

**DISERTASI**

**OPTIMASI PROSES ELEKTROKOAGULASI PADA PENGOLAHAN AIR  
LIMBAH INDUSTRI FARMASI ARTIFISIAL (METFORMIN, ASPIRIN  
DAN PARACETAMOL) DENGAN VARIASI ANODA**



**Oleh:**

**SUHARTANA**

**NIM: 3000117510005**

**SEKOLAH PASCASARJANA  
PROGRAM DOKTOR ILMU LINGKUNGAN  
UNIVERSITAS DIPONEGORO  
SEMARANG**

**2022**

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PROSES ELEKTROKOAGULASI PADA PENGOLAHAN AIR  
LIMBAH INDUSTRI FARMASI ARTIFISIAL (METFORMIN, ASPIRIN DAN  
PARACETAMOL) DENGAN VARIASI ANODA

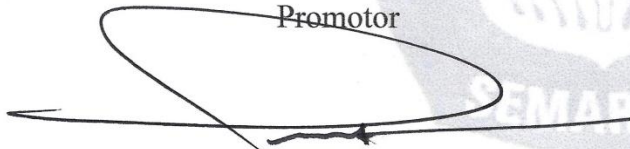
OLEH:

SUHARTANA

NIM: 3000117510005

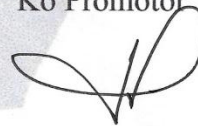
Telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 15 Agustus tahun 2022 oleh Tim  
Penguji Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan Sekolah PascaSarjana  
Universitas Diponegoro

Promotor



Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA  
NIP. 196112281986031004  
Tanggal

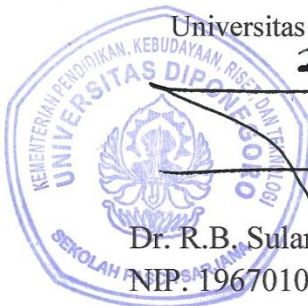
Ko Promotor



Adi Darmawan, S.Si. M.Si. Ph.D  
NIP.197311211997021001  
Tanggal

Dekan

Sekolah Pascasarjana  
Universitas Diponegoro



Dr. R.B. Sularto, SH. M.Hum  
NIP. 196701011991031005

Ketua Program Studi

Doktor Ilmu Lingkungan  
Sekolah Pascasarjana  
Universitas Diponegoro



Dr. Budi Warsito, M.Si  
NIP. 197508241999031003

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PROSES ELEKTROKOAGULASI PADA PENGOLAHAN AIR  
LIMBAH INDUSTRI FARMASI ARTIFISIAL (METFORMIN, ASPIRIN DAN  
PARACETAMOL) DENGAN VARIASI ANODA

OLEH:

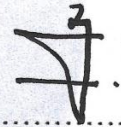
SUHARTANA

NIM: 3000117510005

Telah disetujui oleh:

Pimpinan Sidang

Dr. R.B. Sularto, SH. M.Hum



Sekretaris Sidang

Dr. Budi Warsito, M.Si



Anggota Tim Penguji

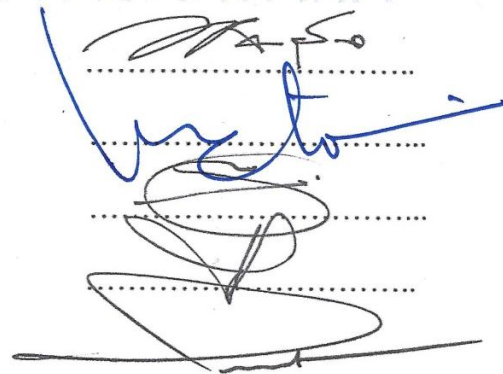
Dr. Aris Mukimin, M.Si

Prof. Dr. Hadiyanto, ST.MT

Dr. Ing. Sudarno, ST. MT

Adi Darmawan, S.Si M.Si PhD

Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA



## PERNYATAAN ORISINALITAS

Nama : Suhartana  
NIM : 3000117510005  
Mahasiswa : Program Sudi Doktor Ilmu Lingkungan  
Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Disertasi yang berjudul “ **Optimasi Proses Elektrokoagulasi Pada Pengolahan Air Limbah Industri Farmasi Artifisial (Metformin, Aspirin dan Paracetamol) Dengan Variasi Anoda**” adalah karya ilmiah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (doktor) di perguruan tinggi manapun.
2. Disertasi ini adalah murni ide, rumusan dan hasil penelitian saya, serta dilakukan tanpa bantuan orang lain, kecuali Tim Promotor dan Tim Penguji.
3. Disertasi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan judul aslinya serta dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah saya peroleh dan sanksi lain sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Diponegoro.

