

TESIS
PENURUNAN TDS, COD dan MINYAK & LEMAK
AIR TERPRODUKSI (*PRODUCED WATER*) PADA
PROSES *PRE-TREATMENT* MENGGUNAKAN
***ELECTROCOAGULAN* di INDUSTRI MIGAS**
SUMATERA SELATAN



SURAHMAN
03012681822014

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
TAHUN 2020

TESIS
PENURUNAN TDS, COD dan MINYAK & LEMAK
AIR TERPRODUKSI (*PRODUCED WATER*) PADA
PROSES *PRE-TREATMENT* MENGGUNAKAN
***ELECTROCOAGULAN* di INDUSTRI MIGAS**
SUMATERA SELATAN

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar
Magister Teknik (M.T.) Pada Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



SURAHMAN
03012681822014

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
TAHUN 2020

HALAMAN PENGESAHAN

**PENURUNAN TDS, COD dan MINYAK & LEMAK
AIR TERPRODUKSI (*PRODUCED WATER*) PADA
PROSES *PRE-TREATMENT* MENGGUNAKAN
ELECTROCOAGULAN di INDUSTRI MIGAS
SUMATERA SELATAN**

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Magister
Teknik (M.T.) Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Palembang, Agustus 2020
Menyetujui,
Pembimbing I



Prof. Ir. Muhammad Said, M.Sc, PhD
NIP.196108121987031003

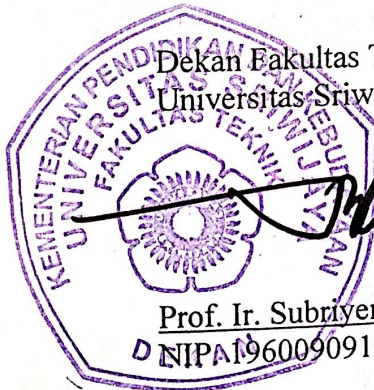
Pembimbing II



Dr. David Bahrin ST., MT
NIP.198010312005011003

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D
NIP.196009091987031004

Koordinator Program Studi
Magister Teknik Kimia,



Dr. David Bahrin ST., MT
NIP.198010312005011003

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Laporan Tesis ini dengan judul "Penurunan TDS, COD dan Minyak & Lemak Air Terproduksi (*Produced Water*) Pada Proses *Pre-Treatment* Menggunakan *Electrocoagulan* di Industri Migas Sumatera Selatan" telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Studi Magister Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 18 Agustus 2020.

Palembang, Agustus 2020

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Laporan Tesis

Ketua:

1. Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S, Ph. D
NIP. 19600909 198703 1 004

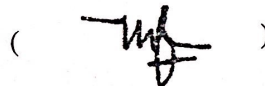


Anggota:

1. Dr.Ir. H. M. Hatta Dahlan, M.Eng
NIP. 19591019 19711 1 001



2. Dr.Ir. H. M. Faizal, DEA
NIP. 195805 1498403 1 001



Mengetahui,

Koordinator Program Studi
Magister Teknik Kimia,



Dr. David Bahrin ST., MT
NIP.198010312005011003



Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D
NIP. 196009091987031004

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Surahman

NIM : 03012681822014

Judul : Penurunan TDS, COD dan Minyak & Lemak Air Terproduksi
(*Produced Water*) Pada Proses *Pre-Treatment* Menggunakan
Electrocoagulan di Industri Migas Sumatera Selatan

Menyatakan bahwa Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/*plagiat*. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/*plagiat* dalam Laporan Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, Mei 2020



Surahman
NIM. 03012681822014

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karunia dan ridho-Nya, sehingga laporan penelitian ini dengan judul “Penurunan TDS, COD dan Minyak & Lemak Air Terproduksi (*Produced Water*) Pada Proses *Pre-Treatment* Menggunakan *Electrocoagulan* di Industri Migas Sumatera Selatan” ini dapat diajukan.

Dalam penyusunan laporan ini, banyak mendapatkan tantangan dan hambatan tetapi dengan bantuan dari berbagai pihak tantangan ini bisa teratasi. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih, kepada :

1. Bapak Prof. Ir. M. Said Noor, M.Sc., Ph.D. atas bimbingan, arahan dan waktu yang telah diluangkan kepada penulis untuk berdiskusi, dosen pembimbing dan perkuliahan.
2. Bapak DR. David Bahrin, ST., MT atas bimbingan yang telah memberikan masukan dan saran pada saat seminar proposal.
3. Rekan rekan mahasiswa S-2 Teknik Kimia angkatan 2018 : Rizza Fadilah, Putra Anugrah, Debi.
4. Rekan rekan S-2 Teknik Kimia angkatan 2018.
5. Kepada semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Dengan keterbatasan pengalaman, ilmu maupun pustaka yang ditinjau, penulis menyadari bahwa laporan penelitian ini masih banyak kekurangan dan pengembangan lanjut agar benar-benar bermanfaat. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran penelitian untuk penyempurnaan laporan selanjutnya.

Akhir kata, penulis berharap tesis ini memberikan manfaat bagi kita semua terutama untuk pengembangan ilmu pengetahuan yang ramah lingkungan.

Palembang, Agustus 2020

Penulis

RINGKASAN

PENURUNAN TDS, COD dan MINYAK & LEMAK AIR TERPRODUKSI
(*PRODUCED WATER*) PADA PROSES *PRE-TREATMENT* MENGGUNAKAN
ELECTROCOAGULAN di INDUSTRI MIGAS SUMATERA SELATAN
Karya tulis ilmiah berupa Tesis, Agustus 2020

Surahman, Dibimbing oleh Prof. Ir. M. Said Noor, M.Sc., Ph.D dan DR. David Bahrin,
ST., MT

Reduction of TDS, COD and Oil & Grease Produced Water with *Pre-Treatment*
Process Using Electrocoagulan in the Oil and Gas Industry South Sumatera

102 halaman. 21 tabel. 19 gambar. 7 lampiran

RINGKASAN

Air terproduksi (*produced water*) adalah salah satu limbah yang dihasilkan industri perminyakan dari kegiatan eksplorasi dan produksi minyak & gas bumi. Air terproduksi mengandung senyawa organik dan anorganik yang berpotensi menjadi limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun). Penelitian ini dilakukan untuk mengolah air terproduksi dengan menggunakan metode *electrocoagulan*. Yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik air terproduksi (*produced water*), mengkaji pengaruh proses *electrocoagulan* dalam proses pengolahan air terproduksi. Air terproduksi menunjukkan kadar COD, TDS, Minyak&lemak melebihi buku mutu sesuai Permen LH No 19 Tahun 2010 Kegiatan Eksplorasi dan Produksi Minyak dan Gas dari Fasilitas Darat (*Onshore*).

