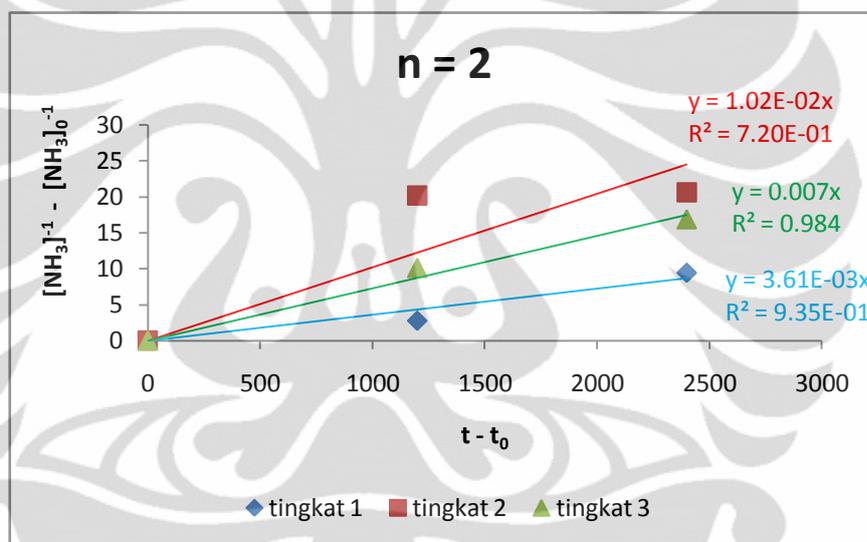


$k = 2 \times \text{slope}$

**LAMPIRAN 3. LAJU PENYISIHAN SENYAWA AMONIA (lanjutan)**

- $n = 2$

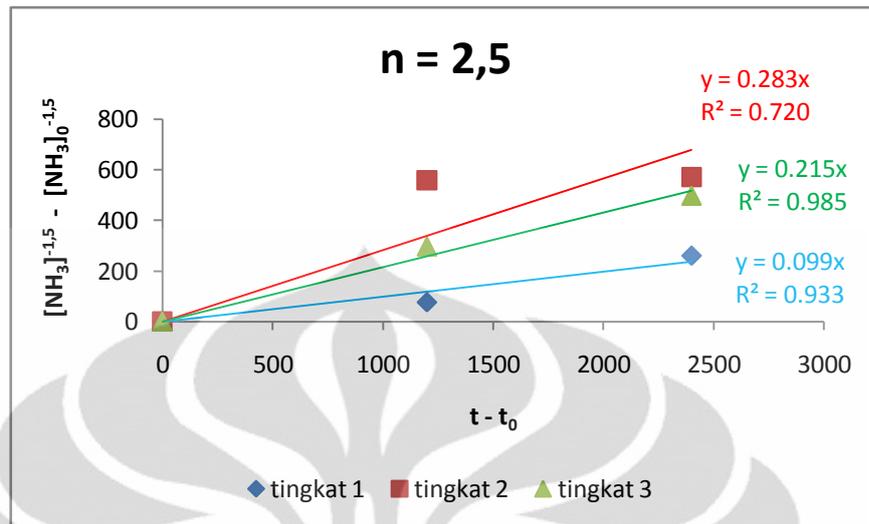
Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{NH}_3]^{-1}$	$[\text{NH}_3]^{-1} - [\text{NH}_3]_0^{-1}$ (Y)
1	0	329,6682	0
	1200	332,4273	2,7591
	2400	339,1183	9,4501
2	0	330,9776	0
	1200	351,1018	20,1242
	2400	351,5665	20,5889
3	0	380,7050	0
	1200	390,7866	10,0816
	2400	397,5399	16,8349



