

SKRIPSI

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH RUMAH POTONG AYAM
MENGUNAKAN METODE ELEKTRO-FENTON**

Disusun dan diajukan oleh:

**A. MUHAMMAD ZIQHRAN SOFYAN
D131 17 1310**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENGOLAHAN AIR LIMBAH RUMAH PEMOTONGAN AYAM MENGGUNAKAN METODE ELEKTRO-FENTON

Disusun dan diajukan oleh

A. Muhammad Ziqhran Sofyan
D131171310

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 25 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.
NIP 197506232015042001

Pembimbing Pendamping,



Ir. Nurjannah Oktorina, S.T., M.T.
NIP 199210242019016001

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., AER.
NIP 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : A. Muhammad Ziqhran Sofyan

NIM : D131 17 1310

Program Studi : Teknik Lingkungan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Pengolahan Air Limbah Rumah Potong Ayam Menggunakan Metode Elektro-Fenton

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 15 Agustus 2024

Yang Menyatakan



A. Muhammad Ziqhran Sofyan

ABSTRAK

A. MUHAMMAD ZIQHRAN SOFYAN. *Pengolahan Air Limbah Rumah Potong Ayam menggunakan Metode Elektro-Fenton* (dibimbing oleh Roslinda Ibrahim dan Nurjannah Oktorina Abdullah).

Air limbah rumah potong ayam (RPA) mengandung bahan organik yang tinggi dan dapat mencemari badan air. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas metode elektro-fenton dalam mengolah air limbah rumah potong ayam dengan parameter *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS), minyak dan lemak, serta amonia.

Penelitian ini menggunakan reaktor tipe *undivided cell* dengan *carbon felt* sebagai katoda dan *stainless steel* sebagai anoda. Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah kuat arus dan waktu kontak. Variasi kuat arus sebesar 600 mA (I1), 700 mA (I2), 800 mA (I3), dan 900 mA (I4). Variasi waktu kontak yang digunakan adalah 40 menit (T1), 60 menit (T2), 80 menit (T3), dan 100 menit (T4). Karakteristik air limbah rumah potong ayam yang didapatkan adalah BOD 5139,8 mg/L, COD 6048 mg/L, TSS 1680 mg/L, minyak dan lemak 5693,5 mg/L, dan amonia 196,91 mg/L. Air limbah diencerkan terlebih dahulu dengan perbandingan 1:1 sebelum diolah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat arus dan waktu kontak berpengaruh terhadap penyisihan polutan. Variasi optimal dalam pengolahan air limbah RPA pada penelitian ini adalah kuat arus 900 mA (I4) dan waktu kontak 100 menit (T4) dengan penurunan kadar BOD sebesar 90,19%, COD sebesar 64,13%, TSS sebesar 95,17%, minyak dan lemak sebesar 70,07%, serta amonia sebesar 98,89%. Namun, penyisihan pada BOD, COD, serta minyak dan lemak belum memenuhi baku mutu, sedangkan penyisihan TSS dan amonia memenuhi baku mutu.

Kata Kunci: Air Limbah RPA, Elektro-Fenton, Pengolahan Air Limbah, Proses Oksidasi Lanjut

ABSTRACT

A. MUHAMMAD ZIQHRAN SOFYAN. *Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment using Electro-Fenton Method* (guided by Roslinda Ibrahim dan Nurjannah Oktorina Abdullah).

Poultry slaughterhouse wastewater contains a high organic matter content and has the potential to pollute water bodies. This study aims to determine the effectiveness of the Electro-Fenton method in treating poultry slaughterhouse wastewater, with parameters including Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS), oil and grease, and ammonia.

The experimental setup utilises an undivided cell reactor with carbon felt as the cathode and stainless steel as the anode. The independent variables employed in this study were current and contact time. The current variations were 600 mA (I1), 700 mA (I2), 800 mA (I3), and 900 mA (I4). The contact time variations were 40 minutes (T1), 60 minutes (T2), 80 minutes (T3), and 100 minutes (T4). The characteristics of poultry slaughterhouse wastewater were as follows: BOD 5139,8 mg/L, COD 6048 mg/L, TSS 1680 mg/L, oil and grease 5693,5 mg/L, and ammonia 196,91 mg/L. Prior to treatment, the wastewater was diluted in a ratio of 1:1.

It can be concluded from the results that the current and contact time exert an influence on the removal of pollutants. The optimal treatment for poultry slaughterhouse wastewater, within the scope of this study, was found to be a current of 900 mA (I4) and a contact time of 100 minutes (T4). This treatment resulted in a 90.19% decrease in BOD, a 64.13% decrease in COD, a 95.17% decrease in TSS, a 70.07% decrease in oil and grease, and a 98.89% decrease in ammonia levels. Nevertheless, the reductions in BOD, COD, and oil and grease were insufficient to meet the quality standards, whereas the reductions in TSS and ammonia met the requisite quality standards.

Keywords: Poultry Slaughterhouse Wastewater, Electro-Fenton, Water Treatment, Advanced Oxidation Process

DAFTAR ISI

SKRIPSI	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Karakteristik Air Limbah Rumah Potong Hewan	6
2.2 Baku Mutu Air Limbah Rumah Potong Hewan	7
2.3 Pengolahan Air Limbah	8
2.4 Proses Fenton	9
2.5 Elektro-Fenton	10
2.6 Faktor yang Berpengaruh	14
2.7 Penelitian Terdahulu	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1 Rancangan Penelitian	30
3.2 Alat dan Bahan	32
3.4. Populasi dan Sampel	33
3.5. Tahap Penelitian	33
3.6. Teknik Pengumpulan Data	36
3.7. Teknik Analisis Data	37
3.8. Diagram Alir Penelitian	38
BAB IV HASIL PENELITIAN	39
4.1 Gambaran Umum Penelitian	39
3.3 Waktu dan Lokasi Penelitian	40
4.2 Pengaruh Arus Listrik dan Waktu Kontak	40
4.3 Konsumsi Energi Metode Elektro-fenton	60
4.4 Efektivitas Pengolahan Air Limbah Rumah Potong Ayam	61
4.5 Penerapan Metode Elektro-fenton untuk Air Limbah Rumah Potong Ayam	67
BAB V PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik air limbah rumah potong ayam	7
Tabel 2. Baku mutu air limbah rumah potong hewan.....	7
Tabel 3. Penelitian terdahulu.....	23
Tabel 4. Variabel penelitian	32
Tabel 5. Metode pengujian sampel.....	36
Tabel 6. Hasil karakteristik air limbah RPA.....	39
Tabel 7. Hasil karakteristik awal air sampel.....	39
Tabel 8. Hasil pengujian parameter BOD pada variasi kuat arus	40
Tabel 9. Hasil pengujian parameter BOD pada variasi waktu kontak	41
Tabel 10. Ringkasan model pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan BOD	42
Tabel 11. Analisis pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan BOD.....	42
Tabel 12. Hasil pengujian parameter COD pada variasi arus listrik	44
Tabel 13. Hasil pengujian parameter COD pada variasi waktu kontak	45
Tabel 14. Ringkasan model pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan COD	46
Tabel 15. Koefisien analisis pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan COD	46
Tabel 16. Hasil pengujian parameter TSS pada variasi arus listrik.....	48
Tabel 17. Hasil pengujian parameter TSS pada variasi waktu kontak	49
Tabel 18. Ringkasan model pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan TSS.....	50
Tabel 19. Analisis pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan TSS	50
Tabel 20. Hasil pengujian parameter minyak dan lemak pada variasi arus listrik	52
Tabel 21. Hasil pengujian parameter minyak dan lemak pada variasi waktu kontak.....	53
Tabel 22. Ringkasan model pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan minyak dan lemak	54
Tabel 23. Analisis pengaruh variasi arus listrik dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan minyak dan lemak.....	54
Tabel 24. Hasil pengujian parameter amonia pada variasi kuat arus	56
Tabel 25. Hasil pengujian parameter amonia pada variasi waktu kontak	57
Tabel 26. Ringkasan model pengaruh variasi kuat arus dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan amonia.....	58
Tabel 27. Analisis pengaruh variasi kuat arus dan waktu kontak terhadap efektivitas penyisihan amonia	58
Tabel 28. Konsumsi energi	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Ilustrasi alat pengolahan	34
Gambar 2. Desain reaktor tampak depan.....	34
Gambar 3. Desain reaktor tampak samping.....	35
Gambar 4. Grafik pengaruh kuat arus terhadap penyisihan BOD.....	43
Gambar 5. Grafik pengaruh waktu kontak terhadap penyisihan BOD.....	44
Gambar 6. Grafik pengaruh kuat arus terhadap penyisihan COD.....	47
Gambar 7. Grafik pengaruh waktu kontak terhadap penyisihan COD.....	48
Gambar 8. Grafik pengaruh kuat arus terhadap penyisihan TSS	51
Gambar 9. Grafik pengaruh waktu kontak terhadap penyisihan TSS	52
Gambar 10. Grafik pengaruh kuat arus terhadap penyisihan minyak dan lemak	55
Gambar 11. Grafik pengaruh waktu kontak terhadap penyisihan minyak dan lemak	56
Gambar 12. Grafik pengaruh kuat arus terhadap penyisihan amonia	59
Gambar 13. Grafik pengaruh waktu kontak terhadap penyisihan amonia	60
Gambar 14. Grafik efektivitas penyisihan BOD.....	61
Gambar 15. Grafik efektivitas penyisihan COD.....	62
Gambar 16. Grafik efektivitas penyisihan TSS	63
Gambar 17. Grafik efektivitas penyisihan minyak dan lemak	64
Gambar 18. Grafik efektivitas penyisihan amonia	66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Laporan Hasil Pengujian.....	74
Lampiran 2. Metode Pengujian Sampel	78
Lampiran 3. Baku Mutu Air Limbah.....	88
Lampiran 4. Dokumentasi	89
Lampiran 5. Hasil Analisis Statistika	91