Prosedur penilitan adalah air terproduksi dimasukkan ke dalam *electrocoagulan reactor* yang telah dilengkapi dengan *electrode aluminium* dengan luas penampang $38,4 \text{ mm}^2$, mengalirkan aliran listrik tegangan listrik 3 volt pada arus 35A selama 15 menit. Menghentikan aliran listrik selama 10 menit, menunggu terjadinya *flok* dan terbentuk endapan. Kemudian mengambil sampel air sebanyak 300 ml dan analisa hasil *pH*, *COD*, minyak&lemak, tinggi *buble* dan *TDS*. Mengulangi langkah yang sama untuk waktu 30, 45, 60, 75 dan 90 menit dengan tegangan 6, 7.5, 9 dan 12 volt.

Dari hasil percobaan menggunakan metode *electrocoagulan* dengan beberapa variable seperti tegangan, luas penampang elektroda dan waktu diperoleh hasil, penggunaan luas penampang elektroda A 38,4 mm² penurunan COD sebesar 88,07% (rata-rata 88 ppm), TDS sebesar 31,29% (rata-rata 11001 ppm), minyak&lemak sebesar 96,98% (rata-rata 11 ppm). Sedangkan luas penampang elektroda B 78 mm² di peroleh penurunan COD sebesar 92,95% (rata-rata 52 ppm), TDS sebesar 36,25% (rata-rata 10206 ppm), minyak&lemak sebesar 98,56% (rata-rata 5,24 ppm). Dari penelitian dengan metode *electrocoagulan*, metode ini dapat dijadikan pengolahan sebagai *pre-treatment* air terproduksi (*produced water*) sebelum proses pengolahan lanjutan.

Kata kunci : electrocoagulan; produced water; minyak&gas bumi; COD; TDS; Minyak & lemak, elektroda alumunium, luas penampang

Kepustakaan : 98 (2002-2020)

SUMMARY

REDUCTION of TDS, COD, OIL & GREASE PRODUCED WATER WITH PRE-TREATMENT PROCESS USING ELECTROCOAGULAN IN OIL and GAS INDUSTRY SOUTH SUMATERA

Scientific paper in the form of Tesis, Augst 2020

Surahman, Supervised by Prof. Ir. M. Said Noor, M.Sc., Ph.D and DR. David Bahrin, ST., MT

Penurunan TDS, COD dan Minyak & Lemak Air Terproduksi (*Produced Water*) Pada Proses *Pre-Treatment* Menggunakan *Electrocoagulan* di Industri Migas Sumatera Selatan

102 Pages, 21 tables. 19 pictures, 7 attachments

SUMMARY

Produced water (water production) is one of the wastes produced by the petroleum industry from exploration and production of oil & gas. Produced water contains organic and inorganic compounds which are a really B3 waste (hazardous and toxic materials). This research was conducted to treat produced air using the electrocoagulant method. The aim of which is to see produced water (water produced), examines the effect of the electrocoagulant process in the prduced water process.

Produced water shows levels of COD, TDS, oil & grease exceed the quality book, according to the Minister of Environment and Forestry Regulation No. 19/2010 Exploration and Production Activities of Oil and Gas from Onshore Facilities. The winding procedure is that air is produced in the electrocoagulant reactor, which is equipped with aluminum electrodes with a cross-sectional area of 38. 4 mm², which conducts 3 volts of electricity at a current of 35 A for 15 minutes. Stops power for 10 minutes, waits for floc and a precipitate to form. Then take a 300 ml water sample and analyze the results of pH, COD, oil & fat, high Buble and TDS. Repeat the same steps for 30, 45, 60, 75 and 90 minutes with a voltage of 6, 7.5, 9 and 12 volts. From the results of the experiment using the electrocoagulant method with several variables such as voltage, electrode cross-section and time, the results were obtained, using the

electrode cross-sectional area A 38.4 mm², COD reduction was 88.07% (average 88 ppm), TDS of 31.29% (11001 ppm average), oil & fats 96.98% (average 11 ppm). While the cross-sectional area of the electrode B 78 mm² was obtained by a decrease in COD of 92.95% (52 ppm average). TDS of 36.25% (average 10206 ppm), oil & grease of 98.56% (average 5, 24 ppm). From research with the electrocoagulant method, this method can be used as pre-treatment for produced water (production water) before further processing.