- $n = 2,5$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{NH}_3]^{-1,5}$	$[\text{NH}_3]^{-1,5} - [\text{NH}_3]_0^{-1,5}$ (Y)
1	0	$5,99 \times 10^3$	0
	1200	$6,06 \times 10^3$	75,3017
	2400	$6,24 \times 10^3$	259,2104
2	0	$6,02 \times 10^3$	0
	1200	$6,58 \times 10^3$	557,4405
	2400	$6,59 \times 10^3$	570,5059
3	0	$7,43 \times 10^3$	0
	1200	$7,73 \times 10^3$	297,0097
	2400	$7,93 \times 10^3$	498,1244

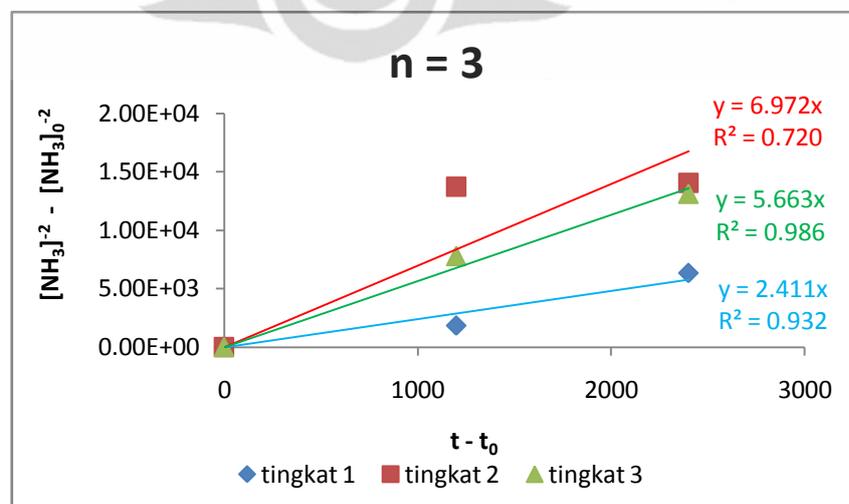
**LAMPIRAN 3. LAJU PENYISIHAN SENYAWA AMONIA (lanjutan)**



$$k = \text{slope}/1,5$$

• **n = 3**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{NH}_3]^{-2}$	$[\text{NH}_3]^{-2} - [\text{NH}_3]_0^{-2}$ (Y)
1	0	$1,09 \times 10^5$	0
	1200	$1,11 \times 10^5$	$1,83 \times 10^3$
	2400	$1,15 \times 10^5$	$6,32 \times 10^3$
2	0	$1,10 \times 10^5$	0
	1200	$1,23 \times 10^5$	$1,37 \times 10^4$
	2400	$1,24 \times 10^5$	$1,41 \times 10^4$
3	0	$1,45 \times 10^5$	0
	1200	$1,53 \times 10^5$	$7,78 \times 10^3$
	2400	$1,58 \times 10^5$	$1,31 \times 10^4$



$$k = \text{slope}/2$$

### LAMPIRAN 4. LAJU PENYISIHAN SENYAWA LAS

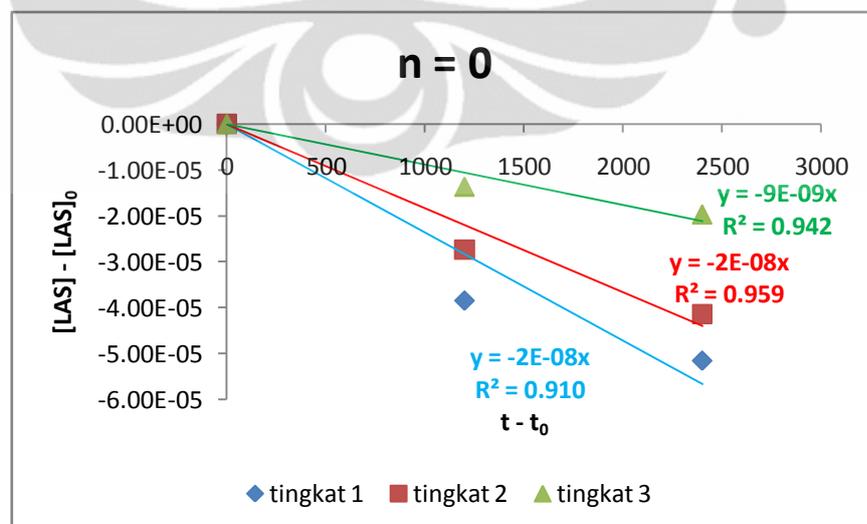
#### Data Penyisihan Senyawa Linear Alkil Benzen Sulfonat (Data Kinetika)