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wata'ala karena atas rahmat, hidayah dan izin-Nya lah sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **Pengolahan Air Limbah Rumah Potong Ayam Menggunakan Metode Elektro-Fenton**. Shalawat serta salam penulis curahkan kepada junjungan kita, Rasulullah SAW, yang telah mengantarkan umat manusia menuju masa yang terang benderang.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada jenjang S-1 Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari banyak kesulitan yang dihadapi selama penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan bimbingan, nasehat dan doa dari segala pihak, membuat penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Ucapan terima kasih sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada kedua orang tua penulis yakni Bapak Dr. Ir. Adnan Sofyan, M.P. dan Ibu Andi Ummung Sulolipu, S.P. serta adik saya Andi Divya Azzahra yang telah memberikan doa, kasih sayang, dukungan dan sebagainya yang tidak bisa penulis ungkapkan semuanya.

Dalam pengerjaan tugas akhir tentu banyak pihak lain yang membantu penulis. Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T. selaku Dosen Pembimbing I senantiasa meluangkan waktu, pikiran, dan hati, untuk membimbing dan memperhatikan perkembangan penulis selama menyelesaikan tugas akhir;
2. Ibu Ir. Nurjannah Oktorina, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II senantiasa meluangkan waktu, pikiran, dan hati, untuk membimbing dan memperhatikan perkembangan penulis selama menyelesaikan tugas akhir;
3. Seluruh Staf dan Karyawan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin terkhusus Ibu Sumi dan Kak Olan yang telah banyak membantu penulis dalam proses administrasi;
4. Pak Syarif selaku laboran Laboratorium Kualitas Air yang membantu penulis selama penelitian dilakukan di Laboratorium;
5. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan dan Departemen Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu dan masukan kepada penulis selama menjalani perkuliahan;
6. Teman-teman Lab. Riset Kualitas Air yang selalu sabar membantu, menghibur dan terus memberikan semangat dan bantuan kepada penulis;
7. Keluarga Besar Laboratorium Kualitas Air Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin;
8. Teman-teman Pengurus HMTL FT-UH dan HMS FT-UH Periode 2019/2020 yang telah kebersamai dan menemani selama periode kepengurusan;

9. Teman-teman sekumpulan anomali daya yang selalu memberi semangat, menjadi wadah diskusi rasa, dan menghibur dengan kekocakan alamiah;
10. Gala bunga matahari yang tiba-tiba mekar di taman, meski bicara dengan bahasa tumbuhan;
11. Warung-warung kopi di wilayah Makassar-Gowa yang selalu bisa berubah jadi ruang-ruang kelas; dan
12. Saudara-saudari se-PLASTIS 2018 (SIPIL & LINGKUNGAN 2017) yang telah sama-sama berproses dari awal till the end.

Serta kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan daging ayam sebagai salah satu bahan makanan bagi masyarakat cukup besar. Produksi perusahaan budidaya ayam pedaging di Indonesia tercatat sebanyak 78,652 juta ekor pada tahun 2019. Produksi budidaya ayam pedaging di Sulawesi Selatan sebanyak 490 ribu ekor (Badan Pusat Statistik, 2020).

Salah satu lini usaha yang berkaitan dengan produksi daging ayam adalah rumah pemotongan ayam. Pemotongan hewan adalah serangkaian kegiatan di rumah potong hewan yang meliputi penerimaan hewan, pengistirahatan, pemeriksaan kesehatan hewan sebelum dipotong, pemotongan/penyembelihan, pemeriksaan kesehatan jeroan dan karkas setelah hewan dipotong, dengan memperhatikan higiene dan sanitasi, kesejahteraan hewan, serta kehalalan bagi yang dipersyaratkan (PP No. 95 Thn 2012).

Air limbah rumah potong hewan mengandung larutan darah, protein, lemak dan padatan tersuspensi yang menyebabkan tingginya bahan organik dan nutrisi, tingginya variasi jenis dan residu yang terlarut ini akan memberikan efek mencemari sungai dan badan air (Aini, Sriasih, & Kisworo, 2017).

Penelitian yang dilakukan oleh Apriyanti (2018) menunjukkan data bahwa terdapat 31 usaha pemotongan yang menyatu dengan pemukiman warga dan dilakukan penelitian terhadap 25 unit usaha. Semua rumah pemotongan ayam tidak memiliki pengolahan air limbah. Air limbah langsung dialirkan ke selokan dan menyatu dengan air limbah domestik. Sebanyak 20 unit tidak memasang penyaring pada ujung pembuangan air limbah. Aspek pengelolaan limbah cair rumah pemotongan ayam tergolong sangat buruk karena tak tersedianya sarana pengolahan air limbah, tidak ada saluran khusus untuk air limbah, dan sebagian besar belum melakukan penyaringan air limbah sebelum dialirkan ke saluran pembuangan. Air limbah rumah pemotongan ayam diteliti dan menunjukkan hasil

bahwa rerata kandungan BOD sebanyak 3204,7 mg/L dan COD sebanyak 5969,6 mg/L (Apriyanti, 2018).

Metode konvensional yang umum digunakan pada pengolahan air limbah rumah potong hewan adalah pengolahan dengan proses biologis, koagulasi dan flokulasi, serta proses klarifikasi. Namun, pengolahan air limbah rumah potong ayam dengan metode konvensional mungkin tidak memadai karena toksisitas air limbah yang sudah diolah melebihi baku mutu dan pembuangannya tetap berbahaya. Air limbah rumah potong ayam umumnya mengandung polutan *non-biodegradable* dan sejumlah kecil polutan memerlukan pengolahan lebih lanjut selain proses biologis. Terdapat beberapa proses alternatif yang dapat digunakan yaitu, elektrokoagulasi, iradiasi berkas elektron, plasma dingin, dan proses oksidasi lanjut (Ng, et al., 2022).

Proses oksidasi lanjut dapat digunakan sebagai pilihan alternatif ataupun sebagai proses pelengkap untuk mengoptimalkan pengolahan air limbah rumah potong hewan guna meningkatkan biodegradabilitas dan menghilangkan polutan yang persisten. Penyisihan tertinggi dari proses oksidasi lanjut dapat dicapai saat proses oksidasi lanjut digunakan sebagai *pre-treatment* ataupun *post-treatment* dikombinasikan dengan metode lain seperti proses biologis. Proses oksidasi lanjut efektif karena kemampuan pengolahannya tidak hanya terbatas pada degradasi tapi hingga terjadi mineralisasi (Ng, et al., 2022).

Proses oksidasi lanjut telah diteliti secara luas untuk mengolah air minum dan efluen industri. Secara umum, proses oksidasi lanjut berdasar kepada produksi spesi oksidasi yang sangat reaktif di mana mampu mengurangi berbagai macam polutan organik (Aziz & Amr, 2019).

Proses ini berdasar kepada produksi oksidator kuat, terutama radikal hidroksil yang merupakan spesi oksidasi terkuat kedua, dapat mengoksidasi segala polutan organik secara nonselektif hingga terjadi mineralisasi (perubahan menjadi CO₂ dan air). Di antara berbagai macam proses oksidasi lanjut, teknologi fenton sangat menarik karena sederhana, efektivitas yang tinggi, rendah biaya, dan kurangnya toksisitas reagen fenton. Namun, masih ada beberapa tantangan dalam sistem fenton konvensional, yaitu penyimpanan dan distribusi H₂O₂ konsentrasi tinggi,

konsumsi katalis yang besar, serta produksi dan pembuangan *sludge* besi tambahan yang dihasilkan (He & Zhou, 2017).