Keywords : Electrocoagulan, produced water, oil&gas, COD, TDS, oil&grease, alumunium electrode, surface area

Citations : 98 (2002-2020)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS	v
KATA PENGANTAR	vi
RINGKASAN.....	viii
SUMMARY	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Hipotesa.....	7
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	8
1.6 Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Sumber Air Terproduksi.....	10
2.2 Komponen Air Terproduksi	11
2.2.1 Minyak	11
2.2.2 Logam Berat	12
2.2.3 Bahan Kimia	12
2.2.4 Garam	13
2.2.5 Oksigen Terlarut	13
2.3 Karakteristik Air Terproduksi	13
2.3.1 Padatan Terlarut.....	13

2.3.2 Endapan.....	14
2.3.3 Gas Terlarut.....	14
2.4 Analisis Air Terproduksi.....	14
2.5 <i>Water Management</i> Industri Migas Sumsel.....	15
2.6 <i>Electrocoagulan</i>	20
2.6.1 Proses Elektroagulasi.....	20
2.6.2 Mekanisme Elektroagulasi.....	21
2.6.3 <i>Electrode</i>	23
2.6.4 Anoda Katoda.....	24
2.6.5 Reaksi Pada Elektroda.....	25
2.6.6 Faktor-Faktor Elektroagulasi.....	26
2.7 <i>State of The Art</i> Penelitian <i>Electrocoagulan/Electrolisis</i>	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	33
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	33
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian.....	33
3.2.1 Bahan penelitian.....	33
3.2.2 Peralatan penelitian.....	33
3.3 Rancangan Penelitian.....	34
3.3.1 Variabel Penelitian.....	34
3.3.2 Prosedur Penelitian.....	34
3.3.3 Diagram Alir Penelitian.....	36
3.3.4 Skema Peralatan Penelitian.....	36
3.3.5 Metode pengolahan dan analisis data.....	37
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1 Penurunan Konsentrasi COD.....	39
4.2 Penurunan TDS.....	43
4.3 Penurunan Minyak&lemak.....	49
4.4 Analisa Keekonomian Pengolahan Air Terproduksi (<i>Produces Water</i>).....	53
4.4.1 Pengolahan Air Terproduksi (<i>Produced Water</i>) <i>Existing</i>	53
4.4.2 Pengolahan Air Terproduksi (<i>Produced Water</i>) <i>Electrocoagulan</i>	56
BAB 5 KESIMPULAN DAN TINDAK LANJUT.....	59
5.1 Kesimpulan.....	59

5.2 Tindak Lanjut.....	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	66

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	Hasil Analisa Air TLJ 2019	67
LAMPIRAN B	Hasil Penelitian	68
LAMPIRAN C	Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 19 Tahun 2010	69
LAMPIRAN D	PFD Water Injection	81
LAMPIRAN E	Rig Daily Report	82
LAMPIRAN F	Rekapitulasi Hasil Analisa Air Injeksi	83
LAMPIRAN G	Dokumentasi Penelitian	86

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Daftar Negara Dengan Batasan Konsentrasi Minyak Dari Hasil Air Terproduksi 11
Tabel 2.2	Kandungan Logam Berat Dalam Air Terproduksi 12
Tabel 2.3	Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/ atau Kegiatan Minyak dan Gas Serta Panas Bumi..... 15
Tabel 2.4	Hasil Analisa Air Terproduksi Struktur Talangjimar 20
Tabel 4.1	Hasil Analisa Awal Air Terproduksi Struktur Talangjimar 38
Tabel 4.2	Hasil rata-rata proses <i>electrocoagulan</i> dengan luas penampang 38,4 mm ² 39
Tabel 4.3	Hasil rata-rata proses <i>electrocoagulan</i> dengan luas penampang 78 mm ² 39
Tabel 4.4	Analisa biaya pengolahan air terproduksi (<i>produced water</i>) menggunakan teknologi filtrasi dan <i>chemical</i> 54
Tabel 4.5	Analisa Biaya pengolahan air terproduksi (<i>produced water</i>) dengan teknologi <i>electrocoagulan</i> 56

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Pola Air Injeksi (Pola Air Injeksi Migas)	15
Gambar 2.2 <i>Flowsheet</i> Pengolahan Air Terproduksi Industri Migas	16
Gambar 2.3 Jumlah Produksi Air Terproduksi vs Air Injeksi (Proses Injeksi) ..	17
Gambar 2.4 Salah satu <i>Water Injection Plant</i> di Fasilitas Produksi (<i>WIP</i>)	18
Gambar 2.5 Layout Jaringan <i>Trunkline Injeksi WIP</i> Fasprod Jaringan <i>WIP</i>)	18
Gambar 2.6 Proses <i>Electrochemical</i> Pada <i>Waste Water</i>	20
Gambar 2.7 Teknologi <i>Electrochemical</i> Dalam Pengolahan <i>Waste Water</i>	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 4.1 Pengaruh waktu pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar COD limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	40
Gambar 4.2 Pengaruh waktu pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar COD limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	41
Gambar 4.3 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar COD limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	42
Gambar 4.4 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar COD limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	43
Gambar 4.5 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar TDS limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	44
Gambar 4.6 Pengaruh waktu pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar TDS limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	45
Gambar 4.7 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar TDS limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	46
Gambar 4.8 Pengaruh waktu pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar TDS limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	47
Gambar 4.9 Endapan yang terbentuk pada proses elektrokoagulasi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	48
Gambar 4.10 Endapan yang terbentuk pada proses elektrokoagulasi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	48

Gambar 4.11 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar minyak & lemak limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	50
Gambar 4.12 Pengaruh waktu pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar minyak & lemak limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 38,4 mm ²	51
Gambar 4.13 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar minyak & lemak limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	52
Gambar 4.14 Pengaruh tegangan pada proses <i>electrocoagulan</i> terhadap penurunan kadar minyak & lemak limbah air terproduksi pada luas penampang elektroda 78 mm ²	53

DAFTAR ISTILAH AN SINGKATAN

EC	Electrokoagulan
<i>EOR</i>	Enhance Oil Recovery
m ³	Meter Kubik
COD	Chemical Oxygen Demand
TDS	Total Dissolve Solid
Bwpd	Barel Water Per Day
PPM	Part Per Million
PERMEN LH	Peraturan Menteri Lingkungan Hidup
kDA	Kilo Dalton
TSS	Total Suspended Solid
BTEX	Benzene Toluene Xylene
<i>IR</i>	Electrical Resistance
TOC	Total Organic Carbon
<i>WIP</i>	Water Injection Plant
<i>Fasprod</i>	Fasilitas Produksi
EF	Elektro Floakulan
UF	Ultrafiltrasi
Psi	Pound Force per Squere Inch
FFA	Free Fatty Acids
BOP	Blow Out Preventif