Tingkat	Waktu (s)	konsentrasi LAS (ppm)	konsentrasi LAS (M)
1	0	33,328	$9,73 \times 10^{-5}$
	1200	20,149	$5,88 \times 10^{-5}$
	2400	15,671	$4,59 \times 10^{-5}$
2	0	23,899	$6,98 \times 10^{-5}$
	1200	14,532	$4,24 \times 10^{-5}$
	2400	9,733	$2,84 \times 10^{-5}$
3	0	10,134	$2,96 \times 10^{-5}$
	1200	5,458	$1,59 \times 10^{-5}$
	2400	3,392	$9,91 \times 10^{-6}$

#### Pengolahan Data Kinetika

- $n = 0$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[LAS] - [LAS]_0$ (Y)
1	0	0
	1200	$-3,85 \times 10^{-5}$
	2400	$-5,16 \times 10^{-5}$
2	0	0
	1200	$-2,74 \times 10^{-5}$
	2400	$-4,14 \times 10^{-5}$
3	0	0
	1200	$-1,37 \times 10^{-5}$
	2400	$-1,97 \times 10^{-5}$

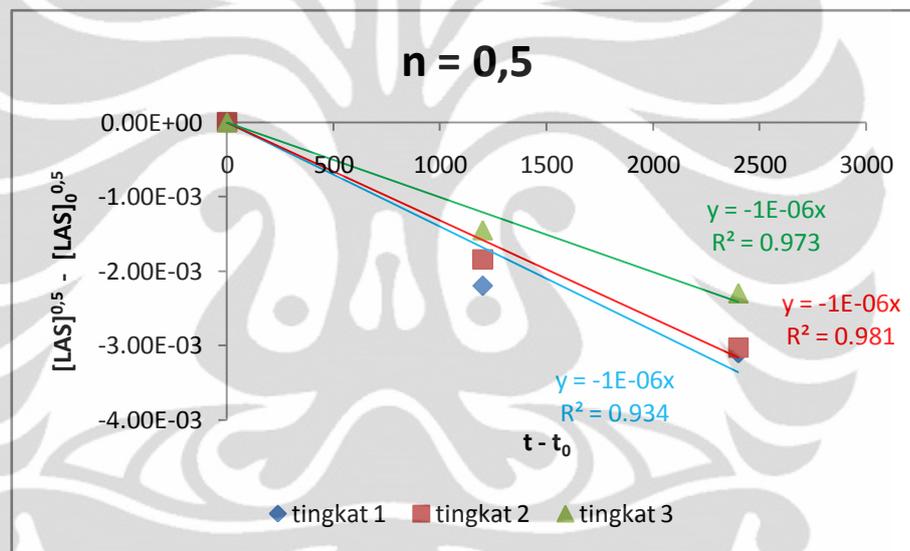


$k = -\text{slope}$

**LAMPIRAN 4. LAJU PENYISIHAN SENYAWA LAS (lanjutan)**

- **n = 0,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{LAS}]^{0,5}$	$[\text{LAS}]^{0,5} - [\text{LAS}]_0^{0,5}$ (Y)
1	0	$9,87 \times 10^{-3}$	0
	1200	$7,67 \times 10^{-3}$	$-2,19 \times 10^{-3}$
	2400	$6,77 \times 10^{-3}$	$-3,10 \times 10^{-3}$
2	0	$8,35 \times 10^{-3}$	0
	1200	$6,51 \times 10^{-3}$	$-1,84 \times 10^{-3}$
	2400	$5,33 \times 10^{-3}$	$-3,02 \times 10^{-3}$
3	0	$5,44 \times 10^{-3}$	0
	1200	$3,99 \times 10^{-3}$	$-1,45 \times 10^{-3}$
	2400	$3,15 \times 10^{-3}$	$-2,29 \times 10^{-3}$