Berbagai upaya pengembangan teknologi baru telah dilakukan untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut dengan tetap memanfaatkan efisiensi oksidasi yang kuat dari proses fenton. Proses elektro-fenton telah menjadi perkembangan baru dari proses fenton dan menimbulkan minat yang besar untuk menghilangkan kontaminan organik. Dibandingkan dengan proses fenton konvensional, proses elektro-fenton menghindari pengangkutan dan penyimpanan H_2O_2 eksternal dengan cara menghasilkan hidrogen peroksida (H_2O_2) secara in situ. Oleh karena itu merupakan teknologi yang ramah lingkungan karena penggunaan bahan kimia telah berkurang (He & Zhou, 2017).

Hidrogen peroksida dihasilkan melalui reduksi dua elektron dari oksigen dalam sel elektrokimia pada kondisi asam sekitar pH 3. Reaksi fenton dapat terjadi jika ditambahkan ion ferro (atau ferri) dari luar. Reaksi fenton menghasilkan ion ferri yang dapat direduksi pada katoda kembali menjadi ion ferro. Dengan begitu, dalam proses elektro-fenton, reagen fenton dihasilkan secara kontinu dan terkontrol dalam reaktor elektrokimia. Hal ini mengarah pada pembentukan radikal hidroksil secara terus-menerus tanpa akumulasi reagen fenton sehingga menghindari reaksi yang sia-sia. Laju produksi reagen fenton dapat dikontrol dengan menerapkan arus yang sesuai (Martínez-Huitle, Rodrigo, & Scialdone, 2018).

Penelitian oleh Priyadi dan Ratni (2019) menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan COD dengan metode elektro-fenton sebesar 94,1% dengan konsentrasi awal COD sebesar 2890,31mg/L. Penelitian lain oleh Afolabi (2020) menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan BOD dan COD dengan elektro-fenton masing-masing bernilai 88,96% dan 93,16%.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik sampel air limbah rumah pemotongan ayam yang digunakan dalam penelitian?
2. Bagaimana pengaruh kuat arus dan waktu kontak terhadap efisiensi pengolahan pengolahan air limbah rumah pemotongan ayam menggunakan metode elektro-fenton?
3. Bagaimana efisiensi penyisihan parameter-parameter pada air limbah rumah pemotongan ayam menggunakan metode elektro-fenton?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan yang dijelaskan sebagai berikut.

1. Untuk menganalisis karakteristik sampel air limbah rumah pemotongan ayam yang digunakan dalam penelitian.
2. Untuk menganalisis pengaruh kuat arus dan waktu kontak terhadap efisiensi pengolahan pengolahan air limbah rumah pemotongan ayam menggunakan metode elektro-fenton
3. Untuk menganalisis efisiensi penyisihan parameter-parameter pada air limbah rumah pemotongan ayam menggunakan metode elektro-fenton.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat-manfaat yang dijelaskan sebagai berikut.

1. Manfaat bagi Departemen Teknik Lingkungan
Sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan riset pengolahan air limbah menggunakan elektro-fenton.
2. Manfaat bagi masyarakat
Memberikan pengetahuan kepada masyarakat terkait pengolahan air limbah rumah pemotongan ayam menggunakan metode elektro-fenton.

3. Manfaat bagi peneliti

Sebagai kontribusi dalam melaksanakan penelitian sebagai bagian dari kewajiban Tri Dharma Perguruan Tinggi serta merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi sarjana di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun batasan-batasan atau ruang lingkup dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental skala laboratorium.
2. Rancangan reaktor pengolahan air limbah rumah pemotongan ayam menggunakan metode elektro-fenton dengan sistem *batch*.
3. Parameter yang diteliti adalah BOD, COD, TSS, Minyak dan Lemak, dan Amonia.
4. Variasi yang digunakan adalah beberapa konfigurasi kuat arus dan waktu kontak.
5. Sampel air limbah rumah pemotongan ayam berasal dari usaha pemotongan ayam di daerah Antang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Air Limbah Rumah Potong Hewan

Air limbah adalah air yang berasal dari suatu proses dalam suatu kegiatan (PP No. 22 2021). Air limbah adalah sisa dari suatu usaha dan/atau kegiatan yang bersifat cair (Permen LHK No. 5 2014). Dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2015, terdapat berbagai macam usaha atau kegiatan yang baku mutu air limbahnya diatur dalam peraturan tersebut. Salah satunya adalah usaha atau kegiatan rumah pemotongan hewan. Air limbah rumah potong hewan (RPH) mengandung larutan darah, protein, lemak dan padatan tersuspensi yang menyebabkan tingginya bahan organik dan nutrisi, tingginya variasi jenis dan residu yang terlarut ini akan memberikan efek mencemari sungai dan badan air (Aini, Sriasih, & Kisworo, 2017).

Rumah potong hewan adalah suatu bangunan atau kompleks bangunan dengan desain dan konstruksi khusus yang memenuhi persyaratan teknis dan higienis tertentu serta digunakan sebagai tempat pemotongan hewan yang meliputi pemotongan, pembersihan lantai tempat pemotongan, pembersihan kandang penampungan, pembersihan kandang isolasi, dan/atau pembersihan isi perut dan air sisa perendaman (Permen LHK No. 5 2014). Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 95 Tahun 2012, hewan potong adalah hewan yang dipelihara atau dibudidayakan untuk dimanfaatkan dagingnya sebagai konsumsi manusia. Salah satunya adalah unggas potong.

Karakteristik parameter air limbah rumah potong ayam (RPA) memiliki kandungan COD dan TSS yang cukup tinggi. Air limbah RPA memiliki nilai COD sebesar 656 mg/L dan TSS sebesar 247 mg/L (Hasanah & Sugito, 2017). Penelitian lain pada air limbah rumah pemotongan ayam menunjukkan hasil bahwa rerata kandungan BOD sebanyak 3204,7 mg/L dan COD sebanyak 5969,6 mg/L (Apriyanti, 2018).

Karakteristik air limbah RPA sesuai parameter dalam baku mutu diteliti oleh Aini et al pada tahun 2017 dan menunjukkan hasil yang relatif tinggi. Karakteristik tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik air limbah rumah potong ayam

Parameter	Kadar
BOD	4042,6 mg/L
COD	4964,6 mg/L
TSS	1810,6 mg/L
Minyak dan Lemak	110,8 mg/L
NH ₃ -N	266,6 mg/L
pH	6,7

Sumber: Aini, et al (2017)

2.2 Baku Mutu Air Limbah Rumah Potong Hewan

Baku mutu air limbah adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemaran dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau dilepas ke dalam sumber air dari suatu usaha dan/atau kegiatan. Baku mutu air limbah rumah pemotongan hewan diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

Tabel 2. Baku mutu air limbah rumah potong hewan

Parameter	Kadar Tertinggi
BOD	100 mg/L
COD	200 mg/L
TSS	100 mg/L
Minyak dan Lemak	15 mg/L
NH ₃ -N	25 mg/L
pH	6-9

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI No. 5 Tahun 2014

2.3 Pengolahan Air Limbah

Pengolahan air limbah merupakan proses penyisihan kontaminan dari air limbah baik berupa limpasan maupun domestik. Hal ini meliputi proses fisika, kimia, dan biologi untuk menghilangkan kontaminan fisik, kimia dan biologi (Khopar, 2004). Proses pengolahan air limbah ini bertujuan agar air limbah yang dihasilkan tidak mencemari lingkungan setidaknya pada tingkatan yang tetap menjaga kemampuan *self recovery* lingkungan. Metcalf and Eddy (2008) menyebutkan mengenai tingkatan dalam pengolahan air limbah sebagai berikut.

1. Preliminer

Penyisihan konstituen air limbah seperti kain, kayu, bahan terapung, pasir, dan lemak yang dapat memicu perbaikan atau masalah operasi pada operasi, proses pengolahan, dan sistem tambahan.

2. Primer

Penyisihan bagian dari padatan tersuspensi dan bahan organik dari air limbah.

3. Primer lanjutan

Penyisihan yang ditingkatkan untuk padatan tersuspensi dan bahan organik dari air limbah. Biasanya dapat dicapai dengan penambahan bahan kimia atau filtrasi.

4. Sekunder

Penyisihan bahan organik yang dapat diurai berbentuk larutan maupun suspensi dan padatan tersuspensi. Proses disinfeksi juga termasuk dalam pengolahan sekunder konvensional.

5. Sekunder dengan penyisihan unsur hara

Penyisihan bahan organik yang terurai, padatan tersuspensi, dan unsur hara seperti nitrogen, fosfat, atau keduanya nitrogen dan fosfat.

6. Tersier

Penyisihan sisa padatan tersuspensi setelah pengolahan sekunder, biasanya dengan menggunakan filtrasi media granula atau lapisan mikro. Disinfeksi juga termasuk bagian dari pengolahan tersier. Penyisihan unsur hara sering termasuk dalam pengolahan tersier.