DAFTAR SIMBOL

<i>V</i>	<i>Tegangan Listrik</i>	V (volt)
<i>bbl</i>	<i>Satuan volume</i>	Volume minyak
<i>bwpd</i>	<i>Satuan volume air</i>	Volume air terproduksi
<i>L</i>	<i>Liter</i>	l
<i>ppm</i>	<i>Satuan konsentrasi</i>	ppm, mg/L
<i>A</i>	<i>Luas</i>	m ² , cm ²
<i>F</i>	<i>Tetapan Faraday</i>	96500 coulomb
<i>φ</i>	<i>phi</i>	
<i>i</i>	<i>Kuat arus</i>	A (ampere)
<i>R</i>	<i>Resistor</i>	ohm
<i>t</i>	<i>Waktu</i>	S (second, detik)
<i>AC</i>	<i>Arus bolak balik</i>	
<i>DC</i>	<i>Arus searah</i>	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Minyak bumi terdapat dalam pori-pori yang berada di antara batuan-batuan *sandstone* dan *limestone*. Pori-pori ini memiliki ukuran yang beragam serta selain terdapat minyak, juga terdapat gas dan air yang ditemukan dalam suatu reservoir (Robinson, 2010). Oleh karena itu, dalam produksi minyak bumi dari suatu sumur minyak, gas dan air juga turut terproduksi. Apabila air terproduksi tersebut akan dibuang atau dialirkan ke suatu badan air penerima, tentunya karakteristik air tersebut harus dapat memenuhi baku mutu yang telah ditentukan. Karakteristik air terproduksi berbeda-beda sehingga setiap area dapat berbeda pula unit pengolahannya (Cakmaci dkk, 2008).

Industri Migas Prabumulih merupakan salah satu lapangan terbesar dalam Produksi Minyak dan Gas di PT Pertamina EP dengan jumlah sumur produksi 201 sumur dan sumur injeksi 73 sumur. Pencapaian produksi Industri Migas Prabumulih akan sangat mempengaruhi pencapaian target produksi Industri Migas di Indonesia secara keseluruhan. Selain produksi, industri migas juga memiliki berbagai permasalahan yaitu kecenderungan produksi minyak dan gas yang mengalami *decline*, keterbatasan fasilitas produksi dan fasilitas penunjang, perijinan serta yang tidak kalah penting adalah memiliki volume limbah yang besar dan 80% dari limbah cair yang dihasilkan adalah air, yang disebut pula sebagai air terproduksi (*produced water*) (laporan produksi Pertamina EP Prabumulih, 2018).

Air terproduksi adalah aliran limbah dengan volume tertentu pada proses eksplorasi dan produksi. Selama produksi dari sisi keekonomian, volume air yang diproduksi dapat melebihi sepuluh kali volume hidrokarbon yang dihasilkan. Selama tahap produksi selanjutnya, tidak jarang ditemukan bahwa air yang diproduksi dapat mencapai 98% dari minyak dan gas yang dihasilkan (Stephenson dkk 1992).

Produced water merupakan salah satu limbah terbesar yg dihasilkan oleh sektor hulu migas. Terlebih untuk lapangan *marjinal*, *water cut* produksinya saja bisa mencapai 90% (bahkan bisa lebih). Hal tersebut menjadi *concern* utama untuk pengelolaannya sering bermasalah karena jumlahnya cenderung meningkat dari tahun ke tahun. Umumnya dalam dalam pengelolaan *produced water* ada dua macam, yaitu *treatment* untuk di buang ke badan air atau di-*re*-injeksi. *Re*-injeksi terbagi menjadi dua, yakni untuk *enhance oil recovery/ EOR* (*pressure maintenance, water flooding* dll) atau berupa sumur disposal. Semua opsi pengelolaan *produced water* mewajibkan dilakukan *pre-treatment* untuk memenuhi baku mutu sebelum air terproduksi diinjeksikan ke dalam sumur injeksi, kecuali sumur disposal. Semua pengelolaan perlu perijinan dan pemantauan rutin minimal per bulan dari dinas lingkungan, kecuali untuk *re*-injeksi sebagai *EOR*.

Tahun 2019 Industri Migas di Sumsel menghasilkan total air terproduksi (*produced water*) sebesar 25,775,574 bbl (bbl = barel) atau setara 4.098.058,510 m³ air (konversi 1 bbl = 158.99 liter). Total yang diinjeksikan ke dalam sumur injeksi sebesar 25,750,294 bbl atau setara 4.094.039,243 m³ air (1 bbl = 158.99 liter). Dari total air terproduksi tersebut struktur talang jimar menghasilkan 8.804.530 bbl (laporan Pertamina : pola injeksi field prabumulih, 2019). Tahun 2016, struktur talang jimar menghasilkan air terproduksi rata-rata 30000 bwpd dan air yang diinjeksikan rata-rata 32000 bwpd termasuk air dari struktur lain seperti gunung kemala. Peningkatan air terproduksi ini disebabkan beberapa faktor seperti sumur produksi minyak dan gas mengalami *decline* secara alami karena umur sumur secara ekonomis, sumur pemboran tidak berhasil karena 99% adalah *water cut* (laporan Pertamina : pola injeksi field prabumulih, 2019).

Saat ini *re*-injeksi merupakan opsi pengolahan *produced water* yg paling banyak dipilih karena praktis, tidak memiliki permasalahan secara sosial lingkungan terutama mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi teknologi (Stewart dan Arnold, 2011). Sebagai contoh, beberapa lapangan akan sangat sulit memenuhi kriteria baku mutu TDS < 4000 ppm (berdasarkan Permen LH No 19 tahun 2010 tentang Baku Mutu Kegiatan Eksplorasi dan Produksi Migas) dengan teknologi konvensional. Selain itu terdapat keuntungan yang didapatkan dari injeksi air terproduksi kedalam formasi yaitu untuk mendorong kandungan *crude oil* dari

dalam formasi kesumur-sumur produksi dan menjaga tekanan *fluida* (Sistem tata kerja Pertamina : Metode *EOR (Enhanced oil recovery)*, 2003).