SEKOLAH PASCASARJANA

Semarang, Agustus 2022

Yang Membuat Pernyataan

  
Suhartana

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Disertasi dengan judul “Optimalisasi Proses Elektrokoagulasi Pada Pengolahan Air Limbah Industri Farmasi Artifisial (Paracetamol, Aspirin dan Metformin) Dengan Variasi Anoda dengan tujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Doktor.

Selama penulisan disertasi ini, penulis mengalami banyak kesulitan. Namun berkat bantuan, bimbingan, dan motivasi dari berbagai pihak maka skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Rektor Universitas Diponegoro yang berkenan memberikan Pembesasan Biaya Perkuliahan Studi Lanjut Izin Belajar Bagi Pegawai Pelajar Universitas Diponegoro
2. Dekan Fakultas Sains dan Matematika yang berkenan memberikan ijin untuk Studi Lanjut serta Izin Belajar Bagi Pegawai Pelajar Universitas Diponegoro
3. Bapak dan Ibu Dosen Doktor Ilmu Lingkungan di Sekolah Pasca Sarjana Universitas Diponegoro yang telah memberikan bekal ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA, selaku Promotor yang telah membimbing dan memberikan masukan dalam penelitian dan penulisan disertasi.

5. Bapak Adi Darmawan, M.Si. Ph.D selaku Copromotor yang telah membimbing dan memberikan masukan dalam penelitian dan penulisan disertasi.
6. Teman sejawat bapak dan ibu Dosen Departemen Kimia Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro yang telah memberikan sharing ilmu yang bermanfaat.
7. Keluarga saya, Dr. Niken Fatimah Nurhayati, M.Pd., anak- anakku: Ratih Estu Nugraheni, ST, Mufida Rahma Nuraini dan Nabila Rizqi Nurfauzia atas doa, motivasi, bantuan, dan pengertian yang telah diberikan.
8. Teman-teman DIL 11 dan teman-teman seperjuangan selama menempuh studi di DIL SPS UNDIP yang selalu menyemangati dan mendukung, serta
9. Semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan secara rinci satu- persatu yang telah banyak membantu.

Penulis menyadari atas segala keterbatasan pengetahuan dan kemampuan dalam penulisan disertasi ini. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya.

SEKOLAH PASCASARJANA  
Semarang, Agustus 2022

Penulis

## ABSTRAK

Seiring pertumbuhan penduduk, permasalahan pangan, sandang, tempat tinggal dan kesehatan terus berkembang, maka industri pertanian, sandang dan obat-obatan didirikan. Oleh karena itu, tidak dapat dipungkiri air limbah yang muncul dari industri pertanian, industri sandang dan obat-obatan juga bertambah. Pengolahan air limbah dari industri tekstil, farmasi dan atau dari industri pestisida serta limbah dari rumah sakit sudah dan sering dilakukan.

Limbah cair yang mengandung banyak senyawa organik berbahaya jika dibuang ke sungai sebelum diolah. Prediksi bahaya limbah cair yang banyak mengandung senyawa organik yang berasal dari pestisida dan metformin telah banyak dilaporkan. Hasil transformasi pestisida di perairan telah diselidiki dan dilaporkan mempengaruhi ekotoksikologi dan toksikologi lingkungan dan obat-obatan ditemukan di danau di atas konsentrasi yang diijinkan. Semakin banyak oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik. Semakin sedikit oksigen di badan air. Hal ini dapat menyebabkan hilangnya banyaknya oksigen perairan.

Beberapa metoda yang sudah dilakukan dalam mengolah air limbah di rumah sakit, air limbah industri pestisida dan air limbah pada industri farmasi antara lain, metoda fisika (interaksi fisik), kimia (pemakaian reagen kimia), mikrobiologi, bioremediasi, ozonisasi, adsorpsi dan elektrokimia. Proses elektrokimia dalam perkembangannya dapat dikelompokkan menjadi elektrokoagulasi, elektrodekomposisi, Elektro-fenton dan macam-macam Elektro-Fenton dan elektrokatalis.

Metode elektrokoagulasi telah banyak dilaporkan untuk mengolah lindi Tempat Pembuangan Akhir sampah/TPA, air yang mengandung pewarna kain, bahan organik alami, air limbah pabrik gula, pengolahan air dan pengolahan air limbah, obat-obatan hewan/antibiotik dan air limbah dari pabrik minyak zaitun.