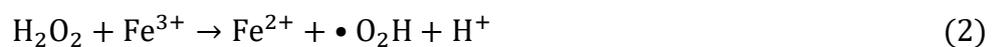
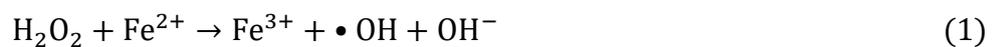
7. Pengolahan tingkat lanjut

Penyisihan materi tersuspensi dan terlarut yang tersisa setelah pengolahan biologi biasa yang dilakukan ketika dibutuhkan untuk keperluan penggunaan air kembali.

2.4 Proses Fenton

Reaksi fenton berawal dari penemuan reagen fenton oleh Henry J. H. Fenton. Pada tahun 1890-an, Henry J. H. Fenton mengobservasi peningkatan daya pengoksidasi dari hidrogen peroksida (H_2O_2) oleh kehadiran ion ferro (Fe^{2+}), yang kemudian disebut sebagai reagen fenton. Empat dekade setelah itu, Haber dan Wise menemukan kinetika dan mekanisme reaksi ini, membuktikan alasan peningkatan efisiensi oksidasi dapat terjadi karena adanya produksi radikal hidroksil oleh reagen fenton. (Martínez-Huitle, Rodrigo, & Scialdone, 2018).

Dasar dari proses fenton adalah reaksi fenton di mana radikal hidroksil dihasilkan pada tekanan atmosfer dan suhu ruangan. Hidrogen peroksida dan ion ferro adalah reagen fenton. Reaksi fenton terjadi ketika dua reagen ini dimasukkan ke larutan pada suasana asam. Persamaan 1 dan 2 merupakan reaksi utama yang terjadi saat proses oksidasi fenton. Ion ferro menginisiasi dan mempercepat dekomposisi hidrogen peroksida kemudian menghasilkan radikal hidroksil (pers. 1). Sementara itu, ion ferri yang dihasilkan dapat dikurangi oleh kelebihan hidrogen peroksida (pers. 2), memungkinkan siklus mekanisme regenerasi ion ferri yang efektif. Pada reaksi Persamaan 2, spesi radikal lain juga dihasilkan, yaitu radikal hidroperoksil ($\bullet\text{HO}_2$). Radikal hidroperoksil kurang reaktif jika dibanding dengan radikal hidroksil karena potensial redoksnya lebih rendah. Reaksi persamaan (pers 2) biasa disebut dengan reaksi fenton-*like*. (Cai, et al., 2021)

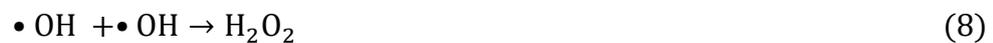


Persamaan 3 sampai 5 menggambarkan reaksi yang menghambat produksi radikal hidroksil dan regenerasi ion ferro. Ion ferro yang berlebihan dapat memusnahkan (*scavenge*) spesi radikal yang diproduksi (pers. 3 dan 4) dan $\bullet\text{HO}_2$

dapat bereaksi dengan ion ferri sebagai tambahan regenerasi ion ferro (pers. 5). Perlu dicatat bahwa reaksi di atas, ion ferro berperan sebagai katalis dan H₂O₂ digunakan secara kontinyu bagi produksi radikal hidroksil.



Persamaan 6 sampai 8 merangkum reaksi pemusnahan (*scavenging*) radikal yang dapat terjadi selama proses fenton selain dari reaksi pemusnahan yang dapat terjadi akibat ion besi.



Keseluruhan proses fenton melibatkan mekanisme reaksi yang kompleks. Radikal hidroksil dihasilkan saat inisiasi rantai reaksi (pers 1) sementara mereka dapat dimusnahkan (*scavenged*) oleh ion ferro (pers 3), hidrogen peroksida (pers 6), radikal hidroperoksil (pers 7), dan bahkan oleh dirinya sendiri (pers 8). Hidrogen peroksida dapat menjadi inisiator untuk produksi radikal, tetapi juga dapat menjadi inhibitor untuk proses oksidasi setelahnya. Ion ferro dapat mempercepat konsumsi hidrogen peroksida, tetapi juga memusnahkan radikal yang dihasilkan. Radikal hidroksil yang dihasilkan akan menyerang molekul organik melalui abstraksi proton dan menghasilkan radikal organik yang sangat reaktif yang dapat dioksidasi selanjutnya (pers 9) (Cai, et al., 2021).



2.5 Elektro-Fenton

Elektro-fenton merupakan perkembangan dari reaksi fenton. Elektro-fenton adalah proses oksidasi lanjut dengan memanfaatkan radikal hidroksil dan reagen fenton secara elektrokimia (Martínez-Huitle, Rodrigo, & Scialdone, 2018).

Perbedaan utama antara proses fenton konvensional dengan elektro-fenton adalah elektrogenesis H_2O_2 secara in-situ di dalam reaktor elektrokimia. Elektrogenesis H_2O_2 mengurangi biaya dan kelemahan proses fenton konvensional yang terkait dengan produksi, transportasi, penyimpanan, dan penanganan H_2O_2 (Zhou, Oturan, & Sirés, 2018).

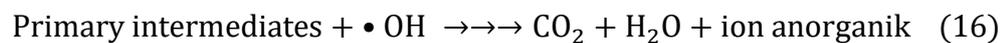
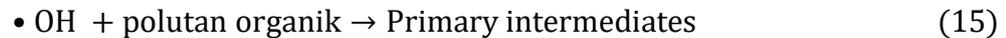
Penemuan proses elektro-fenton terjadi pada tahun 1970-an dalam bidang elektrosintesis organik, ketika beberapa studi awal melaporkan pembentukan trans oksidatif benzena dan molekul lain dengan reagen Fenton yang dielektrogenesis. Pada saat itu, katoda merkuri adalah bahan pilihan. Kemudian, pada pertengahan 1970-an, katoda karbon diperkenalkan untuk mengatasi keterbatasan karena toksisitas merkuri. Namun, penggunaan pertama mereka dalam sistem elektro-fenton untuk pengolahan air limbah tidak muncul sampai pertengahan 1980-an (Zhou, Oturan, & Sirés, 2018).

Dalam proses elektro-fenton, H_2O_2 secara kontinu dihasilkan dalam sel elektrokimia pada suasana asam (biasanya pada $\text{pH} \sim 3$) dari *2-electron oxygen reduction* (reduksi dua elektron gas oksigen) yang langsung diinjeksikan sebagai gas murni atau udara yang digelembungkan (aerasi) melalui reaksi (10). Transformasi ini lebih mudah daripada *4-electron reduction* (reduksi empat elektron) menjadi air dari reaksi (11). Beberapa reaksi parasit/pemusnahan pada permukaan katoda memperlambat akumulasi H_2O_2 dalam larutan, terutama reduksi menjadi air dan proton menjadi gas hidrogen dari reaksi (12) dan (13). Di sisi lain, disproporsionasi H_2O_2 dalam jumlah besar oleh reaksi (14) juga dapat terjadi pada tingkat yang jauh lebih rendah (Zhou, Oturan, & Sirés, 2018).



Senyawa organik pada air limbah disisihkan oleh radikal hidroksil yang merupakan oksidator kuat. Radikal hidroksil mampu mengoksidasi polutan organik

secara nonselektif menjadi molekul organik yang lebih kecil bahkan hingga terjadi mineralisasi (perubahan ke CO₂ dan air). Reaksi tersebut dapat dilihat pada persamaan (15) dan (16). Persamaan (17) adalah contoh reaksi mineralisasi asam asetat oleh radikal hidroksil.



Degradasi molekul organik oleh radikal hidroksil terjadi dengan beberapa cara. Radikal hidroksil dengan cepat bereaksi dengan molekul organik dengan mengambil atom hidrogen dari ikatan C-H, N-H, serta O-H, berikatan dengan ikatan tak jenuh seperti ikatan C=C dan cincin aromatik (Ar). Persamaan (18-22) Mekanisme degradasi molekul organik oleh radikal hidroksil dapat dilihat pada persamaan (18-22). Selain itu, ion ferro (Fe²⁺) dan ferri (Fe³⁺) yang terdapat pada sistem bisa memicu koagulasi sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan molekul organik dalam sistem (He & Zhou, 2017).



Amonia pada air limbah didegradasi oleh radikal hidroksil dengan cara mengoksidasi amonia menjadi radikal amino ($\bullet\text{NH}_2$). Radikal amino dengan cepat bereaksi dengan hidrogen peroksida menjadi $\bullet\text{NHOH}$. Kemudian, $\bullet\text{NHOH}$ bereaksi dengan HO_2^- menghasilkan NH_2O_2^- yang kemudian terdisosiasi menjadi NO_2^- . Nitrit (NO_2^-) dapat dioksidasi menjadi nitrat (NO_3^-) oleh radikal hidroksil dan hidrogen peroksida. Persamaan (23-27) menunjukkan rantai reaksi degradasi amonia (Huang, Li, Dong, Liu, & Hou, 2008).