Water injection, sebagai salah satu strategi *EOR* dalam menjaga tekanan dalam formasi, selain itu dapat mengurangi dampak limbah *produced water* yang dihasilkan dari produksi *oil&gas*. Agar tidak merusak formasi, karakteristik air yang di injeksi harus sesuai dengan karakteristik air yang ada di formasi. Beberapa masalah yang terkait kegiatan *water injection* ini adalah terbentuknya *scale* pada *flowline*, korosi pada pipa (biasanya disebabkan karena oksigen terlarut), dan adanya bakteri (*acid reducing bacteria*) yang menyebabkan korosi atau bakteri penyebab *bio-fouling* (Sistem tata kerja Pertamina : Metode *EOR (Enhanced oil recovery)*, 2003).

Scale dapat menyebabkan terjadinya penurunan injektivitas sumur, kerusakan formasi dan kerusakan peralatan. *Scale* yang umum terjadi adalah yang disebabkan oleh air terproduksi adalah kalsium *carbonat, ferokarbonat, ferosulfida, calcium sulfat* dan *barium sulfat* (Sistem tata kerja Pertamina : Metode *EOR (Enhanced oil recovery)*, 2003). Selain permasalahan peningkatan jumlah air terproduksi di atas, beberapa masalah lain terkait air terproduksi sebelum diinjeksikan ke dalam sumur injeksi diantaranya (laporan Pertamina : pola injeksi field prabumulih, 2019) :

- Keterbatasan fasilitas penunjang air terproduksi, seperti fasilitas penampung air terproduksi sebelum diinjeksikan.
- Kerusakan pada tangki penampung air terproduksi.
- Beberapa media filter di fasilitas penampung mengalami kerusakan dan jenuh.
- Kerusakan pada pompa *feeder* air terproduksi.
- Keterbatasan *chemical* untuk *acidizing* pada rangkaian injeksi.

Beberapa teknik atau metode yang telah dikembangkan oleh peneliti untuk menghilangkan permasalahan terkait pengolahan air terproduksi/*produced water* yang dihasilkan oleh industri minyak dan gas. Metode atau teknik yang banyak dikembangkan adalah proses fisis dan kimia atau kombinasi keduanya. Penelitian-penelitian tersebut diantaranya adalah : 1) Henny dkk (2013) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *polyethersulfone (PES)* mampu

mereduksi 90% COD, 99.5% minyak, 83% *toluene* dan 82% *xylene*. 2) Pertiwi dkk (2015) menunjukkan beberapa teknik pengolahan *produced water* dengan pemisahan, *deoiling* dan *softener*. Dari pengolahan tersebut diperoleh reduksi *turbidity* 47-95%, penyisihan kesadahan 99%. 3) Ezechi dkk (2015) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *Electrocoagulation* mampu menurunkan kandungan boron sebesar 98%, *electrocoagulation* efektif untuk menurunkan beberapa *pollutant* seperti logam berat Cd sebesar 75% dengan biaya operasi yang rendah, pH optimal untuk penurunan boron adalah 4 – 7. 4) Deriszadeh dkk (2010) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *Enhanced Ultrafiltration*. Teknik ini mampu menurunkan *suspended solid* dan *oil&grease* pada *polymeric membrane* 50 kDa, penurunan *TOC (total organic carbon)* 1.8 ppm.

Penelitian lainnya yaitu 5) Al-kaabi dkk (2019) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *microemulsion* dengan modifikasi *carbon aktif* mampu menurunkan TSS, COD, BTEX sebesar 93% kecuali *toluene*. 6) Da silva dkk (2014) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *flotation & photo-fenton process* mampu menurunkan 99% kandungan *oil&grease*. 7) Al-Ghouti dkk (2019) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *flotation & photo-fenton process* mampu menurunkan *oil* sebesar 84% dan *TOG* sebesar 95%. 8) Weschenfelder dkk (2019) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *ceramic membranes* mampu menurunkan *oil content* dalam air terproduksi sebesar 5 ppm, *cationic surfactant*. 9) Ahmadun dkk (2009) menunjukkan beberapa teknik yang digunakan dalam pengolahan *produced water* seperti beberapa teknologi saat ini yang digunakan belum mampu menurunkan kandungan *suspended solid* air terproduksi, penggunaan *chemical* juga belum mampu mereduksi beberapa kandungan pada air terproduksi. Teknologi yang berpotensi mampu mereduksi beberapa kandungan berbahaya pada air terproduksi adalah dengan menggunakan *biological treatment* selain ramah lingkungan juga biaya tidak terlalu tinggi. 10) Robinson (2013) menunjukkan pengolahan *produced water* dengan menggunakan *micro bubble methods* mampu menurunkan COD sebesar 90%, TDS sebesar 200 mg/l dan BTEX sebesar 0.75 mg/l. Namun demikian, penggunaan *biological treatment* untuk

mengelolaan air terproduksi memiliki kelemahan yaitu, mikroorganisme yang digunakan cenderung tidak tahan atau cepat mati apabila ada perubahan kualitas air terproduksi secara tiba-tiba (sulit menghadapi makhluk hidup, karena butuh tempat yang nyaman, kondisi yang sesuai dsb) (cari literatur yang menjelaskan kelemahan metode biologi ini).

Teknik atau metode terkini yang dikembangkan terkait pengolahan *produced water* adalah menggunakan sistem *membrane* baik *ultrafiltrasi* atau *reverse osmosis*. Namun kelemahan Teknik atau metode ini adalah *membrane* lebih jenuh atau cepat rusak karena tingginya kandungan TDS maupun TSS dalam air terproduksi sehingga membutuhkan biaya besar untuk mengoperasikannya (Judd dan Jefferson, 2003).