Penelitian ini bertujuan untuk menyisahkan bahan farmasi yang larut dalam air (metformin, aspirin dan paracetamol). Elektroda yang digunakan adalah besi, aluminium dan seng (sebagai anoda) dan karbon (sebagai katoda). Penelitian juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh macam elektroda, jarak elektroda, rapat arus, pH, larutan garam elektrolit ( $\text{NaCl}$  dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), dan waktu elektrolisis.

Untuk mengetahui tingkat keberhasilan elektrokoagulasi dari proses pengolahan limbah tersebut, dilakukan pengukuran kualitas airnya secara analisis fisika maupun kimia, seperti pH, COD dan TSS dengan hasil FTIR dan UV-Visibel. Optimasi pada skala laboratorium diperoleh pada jarak elektroda 1cm, pH 10, rapat arus  $12,5 \text{ mA/cm}^2$  dan waktu elektrokoagulasi 60 menit. Penyisihan metformin, aspirin dan paracetamol mengikuti kinetika order 1. Hasil optimalisasi pada skala laboratorium diaplikasikan untuk skala yang lebih besar 60-75 Liter

## DAFTAR ISI

### DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	ii
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xxii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1    Latar Belakang .....	1
I.2    Perumusan Masalah.....	8
I.3    Orisinalitas.....	9
I.4    Tujuan Penelitian.....	17
I.4.1  Tujuan Umum .....	17
I.4.2  Tujuan Khusus .....	17
I.5    Manfaat Penelitian.....	18
I.5.1  Manfaat Bagi Lingkungan.....	18
I.5.2  Manfaat Bagi Ilmu dan Teknologi .....	19
I.5.3  Manfaat Bagi Industri .....	19
I.6    Keaslian Penelitian .....	19
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	21
II.1    Metoda Elektrolisis.....	21
II.2    Elektrokoagulasi .....	23
II.2.1  Peran Elektroda Dalam Elektrokoagulasi .....	27
II.2.2  Pemilihan Anoda dan Deret Volta .....	27
II.2.3  Deret Volta .....	28



II.2.4	Pemilihan Elektroda pada Elektrokoagulasi .....	29
II.2.5	Pemilihan Karbon/Grafit Sebagai Katoda.....	30
II.3	Elektrokoagulasi untuk Penyisihan Metformin, Aspirin dan Paracetamol .....	31
II.4	Diagram Pourbaix Anoda yang Dipergunakan.....	31
II.4.1	Diagram Pourbaix Besi .....	32
II.4.2	Diagram Pourbaix Aluminium.....	35
II.4.3	Diagram Pourbaix Seng .....	39
II.5	Diagram Latimer Anoda yang Dipergunakan .....	41
II.6	Diagram Frost Anoda yang dipergunakan.....	43
II.7	Mekanisme Proses Elektrokoagulasi.....	44
II.8	Tipe Pengendapan Proses Elektrokoagulasi.....	50
II.9	Energi Dalam Elektrolisis (tinjauan secara termodinamika).....	51
II.10	Potensial Reduksi dan Energi Gibbs .....	53
II.11	Elektrolisis dan Hukum Faraday .....	55
II.12	Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Proses Elektrolisis.....	56
II.13	Reaktor Elektrolisis .....	56
II.14	Perbandingan Pengaruh Garam Anorganik dan H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	57
II.15	Interaksi Molekul Organik Terlarut Dalam Proses Elektrokoagulasi ....	59
II.15.1	Analisis Gugus Kromofor dengan Spektroskopi UV- Visibel ....	59
II.15.2	Analisis Gugus Fungsi dengan Spektroskopi FTIR .....	62
II.16	Analisis Multivarian .....	63
II.17	Analisis Response Surface Methodology (RSM).....	64
II.17.1	Tahap Formulasi .....	64
II.17.2	Tahap Analisis Respon .....	65
II.17.3	Tahap Optimasi .....	65
II.18	Studi Kinetika Elektrokoagulasi.....	66