Dengan waktu pengolahan yang singkat, proses oksidasi lanjut secara elektrokimia dapat mengubah bahan organik refraktori menjadi senyawa yang *biodegradable* yang kemudian dapat diolah secara biologi. Waktu pengolahan yang singkat dapat menghemat energi secara signifikan. Strategi pengolahan sebaliknya juga dapat diterapkan. Bagian air limbah yang *biodegradable* dapat diolah terlebih dahulu dengan proses biologis, kemudian polutan refraktori yang tersisa dapat didegradasi oleh proses oksidasi lanjut sebagai langkah selanjutnya. Opsi ini juga dapat digunakan pada air limbah dengan polutan organik awal yang tinggi (Garcia-Rodriguez, Mousset, Olvera-Vargas, & Lefebvre, 2020).

1. Kelebihan dan kekurangan

Proses fenton konvensional memiliki kelebihan dalam pengolahan air limbah, yaitu:

- a. Pengoperasian yang sederhana dan fleksibel dengan implementasi yang mudah di industri;
- b. Bahan kimia yang digunakan mudah untuk ditangani; dan
- c. Tidak memerlukan input energi.

Meskipun begitu, proses fenton konvensional juga memiliki kekurangan dalam penerapannya sebagai metode pengolahan air limbah. Kekurangannya yaitu:

- a. Biaya yang relatif lebih tinggi dan risiko terkait penyimpanan, transportasi, dan penanganan H_2O_2 ;
- b. Kuantitas bahan kimia yang besar untuk mengasamkan efluen hingga mencapai nilai pH 2-4 dan menetralkan *treated water* sebelum dibuang;
- c. Akumulasi *sludge* besi yang butuh penanganan pada akhir pengolahan; dan

- d. Mineralisasi secara keseluruhan tidak layak karena pembentukan Fe(III) kompleks dengan asam alkanolat yang tidak dapat dihancurkan dengan radikal hidroksil.

Salah satu bentuk pengembangan dari proses fenton konvensional adalah elektro-fenton. Elektro-fenton memanfaatkan sel elektrokimia agar proses fenton dapat terjadi dalam reaktor. Elektro-fenton memiliki kelebihan dibandingkan proses fenton konvensional dalam pengolahan air, yaitu:

- a. Hidrogen peroksida diproduksi secara in-situ yang konsentrasi dan laju akumulasinya dapat dimodulasi;
- b. Kontrol terhadap kinetika degradasi;
- c. Laju degradasi polutan organik yang tinggi karena regenerasi ion ferro terjadi secara kontinyu dari reduksi ion ferri di katoda, seiring minimalisasi produksi *sludge*; dan
- d. Kelayakan mineralisasi total secara relatif rendah biaya ketika parameter pengoperasian dioptimalkan.

2.6 Faktor yang Berpengaruh

Laju degradasi senyawa organik air limbah dalam proses elektro-fenton bergantung pada faktor-faktor atau parameter pengoperasian seperti suhu, pH, kuat arus, elektrolit, dll. Faktor-faktor tersebut dioptimalisasi agar efisiensi dan biaya pengoperasian yang rendah dapat tercapai. Faktor tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. Konsentrasi Fe^{2+}/Fe^{3+}

Efisiensi dan laju degradasi proses elektro-fenton meningkat dalam konsentrasi besi yang tinggi di mana Fe^{2+} menaikkan produksi radikal hidroksil. Studi terdahulu menunjukkan bahwa Fe^{2+} meningkatkan kemampuan oksidasi H_2O_2 untuk menghancurkan molekul-molekul besar. Selain itu, konsentrasi besi yang tinggi meningkatkan kekuatan ion sehingga arus dalam sistem elektro-fenton dapat lebih efisien. Namun konsentrasi Fe^{2+} atau Fe^{3+} yang tinggi dapat membentuk presipitasi besi pada pH tinggi dan menurunkan efisiensi arus (He & Zhou, 2017).

Konsentrasi katalis besi yang optimal untuk elektro-fenton homogen (*undivided*) relatif rendah, biasanya pada kisaran 0,50 mM Fe²⁺ dengan GDE (*gas diffusion electrode*) sebagai katoda dan 0,10-0,20 mM Fe²⁺ dengan katoda 3D seperti *carbon felt* (Zhou, Oturan, & Sirés, 2018).

2. Konsentrasi hidrogen peroksida (H₂O₂)

Konsentrasi hidrogen peroksida (H₂O₂) memiliki peran yang besar karena berpengaruh langsung terhadap jumlah produksi puncak teoritis dari radikal hidroksil (•OH). Peningkatan dosis hidrogen peroksida (H₂O₂) umumnya meningkatkan efisiensi secara keseluruhan karena bertambahnya radikal hidroksil (•OH) (He & Zhou, 2017).

3. Konsentrasi awal polutan

Penentuan dosis reagen fenton harus disesuaikan dengan konsentrasi awal polutan. Umumnya, konsentrasi awal polutan yang rendah lebih diutamakan dan pengenceran merupakan langkah yang esensial untuk memastikan efisiensi pengurangan yang baik dalam sistem elektro-fenton. Penelitian terdahulu mengindikasikan bahwa konsentrasi awal zat pewarna yang tinggi berkontribusi pada produksi intermediat reaktif. Intermediat reaktif tersebut mengurangi jumlah radikal hidroksil sehingga efisiensi secara keseluruhan dapat berkurang. Ramirez-Pereda (2020) melakukan penelitian pengolahan air limbah secara elektro-fenton dengan menggunakan efluen asli dari pabrik tekstil (*real textile effluent*). Semua sampel disaring dan diencerkan hingga konsentrasi yang diinginkan sebagai bagian dari *pre-treatment*. Konsentrasi awal COD efluen sebesar 6600 mg/L dan diencerkan hingga 50, 100, 200, 250, dan 300 mg/L. Xu (2020) menyatakan bahwa jika konsentrasi awal minyak dan lemak sangat tinggi, untuk memenuhi aturan baku mutu, air limbah harus diencerkan terlebih dahulu dan kemudian diolah.

Bagaimanapun, dalam pengolahan air limbah industri skala besar, pengenceran menghasilkan air limbah dengan jumlah yang besar dan secara substansial meningkatkan biaya pengolahan. Polutan harus diencerkan dengan

baik untuk menyeimbangkan efektivitas pengolahan dan biaya (He & Zhou, 2017).

Air limbah dengan kandungan bahan organik yang tinggi merupakan kandidat ideal pada pengolahan dengan proses oksidasi lanjut yang berbasis radikal hidroksil. Konsentrasi bahan organik yang tinggi menghindari keterbatasan transfer massa yang umumnya berkaitan dengan metode elektrokimia. Namun, kandungan bahan organik sangat tinggi memerlukan waktu operasi/reaksi yang lebih lama dan konsumsi energi yang lebih tinggi, yang berdampak negatif terhadap kelayakan pengolahan (Garcia-Rodriguez, Mousset, Olvera-Vargas, & Lefebvre, 2020).

Meskipun mungkin efisiensi pengolahan rendah dalam konsentrasi tinggi, jumlah pengurangan massa polutan mungkin masih tinggi dalam kondisi konsentrasi awal polutan tinggi. Bagaimanapun, konsentrasi awal mungkin tidak selalu berdampak signifikan. Pada penelitian yang lain, konsentrasi awal herbisida tidak memengaruhi pengurangan atrazin dan metolaklor. Kemungkinan alasannya adalah performa oksidasi dibatasi oleh laju produksi dari radikal hidroksil dan reaksi sampingnya dengan *radical scavenger*. Konstanta laju reaksi antara herbisida dan radikal hidroksil mendekati batas *diffusion-controlled* dan ketersediaan awal herbisida tidak memberikan dampak yang besar terhadap laju oksidasi (Cai, et al., 2021).

4. Derajat keasaman

Nilai derajat keasaman merupakan salah satu faktor yang memengaruhi performa sistem elektro-fenton. Suasana asam diutamakan sebagai pH dasar. Nilai pH optimum berada pada kisaran tiga. Pada penelitian lain, dilaporkan bahwa pH dua merupakan nilai optimal. Pada beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses fenton tidak kuat dalam mengurangi kontaminan pada pH tinggi karena oksidasi, hidrolisis, dan presipitasi ion besi di mana spesi besi mungkin hadir dalam bentuk Fe^{3+} di tingkat *nanomolar* pada pH 4,4. Juga, hidrogen peroksida (H_2O_2) tidak menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) pada

suasana basa yang disebabkan karena dekomposisi hidrogen peroksida (H_2O_2) oleh OH^- (pers 18) (He & Zhou, 2017).



