

TESIS

PENGOLAHAN AIR LIMBAH DAPUR RUMAH MAKAN X DI KOTA MAKASSAR MENGGUNAKAN PROSES ELEKTROKOAGULASI DENGAN PERFORMA REAKTOR *CONTINUOUS FLOW SINGLE CHANNEL*

*Wastewater Treatment for Restaurant X in Makassar City using
Electrocoagulation Process with Continuous Flow Single Channel
Reactor Performance*

**ABDI NUR RAJALAU
D092211004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH DAPUR RUMAH MAKAN X DI
KOTA MAKASSAR MENGGUNAKAN PROSES
ELEKTROKOAGULASI DENGAN PERFORMA REAKTOR
*CONTINUOUS FLOW SINGLE CHANNEL***

*Wastewater Treatment for Restaurant X in Makassar City using
Electrocoagulation Process with Continuous Flow Single Channel
Reactor Performance*

**ABDI NUR RAJALAU
D092211004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH DAPUR RUMAH MAKAN X DI
KOTA MAKASSAR MENGGUNAKAN PROSES
ELEKTROKOAGULASI DENGAN PERFORMA REAKTOR
*CONTINUOUS FLOW SINGLE CHANNEL***

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik
Program Studi Teknik Lingkungan

Disusun dan diajukan oleh

**ABDI NUR RAJALAU
D092211004**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

PENGOLAHAN AIR LIMBAH DAPUR RUMAH MAKAN X DI KOTA MAKASSAR MENGGUNAKAN PROSES ELEKTROKOAGULASI DENGAN PERFORMA REAKTOR *CONTINUOUS FLOW-SINGLE CHANNEL*

ABDI NUR RAJALAU
D092211004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 15 Agustus 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Achmad Zubair, M.Sc.
NIP. 195901161987021001

Pembimbing Pendamping



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

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN.Eng.
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Lingkungan



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

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abdi Nur Rajalau
Nomor Induk Mahasiswa : D092211004
Program Studi : Teknik Lingkungan

Dengan ini menyatakan bahwa tesis berjudul **“Pengolahan Air Limbah Dapur Rumah Makan X di Kota Makassar menggunakan Proses Elektrokoagulasi dengan Performa Reaktor *Continuous Flow Single Channel*”** adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Ir. Achmad Zubair, M.Sc. sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya ilmiah yang diterbitkan maupun yang tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan di dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal Internasional (The Seybold Report Journal (TSRJ, ISSN 1533-9211), Volume 18, No. 7, Hal. 527-532, DOI 10.17605/OSF.IO/FJWKV, telah terbit pada 13 Juli 2023) sebagai riset orisinal (artikel ilmiah) dengan judul **“*Comparison Of Aluminum and Nickel Electrodes in The Electrocoagulation Process.*”**

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 15 Agustus 2023

Yang Menyatakan,



Abdi Nur Rajalau

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahim,

Alhamdulillah rabbil'alamiin. Segala Puji bagi Allah *Subhanahu wa Ta'ala*, Sembahan Semesta Alam, atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya kepada penulis dan kita semua, sehingga tesis ini dapat selesai tepat waktu. Tak lupa pula, Shalawat serta Salam semoga senantiasa tercurah ke haribaan junjungan alam *nabiyullah wa rasulullah* Muhammad *Shallallahu 'Alaihi wa Sallam*. Tesis yang berjudul **“Pengolahan Air Limbah Dapur Rumah Makan X di Kota Makassar Menggunakan Proses Elektrokoagulasi dengan Performa Reaktor *Continuous Flow Single Channel*”** merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Magister Teknik di Program Studi Teknik Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Selanjutnya, ucapan terima kasih yang begitu besar, mendalam, tak terhingga, dan tiada tara untuk kedua Orang Tua penulis yang terkasih dan tercinta atas perjuangan mereka, Ayahanda **Basri S.Pd.**, dan Ibunda **Selvi G. Abdan**, serta adik penulis yang terbaik dan tersayang Adinda **Ummi Aulia Nurdin**. Selain itu, ucapan terima kasih yang begitu besar juga kepada Keluarga Oma **Hj. Aisyah Ibrahim** dan Bibi **Nurhayati G. Abdan, S.Ag., S.H., M.H.**, sebagai *support system* terbaik. Tak lupa pula penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk semua keluarga besar, termasuk keluarga **H. Lompo dan Hj. Baji** yang selalu memberikan dukungan moril maupun materi, do'a, perhatian, dan kasih sayang yang begitu tulus, ikhlas dan tiada hentinya untuk penulis.