BAB III KERANGKA TEORITIS, KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESIS	68
III.1 Kerangka Teoritis .....	68
III.1.1 Elektrokoagulasi skala laboratorium (volume sampel 1-2 liter) .	68
III.1.2 Elektrokoagulasi scale up (volume sampel 75-100 liter) .....	68
III.2 Kerangka Konsep .....	69
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN .....	70
IV.1 Tempat Penelitian .....	70
IV.2 Waktu Penelitian .....	70
IV.3 Bahan Yang Dipergunakan.....	70
IV.4 Alat Yang Dipergunakan .....	70
IV.5 Variabel Terukur .....	71
IV.6 Tahapan Penelitian .....	71
IV.6.1 Elektrokoagulasi dengan Anoda Besi, Aluminium dan Seng Skala Laboratorium .....	71
IV.6.2 Aplikasi Elektrolisis dengan Anoda Besi, Aluminium dan Seng Skala Volume 75-100 Liter .....	71
IV.6.3 Menentukan Interaksi Molekuler pada Elektrokoagulasi.....	72
IV.6.4 Menentukan Kinetika Penyisihan Metformin, Aspirin dan Paracetamol.....	72
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	73
V.1 Optimalisasi Metode Elektrolisis Metformin dengan Logam Besi, Logam Aluminium dan Logam Seng sebagai Anoda (Skala Laboratorium)73	
V.1.1 Mencari Optimalisasi Jarak Elektroda.....	74
V.1.2 Mencari Optimasi Rapat Arus .....	76
V.1.3 Mencari Optimasi pH (Derajat Keasaman Larutan Sampel).....	83
V.1.4 Efek konsentrasi Polutan Organik Terlarut terhadap Prosentase Penyisihan.....	88

V.1.5	Efek Penambahan Larutan Elektrolit Terhadap Rendemen Elektrokoagulasi untuk Polutan Organik Dengan Konsentrasi Tinggi.....	92
V.1.6	Perbandingan Penambahan Pengaruh Garam Anorganik dan H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	95
V.1.7	Optimasi Waktu Elektrokoagulasi.....	99
V.2	Analisis gugus kromofor dengan Spektroskopi UV- Visibel.....	1044
V.2.1	Analisis Gugus Kromofor Aspirin dengan Spektroskopi UV-Visibel	104
V.2.2	Analisis Gugus Kromofor Metformin dengan Spektroskopi UV-Visibel	1066
V.2.3	Analisis Gugus Kromofor Paracetamol dengan Spektroskopi UV-Visibel	1088
V.3	Analisis Gugus Kromofor dan Gugus Fungsi. ....	11010
V.3.1	Analisis Gugus Fungsional Aspirin, Metformin dan Paracetamol Sebelum Elektrokoagulasi dengan Spektroskopi FTIR.....	1101
V.3.2	Analisis Gugus Fungsional Aspirin Setelah Elektrokoagulasi	11111
V.3.3	Analisis Gugus Fungsional Metformin Setelah Elektrokoagulasi	1133
V.3.4	Analisis Gugus Fungsional Paracetamol Setelah Elektrokoagulasi	116
V.4	Analisis Multivarian.....	118
V.5	Analisis Response Surface Methodology (RSM).....	12020
V.5.1	Analisis Response Surface Methodology (RSM) Polutan Metformin.....	1255
V.4.2	Analisis Response Surface Methodology (RSM) Polutan Aspirin	1299
V.4.3	Analisis Response Surface Methodology (RSM) Polutan Paracetamol.....	1333
V.6	Studi Kinetika Elektrokoagulasi (Skala Laboratorium) .....	1389
V.6.1	Studi Kinetika Elektrokoagulasi Metformin .....	1399

V.6.2	Studi Kinetika Elektrokoagulasi Aspirin.....	14242
V.6.3	Studi Kinetika Elektrokoagulasi Paracetamol.....	1455
V.7	Aplikasi Metode Elektrokoagulasi dengan logam besi, logam aluminium dan logam seng sebagai anoda serta karbon sebagai katoda pada penyisihan metformin, aspirin dan paracetamol (scale up kapasitas 75-100 liter) .....	1488
V.7.1	Efek Scale up Kapasitas 75-100 liter Terhadap Rendemen Elektrokoagulasi Metformin.....	1488
V.7.2	Efek Scale up Kapasitas 75-100 liter Terhadap Rendemen Elektrokoagulasi Aspirin .....	15252
V.7.3	Efek Scale up Kapasitas 75-100 liter Terhadap Rendemen Elektrokoagulasi Paracetamol .....	1555
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....		1599
VI.1	Kesimpulan.....	1599
VI.2	Saran.....	1600
DAFTAR PUSTAKA .....		1611
LAMPIRAN .....		1711