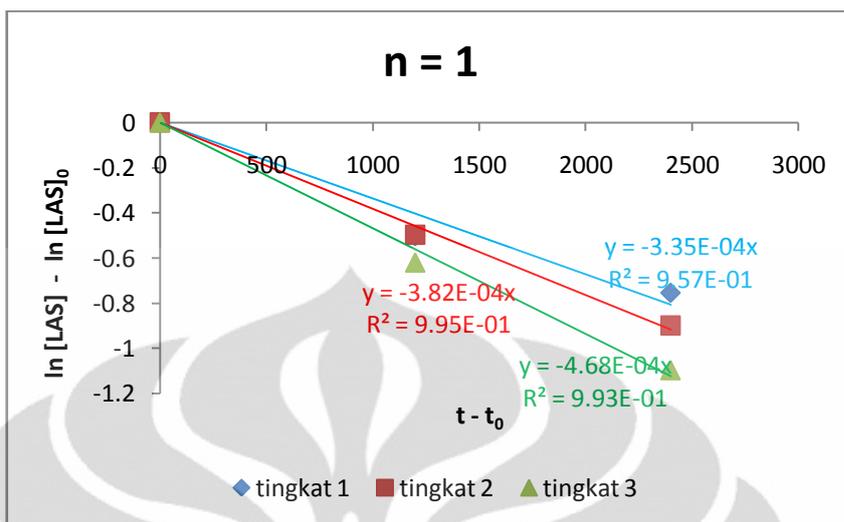


$k = -2 \times \text{slope}$

- **n = 1**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$\ln [\text{LAS}]$	$\ln [\text{LAS}] - \ln [\text{LAS}]_0$ (Y)
1	0	-9,2373	0
	1200	-9,7406	-0,5033
	2400	-9,9919	-0,7546
2	0	-9,5699	0
	1200	-10,0674	-0,4975
	2400	-10,4682	-0,8983
3	0	-10,4278	0
	1200	-11,0467	-0,6189
	2400	-11,5223	-1,0945

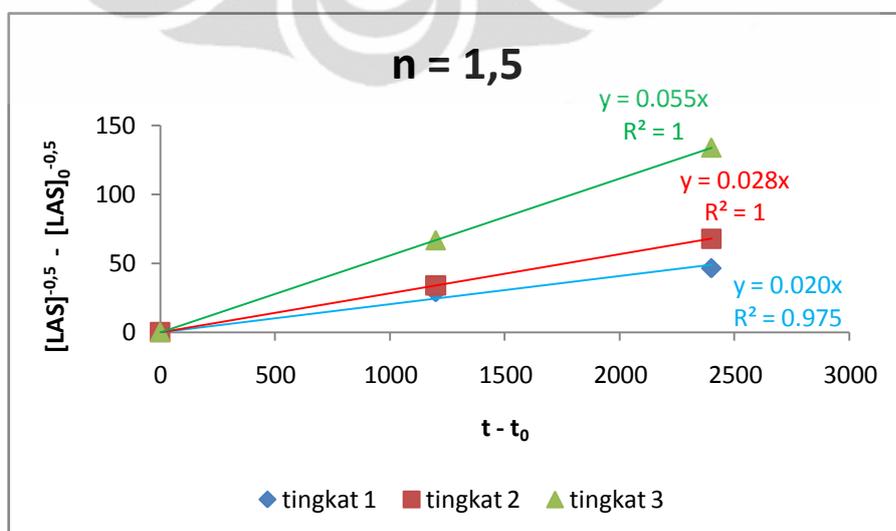
**LAMPIRAN 4. LAJU PENYISIHAN SENYAWA LAS (lanjutan)**