Pada kesempatan ini pula, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada berbagai pihak atas saran, arahan, bantuan, nasihat, didikan, petuah, dan bimbingan yang selama ini penulis dapatkan, di antaranya adalah yang penulis hormati dan banggakan:

1. Bapak **Dr. Ir. Achmad Zubair, M.Sc.** sebagai Pembimbing Utama, yang telah banyak memberikan arahan, saran, nasihat, kebijakan, maupun kepercayaan yang sangat berarti dan tulus kepada penulis, sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar, tanpa hambatan yang berarti.
2. Ibu **Dr. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.** sebagai Pembimbing Pendamping sekaligus Ketua Program Studi S2 Teknik Lingkungan, yang telah banyak

memberikan pencerahan, masukan, kebijakan dan motivasi dengan penuh ketulusan dan kesabaran kepada penulis selama penyusunan dan pelaporan riset (tesis) ini, sehingga segala hal yang terkait dengan riset ini mampu diselesaikan dengan baik dan sukses.

3. Ibu **Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc., Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM.**, dan **Dr. Eng. Asiyanthi T. Lando, S.T., M.T.**, sebagai Tim Penguji yang telah banyak memberikan saran, nasihat, motivasi, dan rekomendasi perbaikan riset yang bersifat membangun kepada penulis dalam penyusunan tesis ini, serta demi penelitian yang lebih baik dan berkesinambungan di masa depan.
4. Ibu **Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM.**, sebagai Kepala Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, sekaligus sebagai Pembimbing Akademik dari penulis.
5. Bapak **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.**, sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.**, sebagai Rektor Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh Dosen Departemen Teknik Lingkungan dan Teknik Sipil, serta Teknik Elektro (kepada Kanda **Fara Triadi, S.T., M.T.** sebagai senior di Teknik Elektro yang turut serta membantu kelancaran riset ini), kepada **Ibu Sumiati Andi Samayyo** selaku Kepala Sekretariat, **Pak Ruslan, S.AP. (Pak Olan)** selaku Admin Departemen, **Pak Syarifuddin, S.T.** selaku Laboran dan seluruh Tim Asisten Laboratorium Kualitas Air, dan adik-adik Mahasiswa S1 Teknik Lingkungan 2017, 2018 dan 2019, Staf Perpustakaan, Staf Fakultas Teknik, Staf Rektorat, Universitas Hasanuddin atas semua ilmu yang telah dibagikan, diajarkan dan ditanamkan, maupun bantuan dan pelayanan yang tulus diberikan kepada penulis.
8. Kepada segenap pemilik rumah makan lokal di Kota Makassar sebagai lokasi pengambilan sampel riset ini.
9. Kepada segenap lembaga pemerintahan, baik lokal maupun nasional sebagai sumber informasi pendukung riset ini.
10. Kepada segenap keluarga besar Mahasiswa S2 Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, juga kepada Kanda **Hasan Lambause, S.Pd.**,

M.Pd. sebagai rekan seperjuangan selama beliau menimba ilmu di Kota Makassar, khususnya di Universitas Negeri Makassar. Terima kasih atas dukungan dan motivasinya.

Dan kepada semua pihak yang telah mendukung, mendo'akan, memotivasi, dan membantu penulis dalam penyusunan tesis ini. Ucapan terima kasih dari penulis atas segala dukungan, baik secara fisik maupun non fisik. Juga permohonan maaf atas ketidakmampuan dan kealpaan penulis untuk menuliskan satu per satu, baik yang besar tak disebut gelar, maupun yang kecil tak disebut nama. Semoga segala amal kebaikan saudara-saudari dan bapak-ibu semuanya diterima sebagai ibadah yang berlipat ganda di sisi Allah *Subhanahu wa Ta'ala*.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kata sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis dengan segala kerendahan hati memohon maaf yang sedalam-dalamnya, serta sangat mengharapkan kritik dan saran (rekomendasi), serta koreksi (perbaikan) yang bersifat membangun untuk hasil yang lebih baik dan optimal (maksimal) di masa yang akan datang. Penulis juga berharap agar semoga tulisan (artikel ilmiah/penelitian) ini dapat memberikan secercah manfaat bagi siapapun yang membacanya, serta dapat memberikan sepenggal sumbangsih dalam kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk peradaban yang agung dan mulia.