Pada suasana asam, banyak proton yang tersedia yang dapat meningkatkan konversi oksigen terlarut menjadi hidrogen peroksida (H_2O_2). Sedlak dan Andren (1991) menjelaskan bahwa produksi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang tinggi pada pH kisaran 2-4 terjadi karena reaksi yang melibatkan organometalik kompleks di mana hidrogen peroksida (H_2O_2) dihasilkan (He & Zhou, 2017).

Bagaimanapun, pH yang terlalu rendah juga memengaruhi performa sistem karena beberapa alasan. Pertama, pada pH rendah, evolusi hidrogen juga meningkat, di mana mengurangi jumlah proton yang tersedia untuk memproduksi hidrogen peroksida (H_2O_2) dan meningkatkan dekomposisi dari hidrogen peroksida (H_2O_2). Kedua, spesi besi kompleks ($\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$) hadir pada suasana pH rendah di mana bereaksi lambat dengan hidrogen peroksida (H_2O_2) dan mengurangi laju produksi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) (He & Zhou, 2017).

Nilai pH larutan yang optimal telah diketahui yaitu berada pada nilai 2,8. Walau begitu, proses elektro-fenton dapat beroperasi dengan baik pada kisaran pH 2,5 - 3,5. Nilai pH lebih tinggi menimbulkan kehilangan katalis oleh presipitasi besi ferri sementara nilai pH rendah menyebabkan pembentukan ion peroksonium (H_3O_2^+) dari protonasi H_2O_2 . Spesi ini bersifat elektrofilik dan kurang reaktif terhadap Fe^{2+} (Martínez-Huitle, Rodrigo, & Scialdone, 2018).

5. Elektrolit

Elektrolit dibutuhkan untuk meningkatkan konduktivitas larutan agar reaksi elektro-fenton efisien. Berbagai tipe elektrolit telah digunakan dalam sistem elektro-fenton. Natrium sulfat merupakan elektrolit yang umum digunakan dalam proses elektro-fenton karena kekuatan ionik yang tinggi dan

interferensi yang rendah dalam larutan. Elektrolit lain seperti KCl, NaCl, NaNO₃, dan NaClO₄, juga dapat digunakan (He & Zhou, 2017).

Ketika garam Cl digunakan sebagai elektrolit, kemungkinan kehadiran ion Cl⁻ dapat meningkatkan efisiensi degradasi dan memperpendek waktu reaksi dengan memproduksi klorin dan HClO, di mana juga merupakan oksidator yang kuat. Walaupun spesi klorin secara elektrogenesis seperti HClO, ClO⁻, Cl•, dan Cl₂, dapat berpartisipasi dalam proses oksidasi dan meningkatkan efisiensi elektro-fenton, perlu dicatat bahwa campuran seperti itu diketahui dapat membentuk sejumlah spesi organoklorin sebagai senyawa intermediet. Pembentukan senyawa yang tidak diinginkan disebabkan terutama oleh kehadiran OCl⁻ dan hanya dapat dihindari jika senyawa organik termineralisasi sepenuhnya (He & Zhou, 2017).

Konsentrasi elektrolit juga memegang peran penting dalam efisiensi elektro-fenton. Elektrolit dengan konsentrasi rendah mungkin tidak dapat menyediakan konduktivitas yang cukup sementara elektrolit dengan konsentrasi tinggi dapat menyebabkan korosi pada elektroda dan memperpendek reaktivitas dari spesi fenton. Peneliti melaporkan bahwa kerapatan arus listrik yang tinggi ditemukan pada larutan dengan konsentrasi Na₂SO₄ yang tinggi, di mana berkorespondensi dengan peningkatan laju produksi H₂O₂, meningkatkan efisiensi, dan mengurangi konsumsi energi (He & Zhou, 2017).

Bagaimanapun, korelasi antara elektrolit dan efisiensi elektro-fenton tidak selalu jelas. Pada satu penelitian ditemukan bahwa peningkatan Na₂SO₄ tidak memengaruhi produksi H₂O₂ dalam reaksi. Pada penelitian yang lain, pengurangan formaldehida tidak dipengaruhi oleh Na₂SO₄ pada konsentrasi 0-0,5M. Zat kimia lain dalam air limbah mungkin bisa menjadi elektrolit pendukung untuk produksi in situ H₂O₂ (He & Zhou, 2017).

6. Laju penyebaran oksigen

Laju penyebaran oksigen merupakan faktor utama yang membatasi efisiensi elektro-fenton. Laju penyebaran oksigen yang besar dapat

meningkatkan kandungan oksigen terlarut dan laju perpindahan massa dalam sistem yang kemudian meningkatkan produksi H_2O_2 . Wang et al melaporkan bahwa peningkatan laju penyebaran oksigen dari $50 \text{ cm}^3/\text{menit}$ ke $250 \text{ cm}^3/\text{menit}$ meningkatkan pengurangan COD sekitar 30% di bawah kerapatan arus konstan $3,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (He & Zhou, 2017).

Perlu dicatat bahwa jumlah produksi H_2O_2 tidak meningkat secara linear dengan laju aliran oksigen. Setelah oksigen terlarut jenuh, peningkatan lanjutan dari penyebaran oksigen tidak meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut dalam sistem dan produksi H_2O_2 cenderung menjadi stabil. Manfaat lebih lanjut dari kelebihan peningkatan laju penyebaran oksigen terbatas. Berdasarkan studi dari Wang et al, efisiensi pengurangan warna dari air limbah tekstil meningkat dari 55,3% menjadi 70% ketika laju penyebaran oksigen meningkat dari $100 \text{ cm}^3/\text{menit}$ menjadi $300 \text{ cm}^3/\text{menit}$ tapi menjadi stabil di angka 70,6% di bawah kondisi laju penyebaran oksigen $400 \text{ cm}^3/\text{menit}$ (He & Zhou, 2017).

7. Mode *feeding*

Mode *feeding* atau mode pemberian reagen fenton memiliki korelasi yang kuat dengan efisiensi pengurangan dan biaya operasional dari proses elektro-fenton. Pemberian H_2O_2 sebelum atau saat reaksi memengaruhi efisiensi pengurangan COD (He & Zhou, 2017).

8. Kerapatan arus listrik

Performa sistem elektro-fenton sangat dipengaruhi oleh kerapatan arus listrik yang merupakan penggerak bagi transfer elektron. Kerapatan arus listrik sejalan dengan laju produksi H_2O_2 . Kerapatan arus yang tinggi memperbesar jumlah produksi radikal hidroksil dan fisisorpsi pada elektroda. Kerapatan arus listrik yang tinggi juga menyebabkan produksi Fe^{2+} lebih cepat dan meningkatkan efisiensi reaksi rantai fenton. Seperti yang dilaporkan oleh Zhang et al, efisiensi pengurangan COD meningkat hampir 40% ketika arus dinaikkan dari 100 mA menjadi 250 mA. Demikian pula peningkatan 20,9% efisiensi mineralisasi TOC ditemukan ketika kerapatan arus listrik dinaikkan

dari 10 mA/cm² menjadi 24 mA/cm². Laju degradasi yang ditingkatkan pada kerapatan arus yang tinggi mengurangi waktu reaksi. Namun, perlu dicatat bahwa keuntungan penghematan waktu reaksi menjadi kurang signifikan jika kerapatan arus listrik yang digunakan terlalu tinggi (He & Zhou, 2017).

Efisiensi arus mungkin menurun di bawah kerapatan arus yang tinggi karena kerapatan arus listrik yang tinggi juga mempercepat terjadinya reaksi samping (*side reaction*), seperti *anodic oxygen discharge* (persamaan 29), *cathodic hydrogen evolution* (persamaan 30), dan reaksi parasit radikal hidroksil (persamaan 31). Penelitian pada pengolahan lindi menunjukkan bahwa efisiensi pengurangan COD bernilai 89,2% pada 250 mA, namun berkurang menjadi 79,3% pada 300 mA. Laju reaksi elektro-fenton mencapai puncaknya saat kerapatan arus listrik bernilai 28,5 mA/cm². Tidak ada peningkatan lebih lanjut yang diamati dengan peningkatan kerapatan arus karena kemungkinan reaksi antara senyawa organik dengan radikal hidroksil yang mengurangi jumlah oksidator (He & Zhou, 2017).



Pada sel/reaktor dengan dua elektroda, kuat arus dapat ditingkatkan hingga nilai maksimum di mana tidak ada mineralisasi yang lebih tinggi yang dicapai. Kepadatan arus yang tinggi mampu sedikit mempercepat proses degradasi. Namun, kepadatan arus yang tinggi menurunkan efisiensi arus dan meningkatkan konsumsi energi karena terjadi peningkatan yang besar dari evolusi O₂ dan/atau H₂ dan reaksi parasit oksidator. Oleh karena itu, kerapatan arus yang optimal harus dipilih berdasarkan keseimbangan antara waktu operasi/reaksi, efisiensi arus, dan konsumsi energi (Zhou, Oturan, & Sirés, 2018).