Teknik atau metode elektrolisis yang dikombinasikan dengan proses kimia dapat dijadikan alternatif untuk pengelolaan air terproduksi. Beberapa penelitian pengolahan air limbah menggunakan teknik elektrolisis sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Demikian juga pengolahan air limbah dengan kombinasi elektrolisis dengan proses lain seperti filtrasi maupun koagulasi (dengan penambahan bahan kimia) atau proses lainnya. Pengolahan limbah dengan kombinasi elektrolisis dan proses *microfiltrasi & nanofiltrasi* mampu menurunkan kandungan NOM sebesar 90% (Sari dan Chellam, 2017).

Metode elektrolisis juga diterapkan pada limbah industri pewarna kain batik. Pada metode ini digunakan elektrolisis sistem *batch*, dimana tegangan, waktu dan jarak antar electrode berpengaruh terhadap penurunan COD, TSS dan konsentrasi warna limbah. Metode elektrolisis pada industri batik mampu menurunkan COD sebesar 99.18% pada menit 60, tegangan 10 V pada jarak antar electrode 3 cm. Selain itu metode elektrolisis juga mampu menurunkan konsentrasi warna sebesar 68% pada menit 20, tegangan 15 volt pada jarak antar electrode 3 cm (Setianingrum dkk, 2016). Jarak antar electrode juga berpengaruh terhadap penurunan turbidity hal ini dipengaruhi adanya *electrical resistance (IR)* pada electrode. Semakin dekat jarak antar electrode, semakin besar penurunan turbidity. Jarak antar electrode 1 cm, penurunan turbidity sebesar 92% sedangkan jarak 0.5 cm di peroleh penurunan turbidity sebesar > 92% (Adamovic dkk, 2015).

Berdasarkan hasil uji pendahuluan skala laboratorium pada pengolahan air terproduksi memperlihatkan bahwa elektroda aluminium memiliki kemampuan menurunkan warna sebesar 99.78% dan *turbidity* sebesar 99.65% dibandingkan dengan menggunakan elektrode *stainless steel* (Mahmad dkk, 2015).

Proses *electrochemical* menggunakan kombinasi proses elektrolisis dan *chemical* dengan penambahan koagulan dalam proses pengolahan air limbah lebih ekonomis dibandingkan dengan proses kimia saja. Seperti pada pengolahan limbah industri *textile* menggunakan *electrochemical*. Penggunaan *electrochemical* pada industri *textile* mampu menurunkan kandungan COD sebesar > 90%, TOC sebesar 70% dan warna sebesar 100%. Hasil ini lebih baik dibandingkan pengolahan limbah industri *textile* menggunakan bahan kimia sebagai koagulan dimana penurunan rata-rata COD sebesar 53%, warna sebesar 97% dan TOC sebesar 24% (Gilpavaz dkk, 2018).

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh tegangan listrik, luas penampang elektroda, dan lama waktu proses *electrocoagulan* terhadap penurunan kadar COD, TDS, dan minyak & lemak dalam *produced water* struktur Talang Jimar lapangan migas Prabumulih?
2. Bagaimana perbandingan keekonomian proses pengolahan air terproduksi dengan proses *electrocoagulan* dibandingkan dengan kombinasi proses *filtrasi* dan *chemical* (proses eksisting) pada pengolahan air terproduksi industri migas?
3. Apakah air terproduksi hasil pengolahan menggunakan teknik *electrocoagulan* memenuhi baku mutu berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2010 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan minyak dan gas bumi serta panas bumi.
4. Apakah metode pengolahan *electrocoagulan* dapat dijadikan alternatif dalam mengolah air terproduksi, baik sebagai proses tunggal atau kombinasi dengan proses lain?.

5. Bagaimana perbandingan dari segi keekonomian pengolahan air terproduksi dengan *electrocoagulan* dibandingkan dengan metode yang saat ini digunakan yaitu penambahan bahan kimia sebagai koagulan?.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh tegangan listrik, luas penampang elektroda dan lama waktu proses *electrocoagulan* terhadap penurunan kadar COD, TDS, dan minyak & lemak dalam *produced water* struktur Talang Jimar Prabumulih.
2. Mengetahui dan menganalisis keekonomian proses pengolahan air terproduksi dengan *electrocoagulan* dibandingkan dengan kombinasi proses filtrasi dan chemical (proses eksisting) pada pengolahan air terproduksi industri migas?.
3. Mengetahui dan menganalisis kualitas air terproduksi hasil pengolahan menggunakan proses *electrocoagulan* berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2010 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan minyak dan gas bumi serta panas bumi.
4. Penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam penelitian selanjutnya dan acuan pembelajaran untuk pengolahan air terproduksi.

1.4. Hipotesa

Hipotesa dari penelitian ini adalah :

1. Semakin besar luas penampang elektroda *aluminium* maka semakin besar penurunan kandungan *COD*, minyak & lemak, *TDS* pada proses pengolahan air terproduksi dengan metode *electrocoagulan* secara *batch*. (Jiang ding & Liang liang, 2018).
2. Semakin besar tegangan elektroda maka semakin besar penurunan kandungan *COD*, minyak & lemak, *TDS* pada proses pengolahan air terproduksi dengan metode *electrocoagulan* secara *batch* (Kabdasli & Arslan 2012).

3. Semakin lama waktu proses *electrocoagulan* maka semakin besar penurunan kandungan *COD*, minyak & lemak, *TDS* pada proses pengolahan air terproduksi dengan metode *electrocoagulan* secara *batch* (Achmad dkk 2017).