Gowa, 15 Agustus 2023

Penulis,

Abdi Nur Rajalau

ABSTRAK

ABDI NUR RAJALAU. *Pengolahan Air Limbah Dapur Rumah Makan X di Kota Makassar Menggunakan Proses Elektrokoagulasi dengan Performa Reaktor Continuous Flow Single Channel* (dibimbing oleh **Achmad Zubair, Roslinda Ibrahim**).

Semakin banyaknya rumah makan di Kota Makassar, maka semakin bertambah air limbah yang dihasilkan. Air limbah yang dihasilkan tanpa proses pengolahan menjadi salah satu sumber pencemar lingkungan. Riset ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik air limbah rumah makan lokal di Kota Makassar yaitu pH, suhu, konduktivitas, BOD, COD, TSS, amonia dan minyak-lemak. Selain itu, fokus utama riset ini untuk menganalisis pengolahan air limbah tersebut skala laboratorium menggunakan proses elektrokoagulasi dengan performa reaktor *continuous flow single channel*. Desain reaktor ini berfokus pada perbandingan penggunaan material elektrode aluminium dan nikel. Selain itu, untuk mendukung analisis parameter operasional elektrokoagulasi, dilakukan pemantauan arus dan tegangan. Pemantauan ini dilakukan melalui sensor catu daya. Hasil yang diperoleh dari riset ini mencakup karakteristik air limbah rumah makan lokal di Kota Makassar, yaitu pH (4,74), BOD (220 mg/L), COD (701 mg/L), TSS (3.837 mg/L), amonia (55,847 mg/L), dan minyak-lemak (3.255 mg/L). Keenam parameter tersebut teridentifikasi melebihi baku mutu. Diperoleh juga efisiensi penyisihan lebih besar menggunakan material elektrode aluminium (60,9%-98,8%), dibandingkan dengan material elektrode berbahan nikel (22,3%-40,2%). Arus dan tegangan elektrode aluminium terpantau lebih besar (2-3V/0,5-0,6A) dibandingkan dengan elektrode nikel (1-2V/0,2-0,3A).

Kata Kunci: Elektrokoagulasi, air limbah, elektrode nikel, rumah makan, sensor



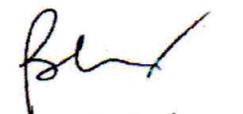
Acc 25/8/2023

ABSTRACT

ABDINUR RAJALAU. *Wastewater Treatment for Restaurant X in Makassar City using Electrocoagulation Process with Continuous Flow Single Channel Reactor Performance* (supervised by **Achmad Zubair, Roslinda Ibrahim**).

The more restaurants in Makassar City, the more wastewater is produced. Wastewater generated without treatment processes becomes one of the environmental pollution sources. The research aims to identify the characteristics of local restaurant wastewater in Makassar City such as pH, temperature, conductivity, BOD, COD, TSS, ammonia and oil-grease. The main focus of this research is to analyze the treatment of wastewater on a laboratory scale using an electrocoagulation process with the performance of a continuous flow single channel reactor. The reactor design focuses on comparing the use of aluminum and nickel electrode materials. In addition, to support the analysis of the electrocoagulation operational parameters, current and voltage monitoring is carried out. This monitoring is carried out through the power supply sensor. The results obtained from this research included the characteristics of local restaurant wastewater in Makassar City are pH (4,74), BOD (220 mg/l), COD (701 mg/l), TSS (3.837 mg/l), ammonia (55,847 mg/l), and oil-grease (3.255 mg/l). These six parameters were identified above the quality standard. A greater removal efficiency was also achieved using the aluminum electrode material (60,9-98,8%), compared to the nickel-based electrodes material (22,3-40,2%). The current and voltage of the aluminum electrode is monitored larger (2-3V/0,5-0,6A) compared to the nickel electrodes (1-2V/0,2-0,3A).