9. Suhu pengoperasian

Suhu dari sebuah sistem reaksi merupakan parameter yang krusial karena berkorelasi dengan laju reaksi secara signifikan. Peningkatan suhu pengoperasian mungkin mempercepat laju reaksi antara H_2O_2 dengan Fe^{2+} yang kemudian meningkatkan produksi radikal hidroksil dan degradasi kontaminan. Suhu kurang dari $18,3^\circ\text{C}$ dapat memperlambat laju awal reaksi dan berdampak negatif terhadap laju reaksi dan efisiensi pengurangan. Pengaruh lain dari temperatur terhadap efisiensi elektro-fenton mungkin dapat dijelaskan oleh pengurangan oksigen terlarut dalam air dan tingginya laju dekomposisi hidrogen peroksida menjadi spesi tak aktif di kondisi temperatur tinggi. Tiap kenaikan suhu sebesar 10°C akan mempercepat dekomposisi hidrogen peroksida sebanyak 2,3 kali dan suhu lebih dari 50°C berkontribusi terhadap destabilisasi flok dan secara signifikan mengurangi efisiensi pengurangan COD (He & Zhou, 2017).

Perlu dicatat bahwa pengaruh suhu kurang signifikan dibanding faktor-faktor lain dan suhu ruang sering digunakan di banyak sistem elektro-fenton dengan efisiensi yang baik. Jika suhu lebih dari 40°C yang mungkin akan terjadi selama reaksi eksotermik, pendinginan direkomendasikan untuk memperlambat dekomposisi hidrogen peroksida (He & Zhou, 2017).

10. Material elektroda

Langkah fundamental dalam proses elektro-fenton adalah memilih bahan elektroda. Material anoda yang layak dapat mencegah potensi penurunan kondisi elektroda dan menghasilkan radikal hidroksil secara efisien. Platina ampuh untuk digunakan sebagai anoda dalam proses elektrokimia karena konduktivitasnya yang sangat baik dan stabil. Namun, efektivitas biayanya tidak bagus karena harganya yang mahal. Untuk mengatasi masalah ini, anoda terplatinisasi, yang merupakan teknik pelapisan metal dengan platinum dalam jumlah tertentu, telah digunakan dalam sejumlah proses elektro-fenton bisa mencapai hasil yang sebanding dengan anoda platina (He & Zhou, 2017).

Boron-doped diamond (BDD) merupakan bahan elektroda yang cocok untuk penggunaan elektrokimia. BDD memiliki sensitivitas yang lebih tinggi

dan batas deteksi yang lebih rendah karena *potential window* yang lebar dan *background currents* yang rendah dalam larutan. Selama bertahun-tahun, BDD telah digunakan sebagai anoda maupun katoda. Dibandingkan dengan elektroda platina, BDD membantu menghasilkan jumlah radikal hidroksil dan yang jauh lebih besar dan dapat menghilangkan senyawa tak jenuh dan aromatik sepenuhnya. Tipe anoda lain yang digunakan di proses elektro-fenton, yaitu DSA (batang titanium dilapisi dengan $\text{RuO}_2/\text{IrO}_2$), karbon *felt*, grafit, dan karbon *nanotube* (He & Zhou, 2017).

Material katoda yang baik dapat meningkatkan efisiensi elektro-fenton secara langsung dengan cara meningkatkan produktivitas hidrogen peroksida. Oksigen terlarut dapat berubah menjadi H_2O melalui *4-electron oxygen reduction reaction* (ORR) atau H_2O_2 melalui *2-electron oxygen reduction reaction*. Aktivitas reaksi reduksi oksigen (ORR) bergantung pada material katoda. Katoda yang sesuai dapat mencegah 4-elektron ORR untuk memaksimalkan produksi hidrogen peroksida (H_2O_2) dan efisiensi elektro-fenton. Jumlah pori dan struktur permukaan bahan katoda memengaruhi laju transfer massa dan luas permukaan reaksi elektrokimia bagi produksi hidrogen peroksida (He & Zhou, 2017).

Katoda berbahan dasar karbon umum digunakan dalam sistem elektro-fenton karena sifat elektrokimianya yang cocok untuk reduksi oksigen terlarut, aktivitas katalitik yang rendah untuk dekomposisi H_2O_2 , dan *overpotential* yang tinggi bagi evolusi hidrogen. Katoda berbahan dasar karbon yang pernah digunakan untuk produksi H_2O_2 , yaitu karbon *felt*, karbon *sponge*, *reticulated vitreous carbon*, CNT, serat *activated carbon*, grafit *felt*, kertas grafit, piringan grafit, dan karbon aerogel (He & Zhou, 2017).

11. Jarak antarelektroda

Jarak antarelektroda memengaruhi efisiensi proses elektro-fenton. Pengurangan jarak antarelektroda berarti mengurangi hambatan antara kedua elektroda dan membutuhkan arus yang lebih besar. Waktu tempuh yang lama bagi ion dalam reaksi elektro-fenton dapat meningkatkan durasi elektrolisis dan

mengurangi efisiensi pengurangan. Dalam proses elektro-fenton, Fe^{2+} (ion ferro) dapat diregenerasi secara in-situ dari Fe^{3+} (ion ferri). Elektro-generasi tersebut bergantung pada transfer elektron antara Fe^{3+} dengan katoda atau transfer massa Fe^{3+} di sekitar larutan-katoda. Jarak antarelektroda yang lebih jauh membatasi transfer massa Fe^{3+} ke permukaan katoda sehingga menghambat regenerasi katalis dan efisiensi elektro-fenton. Di samping itu, peningkatan jarak antarelektroda meningkatkan penggunaan energi secara signifikan (He & Zhou, 2017).

Penelitian terdahulu mengenai pengolahan lindi menggunakan elektro-fenton menunjukkan bahwa efisiensi pengurangan COD turun dari 80,8% menjadi 71,8% ketika jarak antarelektroda bertambah dari 2,1 cm jadi 2,8 cm. Namun, efisiensi pengurangan COD untuk jarak antarelektroda 0,7 cm lebih rendah daripada 1,3 cm (73,6% dan 80,4%). Hal ini disebabkan karena Fe^{2+} yang dihasilkan secara in-situ dapat teroksidasi dengan mudah menjadi Fe^{3+} di anoda ketika elektroda ditempatkan terlalu dekat. Jarak optimal antar elektroda berada pada kisaran 1,3-2,1 cm (He & Zhou, 2017).

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai acuan dalam penelitian dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Penelitian terdahulu

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Ahmad Rosyid Priyadi dan Naniek Ratni J. A. R., 2019	Penurunan Kadar COD dan Warna Limbah Industri Tekstil dengan Metode Elektro- Fenton	Air limbah industri tekstil memiliki nilai COD 2890,31mg/L. Reaktor yang digunakan berbentuk balok dan berbahan kaca dengan volume reaktor 12 liter dan volume sampel 6 liter. Katalis yang digunakan adalah $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan H_2O_2 . Pengasaman air limbah menggunakan H_2SO_4 . <i>Magnetic stirrer</i> digunakan untuk

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			<p>mengaduk sampel selama pengolahan. Elektroda yang digunakan adalah elektroda besi dan elektroda <i>stainless steel</i>. Efisiensi pengolahan COD dan warna pada air limbah industri tekstil yang dihasilkan menggunakan metode elektro-fenton masing-masing sebesar 94,1%, dan 99,2%. Nilai tersebut dicapai pada kondisi perbandingan rasio molar $H_2O_2:FeSO_4$ sebesar 10:0,1 dengan tegangan listrik 7 volt, jarak elektroda 4 cm, waktu kontak 180 menit, dan pH 4.</p>
2.	Duha K. Al-Zubaidi dan Kamal S. Pak, 2019	<i>Degradation of Parachlorophenol in Synthetic Wastewater Using Batch Electro-Fenton Process</i>	<p>Metode elektro-fenton sistem <i>batch</i> dengan katoda <i>carbon felt</i> dan anoda oksida logam campuran (Ti-RuO_2/IrO_2) efektif untuk mengurangi paraklorofenol dalam air limbah artifisial. Air limbah artifisial mengandung 50 mg/L paraklorofenol. Efisiensi pengolahan COD terbaik adalah 87,88% dengan konsumsi energi 4,4 kWh/kgCOD yang dicapai pada kondisi optimal (Konsentrasi Fe = 0,59 mM, t = 96,6 menit, I = 184,8 mA, dan pH = 2,5)</p>
3.	Oluwatosin A. Afolabi, Kenneth O. Adekalu, dan	<i>Electro-Fenton Treatment Process for Brewery Wastewater: Effects</i>	<p>Air limbah pabrik bir dengan nilai awal COD dan BOD sebesar 854,86 mg/L dan 423,76 mg/L diolah menggunakan metode elektro-fenton</p>