SEKOLAH PASCASARJANA

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Klasifikasi umum metode elektrokimia (Ganzenko dkk., 2014)	23
<b>Gambar 2.2.</b> Alat Elektrokoagulasi (Moussa dkk., 2017)	24
<b>Gambar 2.3.</b> Diagram Pourbaix untuk Fe	32
<b>Gambar 2.4.</b> Garis-garis dalam diagram E-pH (Kobylin dkk., 2014)	37
<b>Gambar 2.5.</b> Diagram E-pH Aluminium pada suhu 25°C (Moussa dkk., 2017)	39
<b>Gambar 2.6.</b> Diagram E-pH Seng pada suhu 25°C (Moussa dkk., 2017)	40
<b>Gambar 2.7.</b> Diagram Latimer besi dalam larutan asam	42
<b>Gambar 2.8.</b> Diagram Latimer besi dalam larutan basa	42
<b>Gambar 2.9.</b> Diagram Frost-Ebsworth besi	44
<b>Gambar 2.10.</b> Reaktor Reaksi Elektrokoagulasi (Moussa dkk., 2017)	45
<b>Gambar 2.11.</b> Mekanisme Proses Reaksi Elektrokoagulasi (Moussa dkk., 2017)	48
<b>Gambar 2.12.</b> Mekanisme Proses Reaksi Elektrokoagulasi (Naje dkk., 2017)	48
<b>Gambar 2.13.</b> Pengaruh pH pada proses elektrokoagulasi Vepsäläinen (2012).	49
<b>Gambar 2.14.</b> Tipe Pengendapan Proses Elektrokoagulasi (Naje dkk., 2017)	51
<b>Gambar 2.15.</b> Mekanisme degradasi metformin dengan radikal hidroksil	58

<b>Gambar 2.16.</b> Mekanisme degradasi aspirin dengan radikal hidroksil .....	58
<b>Gambar 2.17.</b> Mekanisme degradasi parasetamol dengan radikal hidroksil .....	59
<b>Gambar 5.1.</b> Grafik hubungan variasi elektroda, jarak elektroda dan randemen elektrokoagulasi dengan rapat arus $7,5 \text{ mA cm}^{-2}$ terhadap penyisihan polutan organik (metformin, aspirin dan paracetamol).....	75
<b>Gambar 5.2.</b> Grafik hubungan jarak elektroda 1 cm dan variasi rapat arus terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan karbon sebagai anoda pada penyisihan aspirin .....	77
<b>Gambar 5.3.</b> Grafik hubungan jarak elektroda 1 cm dan variasi rapat arus terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan karbon sebagai anoda pada penyisihan metformin.....	78
<b>Gambar 5.4.</b> Grafik hubungan jarak elektroda 1 cm dan variasi rapat arus terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan karbon sebagai anoda pada penyisihan paracetamol .....	78
<b>Gambar 5.5.</b> Grafik hubungan penyisihan aspirin pada jarak elektroda 1 cm dan variasi rapat arus terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda.....	79
<b>Gambar 5.6.</b> Grafik hubungan penyisihan metformin pada jarak elektroda 1 cm dan variasi rapat arus terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda.....	80
<b>Gambar 5.7.</b> Grafik hubungan penyisihan paracetamol pada jarak elektroda 1 cm dan variasi rapat arus terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda.....	81
<b>Gambar 5.8.</b> Grafik hubungan penyisihan aspirin pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ dan variasi pH terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda.....	83
<b>Gambar 5.9.</b> Grafik hubungan penyisihan metformin pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ dan variasi pH terhadap randemen	

elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 84

**Gambar 5.10.** Grafik hubungan penyisihan paracetamol pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$  dan variasi pH terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 84

**Gambar 5.11.** Grafik hubungan penyisihan aspirin 100; 200; 300; 400 dan 500 ppm pada jarak elektroda 1 cm dan rapat arus  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 9 terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 89

**Gambar 5.12.** Grafik hubungan penyisihan metformin 100; 200; 300; 400 dan 500 ppm pada jarak elektroda 1 cm dan rapat arus  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 9 terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 90

**Gambar 5.13.** Grafik hubungan penyisihan paracetamol 100; 200; 300; 400 dan 500 ppm pada jarak elektroda 1 cm dan rapat arus  $10 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 9 terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 90

**Gambar 5.14.** Grafik hubungan penyisihan aspirin 1500 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 10 dan variasi penambahan garam NaCl 20 ppm dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  20 ppm terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda..... 93

**Gambar 5.15.** Grafik hubungan penyisihan metformin 1500 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 10 dan variasi penambahan garam NaCl 20 ppm dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  20 ppm terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda ..... 93

**Gambar 5.16.** Grafik hubungan penyisihan paracetamol 1500 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 10 dan variasi penambahan garam NaCl 20 ppm dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  20 ppm terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda ..... 94