Keywords: Electrocoagulation, wastewater, nickel electrode, restaurant, sensor



Acc 29/8/2023

DAFTAR ISI

| <u>Keterangan/Penomoran</u> | <u>Halaman</u> |
|--|----------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| PENGAJUAN TESIS | ii |
| PERSETUJUAN TESIS | iii |
| PERNYATAAN KEASLIAN TESIS | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| ABSTRAK | viii |
| ABSTRACT | ix |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiv |
| DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL | xv |
| BAB I. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 5 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 5 |
| 1.4 Manfaat Penelitian..... | 6 |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian..... | 6 |
| BAB II. TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Sistem Pengolahan Setempat..... | 7 |
| 2.1.1 Sinkronisasi peraturan daerah dan nasional..... | 7 |
| 2.1.2 Komposisi dan sumber parameter air limbah..... | 8 |
| 2.1.3 Teknik penyisihan parameter air limbah..... | 10 |
| 2.2 Elektrokoagulasi untuk Air Limbah Rumah Makan..... | 11 |
| 2.2.1 Desain reaktor elektrokoagulasi..... | 12 |
| 2.2.2 Koneksi elektrode..... | 14 |
| 2.2.3 Produksi agen koagulasi listrik..... | 15 |
| 2.2.4 Parameter energetik elektrokoagulasi..... | 15 |
| 2.2.5 Catu daya elektrokoagulasi..... | 16 |
| 2.2.6 Pengaruh material elektrode..... | 16 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.7 Parameter operasional elektrokoagulasi..... | 17 |
| 2.2.8 Kelebihan dan kekurangan elektrokoagulasi..... | 17 |
| 2.2.9 Sensor untuk mendukung pengolahan air limbah rumah makan..... | 18 |
| 2.3. Regresi Linear..... | 20 |
| 2.4 Komparasi Riset Elektrokoagulasi..... | 22 |
| 2.5 Kerangka Pemikiran Penelitian Elektrokoagulasi untuk Air Limbah Rumah Makan..... | 24 |
| BAB III. METODOLOGI PENELITIAN..... | 25 |
| 3.1 Rancangan Penelitian..... | 25 |
| 3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian..... | 25 |
| 3.3 Alat dan Bahan Penelitian..... | 26 |
| 3.4 Populasi dan Sampel Penelitian..... | 27 |
| 3.5 Pelaksanaan Penelitian..... | 28 |
| 3.6 Teknik Pengumpulan Data..... | 31 |
| 3.7 Teknik Analisis..... | 31 |
| 3.8 Diagram Alir Penelitian..... | 33 |
| BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 34 |
| 4.1 Karakteristik Air Limbah Rumah Makan Lokal di Kota Makassar..... | 34 |
| 4.2 Efisiensi Penyisihan Menggunakan Elektrode Aluminium dan Nikel... | 38 |
| 4.3 Pemantauan Arus dan Tegangan melalui Sensor Catu Daya..... | 71 |
| BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN..... | 77 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 77 |
| 5.2 Saran..... | 77 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 78 |
| LAMPIRAN..... | 93 |

DAFTAR TABEL

| <u>Keterangan/Penomoran</u> | <u>Halaman</u> |
|---|----------------|
| Tabel 1. Perbedaan pokok antara riset sebelumnya dengan saat ini..... | 22 |
| Tabel 2. Karakteristik air limbah rumah makan lokal di Kota Makassar..... | 34 |
| Tabel 3. Konsentrasi awal dan akhir serta efisiensi penyisihan..... | 38 |
| Tabel 4. Hasil uji statistik (regresi linear berganda dengan metode <i>stepwise</i>)..... | 44 |
| Tabel 5. Prakiraan mencapai baku mutu pada elektrode aluminium..... | 67 |
| Tabel 6. Prakiraan mencapai baku mutu pada elektrode nikel..... | 69 |
| Tabel 7. Data <i>monitoring</i> arus dan tegangan melalui sensor catu daya..... | 72 |