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

1. Penelitian ini merupakan penelitian berskala laboratorium dengan sistem *batch*.
2. *Sample* air terproduksi (*produced water*) yang digunakan sebagai bahan baku adalah air terproduksi Industri Migas Prabumulih struktur Talangjimar.
3. *Electrode* yang digunakan sebagai pengolahan air terproduksi adalah material *Alumunium* dengan dimensi panjang 23 cm, lebar 3 cm, ketebalan 2 mm (plat A) dan panjang 23cm, lebar 6 cm, ketebalan 2 mm (plat B).
4. Tegangan yang digunakan dalam pengolahan air terproduksi adalah 3 volt, 6 volt, 7.5 volt, 9 volt dan 12 volt.
5. Waktu yang digunakan dalam pengolahan air terproduksi adalah 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit, 75 menit dan 90 menit.
6. Analisis air terproduksi dan air hasil pengolahan meliputi kadar *COD*, minyak & lemak, *TDS*, *pH*, tinggi *bubble*.
7. Proses *electrocoagulan* pada pengolahan air terproduksi (*produced water*) ini adalah sebagai proses *pre-treatment* sebelum dilakukan proses lanjutan karena sifat dan karekterisitik air terproduksi (*produced water*) seperti *sea water* sehingga proses *electrocoagulan* tidak dapat dijadikan proses tunggal untuk menurunkan kandungan-kandungan pada air terproduksi (*produced water*) sehingga memerlukan proses tambahan untuk menurunkan kandungan yang ada di dalam air terproduksi (*produced water*) tersebut.
8. Kajian teknoekonomi menggunakan pendekatan analisa biaya operasional yang dilakukan meliputi biaya sewa rig, biaya bahan kimia, biaya jasa tenaga kerja dan biaya penggantian material.

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil penelitian mampu mempelajari karakteristik limbah air terproduksi dengan pengolahan sistem *electrocoagulan*.
2. Hasil penelitian untuk mengetahui pengaruh luas penampang elektroda *aluminium*, tegangan, dan waktu terhadap penurunan kandungan *COD*, *minyak & lemak*, *TDS*.
3. Hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam penelitian selanjutnya dan acuan pembelajaran untuk pengolahan limbah air terproduksi berikutnya.
4. Hasil penelitian dapat dijadikan acuan dalam proses *pre-treatment* air terproduksi (*produced water*) sebelum dilakukan proses lanjutan karena sifatnya yang mampu menurunkan kandungan logam berat, minyak & lemak, *COD*.
5. Hasil penelitian dapat dijadikan sebagai sarana untuk menyusun dan mengimplementasikan pengembangan pengolahan air terproduksi (*produced water*).
6. Hasil penelitian dapat dijadikan perbandingan teknoekonomi menggunakan pendekatan analisa biaya operasional yang dilakukan meliputi biaya sewa rig, biaya bahan kimia, biaya jasa tenaga kerja dan biaya penggantian material dengan teknologi pengolahan air terproduksi (*produced water*) menggunakan proses *electrocoagulan*.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamovic, S., Prica, M., Dalmacija, B. and Rapajic, S. 2015. *Feasibility of electrocoagulation / flotation treatment of waste offset printing developer based on the response surface analysis*, *Arabian Journal Of Chemistry*. King Saud University. pp. 2-11.
- Ahmadun, F., Pendashteh, A. and Chuah, L. 2009. *Journal of Hazardous Materials*, 170, pp. 530–551.
- Akyol, A., Taner, O. and Bayramoglu, M. 2015. *Journal of Water Process Engineering Treatment of hydroquinone by photochemical oxidation and electrocoagulation combined process*, *Journal of Water Process Engineering*. Elsevier Ltd, 8, pp. 45–54.
- Arthur, J. 2016. *Technical summary of oil and gas produced water treatment technologies*. <http://www.all llc.com/publicdownloads/ALLConsulting-Water Treatment Options Report.pdf>.
- Ayu, M. and Chellam, S. 2017. *Electrocoagulation process considerations during advanced pretreatment for brackish inland surface water desalination : Nano fi lter fouling control and permeate water quality*, *Desalination*. Elsevier B.V., 410, pp. 66–76.
- Bard, A. and Faulkner, L., 2000. *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications*. Edisi 2, Jhon Wiley & Sons, New York.
- Biesinger, K. dan Christensen, G. 1972. *Effects of Various Metals on Survival, Growth, Reproduction, and Metabolism of Dophnia magna*, *J. Fish. Res. Board Can.* 29: 1691.
- Chen, X., Chen, G. and Yue, P. L. 2002. *Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation*, 57, pp. 2449–2455.
- Chou, W. et al. .2010. *Adsorption treatment of oxide chemical mechanical polishing wastewater from a semiconductor manufacturing plant by electrocoagulation*. *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 180(1–3), pp. 217–224.
- Cora Hernandez, M.G., 2002. *Electrocoagulation/Flotation (ECF) Technology Used in the Treatment of Wastewater Containing Variable Concentrations of Heavy Metals and Organic Pollutants*. UMI, Cleveland.

- De Santo, R. 1978. *Concepts of applied ecology*. Heidelberg Science Library. Springer – Verlag, New York. 310 p.
- Moussa, T. D., El-Nass, H. M., Nasser, M. and Al-Marri, J. M. 2016. *A Comprehensive Review of electrocoagulation for water treatment : Potentials and Challenges*. Science Direct, pp. 323-330.
- Lasca, E., Canrez, P., Saez, C., Martinez, F. And Rodrigo, A. M. 2013. *Modelling and cost evaluation of electro-coagulation processes for the removal of anions from water*.
- Ezechi, E. H. *et al.* 2015. *Electrochemical removal of boron from produced water and recovery*, *Biochemical Pharmacology*. Elsevier B.V.
- Gamage, N. P., Rimer, J. D. and Chellam, S. 2012. *Improvements in permeate flux by aluminum electroflotation pretreatment during microfiltration of surface water*, *Journal of Membrane Science*. Elsevier B.V., 411–412, pp. 45–53.
- Gamero-quijano, A., Herzog, G. and Scanlon, M. D. 2019. *Aqueous Surface Chemistry of Gold Mesh Electrodes in a Closed Bipolar*, *Electrochimica Acta*. Elsevier Ltd, p. 135328.
- Govindan, K., Angelin, A. and Rangarajan, M. 2018. *Critical evaluation of mechanism responsible for biomass abatement during electrochemical coagulation (EC) process : A critical review*, Elsevier 227(April), pp. 335–353.
- Grjotheim, K., Krohn, C., Malinovsky, M., Matiasovsky, K. and Thonstad, J. 1982. *Aluminium Electrolysis Fundamentals of the Hall-Heroult*. 2nd Edition. Germany.
- Grjotheim, K. and Kvande, H. (eds). 1993. *Introduction to Aluminium Electrolysis*. 2nd Editio. Germany.
- Hasnain, M., Henry, E. and Ahmed, Z. 2013. *ScienceDirect Boron removal by electrocoagulation and recovery*, *Water Research*. Elsevier, 51(0), pp. 113–123.
- Igunnu, E. 2016. *Produced water treatment technologies*. <http://ijlct.oxfordjournals.org/content/early/2012/07/04/ijlct.cts049.full>
- Ding, J., Wei, L., Huang, H., Zhao, Q., Hao, W., Kabutey, T. F., Yuan, Y. and Dionysiou, D.D. 2018. *Tertiary treatment of landfill leachate by an*