**Gambar 5.17.** Grafik hubungan penyisihan metformin 500 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7, Logam Fe sebagai anoda dan karbon sebagai katoda dengan variasi penambahan garam NaCl 20 ppm,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  20 ppm dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  20 ppm terhadap randemen

elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda..... 96

**Gambar 5.18.** Grafik hubungan penyisihan aspirin 500 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7, Logam Fe sebagai anoda dan karbon sebagai katoda dengan variasi penambahan garam NaCl 20 ppm,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  20 ppm dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  20 ppm terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda..... 97

**Gambar 5.19.** Grafik hubungan penyisihan paracetamol 500 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7, Logam Fe sebagai anoda dan karbon sebagai katoda dengan variasi penambahan garam NaCl 20 ppm,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  20 ppm dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  20 ppm terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai anoda..... 98

**Gambar 5.20.** Grafik hubungan penyisihan aspirin 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 100

**Gambar 5.21.** Grafik hubungan penyisihan metformin 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 100

**Gambar 5.22.** Grafik hubungan penyisihan paracetamol 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 101

**Gambar 5.23.** Struktur Molekul Aspirin (Katzung, 2017) ..... 102

**Gambar 5.24.** Struktur Molekul Metformin Hidroklorida (Katzung, 2017) ..... 103

**Gambar 5.25.** Struktur Molekul paracetamol (Katzung, 2017) ..... 1033

**Gambar 5.26.** Spektra UV-Visibel dari Aspirin sebelum elektrolisis (tablet Metformin), setelah elektrolisis dengan anoda Besi, setelah elektrolisis



dengan anoda Aluminium dan setelah elektrolisis dengan anoda Zink.  
Elektrolisis tanpa larutan elektrolit ..... 105

**Gambar 5.27.**Spektra UV-Visibel dari Metformin sebelum elektrolisis (tablet Metformin), setelah elektrolisis dengan anoda Besi, setelah elektrolisis dengan anoda Aluminium dan setelah elektrolisis dengan anoda Zink.  
Elektrolisis tanpa larutan elektrolit ..... 1077

**Gambar 5.28.**Spektra UV-Visibel dari Paracetamol sebelum elektrolisis (tablet paracetamol), setelah elektrolisis dengan anoda Besi, setelah elektrolisis dengan anoda Aluminium dan setelah elektrolisis dengan anoda Zink. Elektrolisis tanpa larutan elektrolit ..... 1099

**Gambar 5.29.**Spektra FTIR dari aspirin (merah), paracetamol (biru) dan metformin (hitam) sebelum proses penyisihan dengan metoda elektrokoagulasi ..... 11010

**Gambar 5.30.**Spektra FTIR dari aspirin sebelum elektrolisis (tablet aspirin), setelah elektrolisis dengan anoda besi (coklat), setelah elektrolisis dengan anoda aluminium (hijau) dan setelah elektrolisis dengan anoda seng (biru). ..... 11212

**Gambar 5.31.**Spektra FTIR dari Metformin sebelum elektrolisis (tablet Metformin) (hijau), setelah elektrolisis dengan anoda seng (pink), setelah elektrolisis dengan anoda aluminium (biru) dan setelah elektrolisis dengan anoda besi (coklat) ..... 1144

**Gambar 5.32.**Spektra FTIR dari Paracetamol sebelum elektrolisis (tablet paracetamol), setelah elektrolisis dengan anoda besi (merah), dengan anoda aluminium (biru) dan dengan anoda seng (coklat) ..... 1166

**Gambar 5.33.**Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elketrokoagulasi metformin dengan aluminium sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 1266

**Gambar 5.34.**Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elketrokoagulasi metformin dengan besi sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 1277

**Gambar 5.35.**Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elketrokoagulasi metformin dengan seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 1277

**Gambar 5.36.**Hubungan antara efisiensi penyisihan COD metformin pada anoda aluminium dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan

jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC)..... 1288

**Gambar 5.37.** Hubungan antara efisiensi penyisihan COD metformin pada anoda besi dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC) ..... 1288

**Gambar 5.38.** Hubungan antara efisiensi penyisihan COD metformin pada anoda seng dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC) ..... 1299

**Gambar 5.39** Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elktetrokoagulasi aspirin dengan aluminium sebagai anoda dan karbon sebagai katoda.....130

**Gambar 5.40.** Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elktetrokoagulasi aspirin dengan besi sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 13131

**Gambar 5.41.** Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elktetrokoagulasi aspirin dengan seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda ..... 13131