$k = -\text{slope}$

• **n = 1,5**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[LAS]^{-0,5}$	$[LAS]^{-0,5} - [LAS]_0^{-0,5}$ (Y)
1	0	101,3590	0
	1200	130,3587	28,9997
	2400	147,8150	46,4560
2	0	119,6953	0
	1200	153,4985	33,8032
	2400	187,5614	67,8661
3	0	183,8131	0
	1200	250,4668	66,6537
	2400	317,7159	133,9028

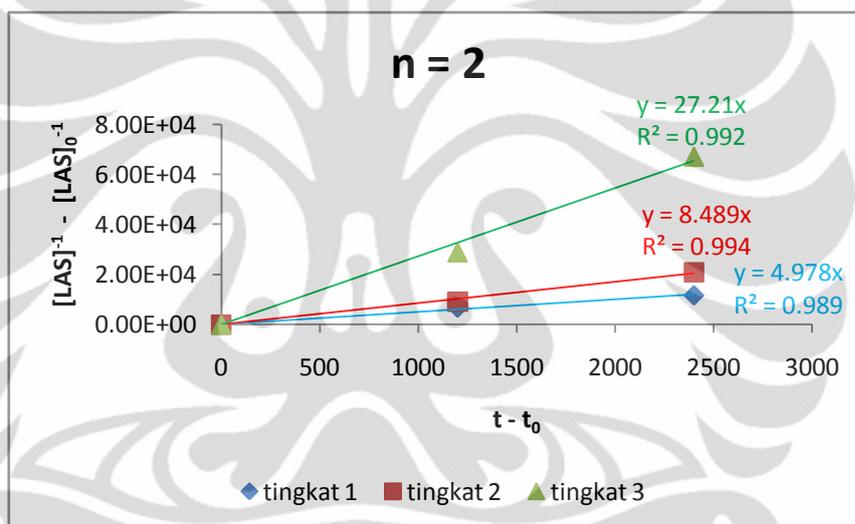


$k = 2 \times \text{slope}$

**LAMPIRAN 4. LAJU PENYISIHAN SENYAWA LAS (lanjutan)**

- $n = 2$

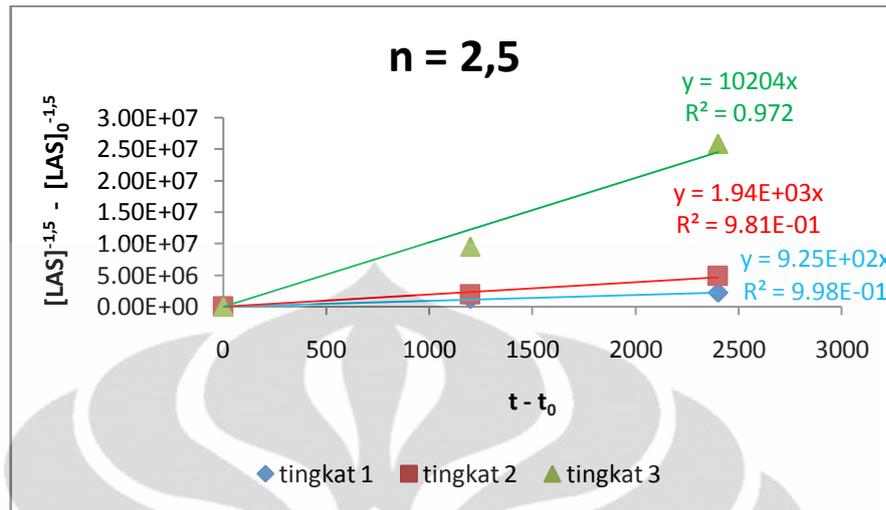
Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{LAS}]^{-1}$	$[\text{LAS}]^{-1} - [\text{LAS}]_0^{-1}$ (Y)
1	0	$1,03 \times 10^4$	0
	1200	$1,70 \times 10^4$	$6,72 \times 10^3$
	2400	$2,18 \times 10^4$	$1,16 \times 10^4$
2	0	$1,43 \times 10^4$	0
	1200	$2,36 \times 10^4$	$9,23 \times 10^3$
	2400	$3,52 \times 10^4$	$2,09 \times 10^4$
3	0	$3,38 \times 10^4$	0
	1200	$6,27 \times 10^4$	$2,89 \times 10^4$
	2400	$1,01 \times 10^5$	$6,72 \times 10^4$