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
2022	David A. Okunade,	<i>of Oxidant Concentration and Reaction Time on BOD and COD Removal Efficiency</i>	dengan variasi konsentrasi H ₂ O ₂ dan waktu kontak/reaksi. Penyisihan BOD dan COD paling optimal masing-masing 88,96% dan 93,16% pada konsentrasi H ₂ O ₂ 2000mg/L dan waktu reaksi 120 menit. Pengolahan dilakukan dalam sel elektrokimia 1,5L dengan volume air limbah 1L, elektroda batang besi, tegangan 15V, kuat arus 2A, konsentrasi FeSO ₄ .7H ₂ O 0,002M, <i>magnetic stirrer</i> 300 rpm, dan pH 3,5.
4	M. Panizza, A. Barbucci, M. Delucchi, M. P. Carpanese, A. Giuliano, M. Cataldo-Hernández, dan G. Cerisola,	<i>Electro-Fenton Degradation of Anionic Surfactants</i>	Penyisihan <i>sodium dodecyl benzene sulfonate</i> (LAS) dilakukan dengan menggunakan elektro-fenton. Eksperimen yang dilakukan menggunakan <i>undivided cell</i> dengan volume 250L. Katoda berupa <i>carbon felt</i> dengan ukuran 8 cm x 6 cm x 0,5 cm. Anoda yang digunakan berupa Ti/RuO ₂ <i>cylindrical grid</i> . Larutan diaduk dengan <i>magnetic stirrer</i> 700 rpm. Hasil dari elektrolisis dengan kondisi eksperimen berbeda adalah surfaktan hampir sepenuhnya dapat dihilangkan. Laju oksidasi tertinggi dicapai pada kondisi kuat arus 200 mA, pH 3, dan konsentrasi katalis Fe ²⁺ 0,3 mM. Pada kondisi tersebut, LAS dengan konsentrasi 50mg/L hampir sepenuhnya dapat

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			dihilangkan setelah elektrolisis 180 menit.
5	Pengfei Ma, Hongrui Ma, Alessandro Galia, Simona Sabota, dan Onofrio Scialdone, 2018	<i>Reduction of Oxygen to H₂O₂ at Carbon Felt Cathode in Undivided Cells. Effect of The Ratio Between The Anode and The Cathode Surfaces and of Other Operative Parameters</i>	Konversi oksigen menjadi hidrogen peroksida (H ₂ O ₂) secara katodik pada katoda <i>carbon felt</i> dilakukan dalam <i>undivided cell</i> sederhana untuk mengevaluasi secara sistematis efek dari berbagai parameter pengoperasian yang dapat memengaruhi reduksi katodik oksigen dan oksidasi anodik hidrogen peroksida. Produksi hidrogen peroksida secara dramatis bergantung pada bahan anoda. Konsentrasi H ₂ O ₂ tertinggi dihasilkan oleh anoda Ti/IrO ₂ -Ta ₂ O ₅ dan konsentrasi terendah dihasilkan oleh <i>carbon felt</i> . Konsentrasi H ₂ O ₂ yang tinggi dapat dihasilkan menggunakan rasio yang besar antara luas katoda dan luas anoda. Luas katoda yang lebih besar mendukung reduksi katodik oksigen sementara luas anoda yang kecil mengurangi oksidasi anodik H ₂ O ₂ . Laju pengadukan juga perlu dinaikkan untuk meningkatkan produksi H ₂ O ₂ . Nilai optimal kuat arus perlu ditentukan karena arus yang terlalu rendah membatasi proses, sementara arus yang terlalu

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			tinggi meningkatkan oksidasi anodik H ₂ O ₂ .
6	Reza Davarnejad dan Samaneh Nasiri, 2016	<i>Slaughterhouse Wastewater Treatment using an Advanced Oxidation Process: Optimization Study</i>	Air limbah rumah potong ayam dengan COD 2932 mg/L, TDS mg/L, pH 6,27, dan warna 100 colour unit diolah menggunakan elektro-fenton. Gelas <i>beaker</i> dengan kapasitas 500 cm ³ dijadikan sebagai reaktor dan air limbah diaduk dengan kecepatan 400 rpm. Volume air limbah yang digunakan sebanyak 250 cm ³ dan ditambahkan FeSO ₄ ·7H ₂ O dan H ₂ O ₂ . Elektroda terbuat dari plat besi dengan dimensi 2 cm x 0,5 cm dan berjarak 3 cm antarelektroda. Kondisi optimum untuk penyisihan COD dan warna dihitung dengan perangkat lunak berdasarkan data eksperimen yang telah dilakukan. Kondisi optimum untuk penyisihan COD adalah waktu reaksi 55,6 menit, pH 4,38, rasio molar H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ 3,73, kerapatan arus 74,07 mA/cm ² , rasio H ₂ O ₂ /Air Limbah 1,63mL/L dengan penyisihan 92,37%. Kondisi optimum untuk penyisihan warna adalah waktu reaksi 49,22 menit, pH 3,39, rasio molar H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ 3,62, kerapatan arus 67,9 mA/cm ² , rasio H ₂ O ₂ /Air Limbah 1,44mL/L dengan penyisihan 88,06%.

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
7	Oki Setiawan, Sarto, dan Rochim Bakti Cahyono, 2020.	Pengaruh pH Umpan dan Rasio COD/H ₂ O ₂ terhadap Penurunan COD pada Limbah Cair Rumah Sakit melalui Metode Fenton	Air limbah rumah sakit memiliki nilai COD 580,65 mg/L. Pengolahan dilakukan dengan metode fenton konvensional sistem <i>batch</i> . Gelas <i>beaker</i> 1000 mL dijadikan sebagai reaktor dan air limbah diaduk dengan <i>magnetic stirrer</i> 200 rpm. Dosis Fe ²⁺ dibuat konstan sebanyak 200 mg/L. Pengasaman sampel menggunakan HNO ₃ . Penurunan COD paling optimal memiliki nilai 55,07% pada kisaran pH 3 dan rasio COD/H ₂ O ₂ 10 (g/g).
8	Chia-Chi Su, An- Tzu Chang, Luzvisminda M. Bellotindos, dan Ming-Chun Lu, 2012	<i>Degradation of Acetaminophen by Fenton and Electro-Fenton Processes in Aerator Reactor</i>	Pengolahan <i>acetaminophen</i> (ACTP) atau parasetamol dilakukan dengan menggunakan metode fenton dan elektro-fenton. Reaktor terbuat dari akrilik (<i>plexiglass</i>) dengan dimensi 21,5 x 15 x 25 cm ³ dengan volume 8 L. Anoda terbuat dari <i>mesh</i> titanium dengan lapisan IrO ₂ /RuO ₂ . Katoda terbuat dari <i>stainless steel</i> . Elektroda tersebut memiliki dimensi kerja yang sama, yaitu 300 cm ² (20 cm x 15 cm). Selama proses pengolahan, aerasi dilakukan. Kondisi optimal penyisihan terjadi pada pH 3, konsentrasi Fe ²⁺ 0,1 mM, dan konsentrasi H ₂ O ₂ 25 mM. Efisiensi penyisihan ACTP dengan fenton dan elektro-fenton masing-masing adalah 99% dan 100%. Namun,

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			<p>efisiensi penyisihan COD dan TOC berbeda antara proses fenton dengan elektro-fenton. Efisiensi penyisihan COD dan TOC pada elektro-fenton lebih tinggi 12% dan 65% dibandingkan proses fenton. Berdasarkan hasil tersebut, elektro-fenton lebih baik daripada fenton dalam hal penyisihan COD dan TOC.</p>
9	<p>Simon Komtchou, Ahmad Dirany, Patrick Drogui, dan Alain Bermond, 2015</p>	<p><i>Removal of Carbamazepine from Spiked Municipal Wastewater using Electro-Fenton Process</i></p>	<p>Penyisihan <i>carbamazepine</i> pada larutan artifisial (CBZ = 12 mg/L) dan air limbah kotapraja/<i>municipal</i> (CBZ = 60-70 µg/L) dilakukan dengan elektro-fenton. Reaktor berupa terbuat dari akrilik dengan dimensi 35 x 135 x 170 mm³. Kondisi optimal untuk sampel artifisial dicapai pada arus 0,2 A, pH 3, waktu pengolahan 120 menit, katoda <i>carbon felt</i>, anoda <i>boron-doped diamond</i> (BDD), dan konsentrasi Fe²⁺ 0,25 mM. Pada kondisi optimum tersebut, sebanyak 52% TOC dan 73% CBZ dihilangkan. Proses tersebut juga digunakan sebagai pengolahan tersier pada efluen <i>municipal wastewater treatment plant</i> dan <i>carbamazepine</i> dapat dihilangkan sepenuhnya.</p>