**Gambar 5.42.** Hubungan antara efisiensi penyisihan COD aspirin pada anoda aluminium dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC)..... 13232

**Gambar 5.43.** Hubungan antara efisiensi penyisihan COD aspirin pada anoda besi dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC) ..... 13232

**Gambar 5.44.** Hubungan antara efisiensi penyisihan COD aspirin pada anoda seng dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak

elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC)  
..... 13333

**Gambar 5.45.**Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elktrokoagulasi paracetamol dengan aluminium sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 1344

**Gambar 5.46.**Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elktrokoagulasi paracetamol dengan besi sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 1355

**Gambar 5.47.**Gambar Contour antara pengaruh pH; Waktu; Jarak Elektroda dan Rapat Arus pada elktrokoagulasi paracetamol dengan seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda..... 1355

**Gambar 5.48.**Hubungan antara efisiensi penyisihan COD paracetamol pada anoda aluminium dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC) ..... 1366

**Gambar 5.49.**Hubungan antara efisiensi penyisihan COD paracetamol pada anoda besi dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC)..... 1366

**Gambar 5.50.**Hubungan antara efisiensi penyisihan COD paracetamol pada anoda seng dengan gambar interaksi plot 3D: interaksi waktu dan pH (DA), interaksi waktu dan jarak elektroda (DB), interaksi waktu dan rapat arus (DC), interaksi pH dan rapat arus (AC), interaksi pH dan jarak elektroda (AB), serta interaksi jarak elektroda dan rapat arus (BC)..... 1377

**Gambar 5.51.**Grafik hubungan konsentrasi metformin100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda (diasumsikan order 1)..... 1399

**Gambar 5.52.**Grafik hubungan konsentrasi metformin100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda (diasumsikan order 2)..... 14040

- Gambar 5.53.** Grafik hubungan konsentrasi aspirin 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda (order 1) ..... 1422
- Gambar 5.54.** Grafik hubungan konsentrasi aspirin 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda (order 2) ..... 1433
- Gambar 5.55.** Grafik hubungan konsentrasi paracetamol 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda (order 1) ..... 1455
- Gambar 5.56.** Grafik hubungan konsentrasi paracetamol 100 ppm pada jarak elektroda 1 cm, rapat arus  $12.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium, logam besi dan logam seng sebagai anoda dan karbon sebagai katoda (order 2) ..... 1466
- Gambar 5.57.** Grafik hubungan penyisihan 70-75 liter metformin 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus  $11 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda (order 1) ..... 1499
- Gambar 5.58.** Grafik hubungan penyisihan 70-75 liter metformin 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus  $11 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda (order 2) ..... 15050
- Gambar 5.59.** Grafik hubungan penyisihan 70-75 liter aspirin 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus  $11 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda (order 1) ... 15252
- Gambar 5.60.** Grafik hubungan penyisihan 70-75 liter aspirin 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus  $11 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda (order 2) ..... 1533

**Gambar 5.61.** Grafik hubungan penyisihan 70-75 liter paracetamol 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus  $11 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda (order 1) ..... 1556

**Gambar 5.62.** Grafik hubungan penyisihan 70-75 liter paracetamol 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus  $11 \text{ mA cm}^{-2}$ , pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda (order 2) ..... 1567