integrated Electro-Oxidation/Electro-Coagulation/Electro-Reduction process: Performance and mechanism.

- Kamaraj, R. and Vasudevan, S. 2014. *Evaluation of electrocoagulation process for the removal of strontium and cesium from aqueous solution*, *Chemical Engineering Research and Design*. Institution of Chemical Engineers, pp. 1–9.
- Khemis, M., Tangyu, L., Leclerc, J. P., Valentine, G. and Lapique, F. 2005. *Electrocoagulation For The Treatment Of Oil*, (January), pp. 50–57.
- Mahmad, K. M., Rozainy, R. M., Abustan, I. and Baharun, N. 2016. *Electrocoagulation Process by Using Aluminium and Stainless Steel Electrodes to Treat Total Chromium, Colour and Turbidity*. Science Direct, pp. 341-351.
- Mano, N. 2019. *ScienceDirect Electrochemistry Recent advances in high surface area electrodes for Q8 bioelectrochemical applications*, (October), pp. 1–6.
- Martinez, C. Rodrigo, M. and Scialdone, O., 2018. *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. Edisi 1, Elsevier, Kidlington, Cambridge.
- Metcalf dan Eddy. 1991. *Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse*. 3rd ed. (Revised by: G. Tchobanoglous and F.L. Burton). McGraw-Hill, Inc. New York, Singapore. 1334 p.
- Moore, J. 1991. *Inorganic Contaminat of Surface Water*. Springer Verlag, New York.
- Nariyan, E., Wolkersdorfer, C. and Sillanpää, M. 2018. *Sulfate removal from acid mine water from the deepest active European mine by precipitation and various electrocoagulation configurations*. Elsevier, 227, pp. 162–171.
- Qi, Z., You, S. And Ren, Z. 2017. *Wireless Electrocoagulation in Water Treatment Based on Bipolar Electrochemistry*. Science Direct, pp. 521-546.
- Rajamohan Natarajan, Fatma Al Fazari, Amal Al Saadi. 2018. *Municipal waste water treatment by natural coagulant assisted electrochemical technique-Parametric effects*. Science Direct, pp.
- Razi, F. 2009. *Review of technologies for oil and gas produced water treatment*. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 170. pp. 530-551.

- Robinson, D. 2013. *Treatment and discharge of produced waters onshore*, pp. 40–46.
- Safitri, H. I., Ryanitha, A. F., dan Aryanti, N. 2013. *Teknologi Ultrafiltrasi Untuk Pengolahan Air Terproduksi (Produced Water)*, 2(4), pp. 205–211.
- Sari, M. A. and Chellam, S. 2015. *Journal of Colloid and Interface Science Mechanisms of boron removal from hydraulic fracturing wastewater by aluminum electrocoagulation*, *Journal Of Colloid And Interface Science*. Elsevier Inc., 458, pp. 103–111.
- Santos, S., Chavione, O. F., Lins, E., Neto, B. D., and Luiz, E. 2014. *Oil removal from produced water by conjugation of flotation and photo-Fenton processes*, *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, pp. 3–9.
- Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, P. V., and Maran, P. J. 2011. *Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process*, *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 186(2–3), pp. 1495–1502.
- Stewart, M., Arnold, K., 2011. *Produced Water Treatment Field Manual*. Elsevier, Kidlington.
- Tavangar, T., Jalali, K., Amin, M., Shahmirzadi, A., and Karimi, M. 2019. *Separation and Purification Technology Toward real textile wastewater treatment : Membrane fouling control and effective fractionation of dyes / inorganic salts using a hybrid electrocoagulation – Nanofiltration process*, pp. 115–125.
- Timmes, T. C., Kim, H. and Dempsey, B. A. 2009. *Electrocoagulation pretreatment of seawater prior to ultrafiltration : Bench-scale applications for military water purification systems*, Elsevier B.V., 249(3), pp. 895–901.
- Tweney, R. D. and Gooding, D. 1822. *Michael Faraday's 'Chemical Notes, Hints, Suggestions and Objects of Pursuit' of 1822*. Series 17. England.
- Vasudevan, S. and Lakshmi, J. 2011. *Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water – A novel approach*. *Separation and Purification Technology*. Elsevier B.V., 80(3), pp. 643–651.
- Vasudevan, S., Lakshmi, J., Jayaraj, and J., Sozhan, G. 2009. *Remediation of phosphate-contaminated water by electrocoagulation with aluminium , aluminium alloy and mild steel anodes*, 164, pp. 1480–1486.
- Weiner, E. 2012. *Applications of Environmental Aquatic Chemistry* (2ed).

Zeng, D., Salvatore, P., Karlsen, K. K., Wengel, J. and Ulstrup, J. 2020. 'Journal P of', *Journal of Electroanalytical Chemistry*. Elsevier B.V, (111), p. 114138.