- $n = 2,5$

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[\text{LAS}]^{-1,5}$	$[\text{LAS}]^{-1,5} - [\text{LAS}]_0^{-1,5}$ (Y)
1	0	$1,04 \times 10^6$	0
	1200	$2,22 \times 10^6$	$1,17 \times 10^6$
	2400	$3,23 \times 10^6$	$2,19 \times 10^6$
2	0	$1,71 \times 10^6$	0
	1200	$3,62 \times 10^6$	$1,90 \times 10^6$
	2400	$6,60 \times 10^6$	$4,88 \times 10^6$
3	0	$6,21 \times 10^6$	0
	1200	$1,57 \times 10^7$	$9,50 \times 10^6$
	2400	$3,21 \times 10^7$	$2,59 \times 10^7$

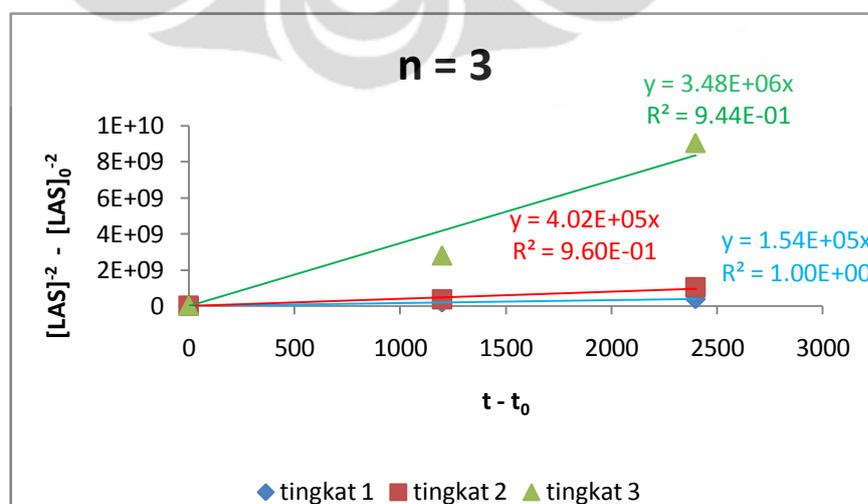
**LAMPIRAN 4. LAJU PENYISIHAN SENYAWA LAS (lanjutan)**



$$k = \text{slope}/1,5$$

• **n = 3**

Tingkat	$t - t_0$ (X)	$[LAS]^{-2}$	$[LAS]^{-2} - [LAS]_0^{-2}$ (Y)
1	0	$1,06 \times 10^8$	0
	1200	$2,89 \times 10^8$	$1,83 \times 10^8$
	2400	$4,77 \times 10^8$	$3,72 \times 10^8$
2	0	$2,05 \times 10^8$	0
	1200	$5,55 \times 10^8$	$3,50 \times 10^8$
	2400	$1,24 \times 10^9$	$1,03 \times 10^9$
3	0	$1,14 \times 10^9$	0
	1200	$3,94 \times 10^9$	$2,79 \times 10^9$
	2400	$1,02 \times 10^{10}$	$9,05 \times 10^9$



$$k = \frac{1}{2} \times \text{slope}$$