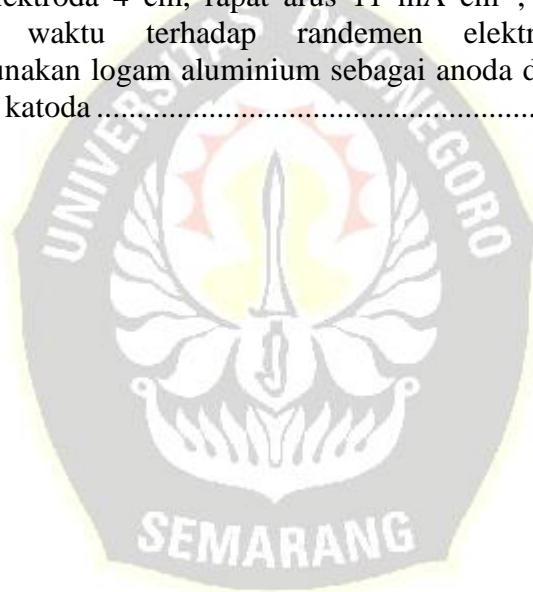


SEKOLAH PASCASARJANA

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.1.</b> Matrik Orisinalitas.....	11
<b>Tabel 2.1.</b> Ketahanan kimia Grafit (Castañeda dkk., 2017).....	30
<b>Tabel 2.2.</b> Hubungan Antara Warna Dan Panjang Gelombang (Bigio dan Mourant, 1997).....	60
<b>Tabel 5.1.</b> Analisis spektra FTIR dari aspirin sebelum elektrolisis (tablet aspirin), setelah elektrolisis dengan anoda besi, setelah elektrolisis dengan anoda aluminium dan setelah elektrolisis dengan anoda seng .....	1133
<b>Tabel 5.2.</b> Analisis spektra FTIR dari Metformin sebelum elektrolisis (tablet Metformin), setelah elektrolisis dengan anoda besi, setelah elektrolisis dengan anoda aluminium dan setelah elektrolisis dengan anoda seng .....	1155
<b>Tabel 5.3.</b> Analisis spektra FTIR dari aspirin sebelum elektrolisis (tablet paracetamol), setelah elektrolisis dengan anoda besi, anoda aluminium dan anoda seng .....	1177
<b>Tabel 5.4.</b> Rancangan Percobaan Central-Composite Design (Face Centered) Terhadap Polutan Metformin terhadap Waktu, pH, Rapat Arus dan Jarak Elektroda Waktu .....	12121
<b>Tabel 5.5.</b> Rancangan Percobaan Central- Composite Design (Face Centered) Terhadap Polutan Aspirin terhadap Waktu, pH, Rapat Arus dan Jarak Elektroda .....	12222
<b>Tabel 5.6.</b> Rancangan Percobaan Central-Composite Design (Face Centered) Terhadap Polutan Paracetamol terhadap Waktu, pH, Rapat Arus dan Jarak Elektroda.....	12323
<b>Tabel 5.7.</b> Perbandingan antara randemen prediksi dan randemen hasil penelitian skala laboratorium .....	1388
<b>Tabel 5.8.</b> Hasil pelacakan kinetika order reaksi terhadap order 2 dan order 1 pada pada penyisihan metformin.....	14141
<b>Tabel 5.9.</b> Hasil pelacakan kinetika order reaksi terhadap order 2 dan order 1 pada pada penyisihan aspirin.....	1444
<b>Tabel 5.10.</b> Hasil pelacakan kinetika order reaksi terhadap order 2 dan order 1 pada pada penyisihan paracetamol.....	1477

- Tabel 5.11.**Tabel hubungan penyisihan 70-75 liter metformin 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus 11 mA cm<sup>-2</sup>, pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda ..... 15151
- Tabel 5.12.**Tabel hubungan penyisihan 70-75 liter aspirin 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus 11 mA cm<sup>-2</sup>, pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda ..... 1544
- Tabel 5.13.**Tabel hubungan penyisihan 70-75 liter paracetamol 100 ppm pada jarak elektroda 4 cm, rapat arus 11 mA cm<sup>-2</sup>, pH 7; 8 dan 9, dan variasi waktu terhadap randemen elektrokoagulasi dengan menggunakan logam aluminium sebagai anoda dan logam aluminium sebagai katoda ..... 1578



SEKOLAH PASCASARJANA

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Diagram Pelaksanaan Penelitian .....	1712
LAMPIRAN 2 Cara Pengujian COD Reflux .....	17273
LAMPIRAN 3 Spektra FTIR Aspirin .....	17374
LAMPIRAN 4 Spektra FTIR Metformin.....	1745
LAMPIRAN 5 Spektra FTIR Paracetamol .....	1756
LAMPIRAN 6 Spektra UV – Visibel Aspirin .....	1767
LAMPIRAN 7 Spektra UV – Visibel Metformin.....	1778
LAMPIRAN 8 Spektra UV – Visibel Paracetamol .....	1778
LAMPIRAN 9.....	1789
Karakter Aspirin (180.16) dalam Air .....	17879
Karakter Metformin dalam Air (Mr 129.16) pKa =3.1 dan 10.8 .....	17980
Karakter Paracetamol dalam Air (151. 16) p Ka = 9,5.....	17981
LAMPIRAN 10 Analisis Multivarian Aspirin.....	1812
LAMPIRAN 11 Analisis Multivarian Metformin.....	18191
LAMPIRAN 12 Analisis Multivarian Paracetamol .....	199
LAMPIRAN 13 Analisis RSM Aspirin .....	202
LAMPIRAN 14 Analisis RSM Metformin .....	212
LAMPIRAN 15 Analisis RSM Paracetamol.....	20816
LAMPIRAN 16 Rangkuman Hasil Optomasi Analisis RSM Terhadap Aspirin, Metformin dan Paracetamol.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>