DAFTAR GAMBAR

| <u>Keterangan/Penomoran</u> | <u>Halaman</u> |
|---|----------------|
| Gambar 1. Proses elektrokoagulasi..... | 12 |
| Gambar 2. Geometri elektrokoagulasi..... | 14 |
| Gambar 3. Koneksi elektrode..... | 15 |
| Gambar 4. Reaksi redoks proses elektrokoagulasi..... | 15 |
| Gambar 5. Integrasi sensor catu daya dengan reaktor aliran kontinu..... | 19 |
| Gambar 6. Model ESP32 dan koneksi PIN..... | 20 |
| Gambar 7. Kerangka pemikiran penelitian..... | 24 |
| Gambar 8. Desain reaktor elektrokoagulasi aliran kontinu dan sensor catu daya..... | 27 |
| Gambar 9. Diagram alir penelitian..... | 33 |
| Gambar 10. pH dan suhu air limbah setelah proses pengolahan..... | 39 |
| Gambar 11. BOD, COD, TSS, minyak-lemak, amonia setelah pengolahan..... | 42 |
| Gambar 12. Regresi arus dan tegangan terhadap parameter air limbah..... | 45 |
| Gambar 13. Efisiensi penyisihan..... | 55 |
| Gambar 14. Verifikasi suplai tegangan..... | 57 |
| Gambar 15. Prakiraan konsentrasi kontaminan memenuhi baku mutu..... | 67 |
| Gambar 16. Fluktuasi energi..... | 73 |

DAFTAR LAMPIRAN

| <u>Keterangan/Penomoran</u> | <u>Halaman</u> |
|---|----------------|
| Lampiran 1. Dokumentasi Penelitian..... | 93 |
| Lampiran 2. Detail Analisis Data..... | 99 |
| Lampiran 3. Data Pendukung, Hasil Uji Laboratorium dan Izin Riset..... | 100 |

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

| <i>Singkatan/Symbol</i> | <i>Arti/Keterangan</i> |
|-------------------------|--|
| V | : Volt, tegangan listrik |
| A | : Ampere, arus listrik |
| BOD | : <i>Biological oxygen demand</i> |
| COD | : <i>Chemical oxygen demand</i> |
| TSS | : <i>Total suspended solids</i> |
| FOG/M&L | : <i>Fats, oils & greases</i> , minyak-lemak |
| DHL | : Daya hantar listrik; konduktivitas |
| EC | : <i>Electrocoagulation</i> , elektrokoagulasi |
| CC | : <i>Chemical Coagulation</i> , koagulasi kimia (konvensional) |
| CFSC | : <i>Continuous flow single channel</i> , aliran kontinu saluran tunggal |
| PS | : <i>Power supply; power source</i> , catu daya |
| pH | : <i>Power of Hydrogen</i> |
| DC | : <i>Direct current</i> |
| AC | : <i>Alternating current</i> |
| MP | : <i>Monopolar parallel</i> |
| MS | : <i>Monopolar series</i> |
| BP | : <i>Bipolar series</i> |
| IoT | : <i>Internet of things</i> , teknologi sensor |
| Al | : Aluminium |
| Ni | : Nikel |
| GBNP | : <i>Grid battery nickel plates</i> , pelat nikel penyambung baterai |
| Fe | : Besi |
| Co | : Kobalt |
| Cu | : Tembaga |
| NaCl | : Natrium klorida, garam dapur |
| FE | : <i>Faradaic efficiency</i> , efisiensi <i>faradaic</i> |
| ECE | : <i>Electrical current efficiency</i> , efisiensi arus listrik |
| Redoks | : Reduksi-oksidasi, reaksi kimia dalam proses elektrokoagulasi |
| H ₂ | : Formasi gelembung hidrogen dalam air limbah yang diolah |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan rumah makan yang semakin bervariasi di kota besar. Hal ini terjadi seiring dengan bertambahnya permintaan oleh masyarakat. Tumbuhnya minat layanan penyedia makan dan minum yang hemat, praktis, higienis, dan estetik. Hal ini dilaporkan oleh BPS, (2020a) bahwa jumlah rumah makan di Indonesia (34 Provinsi) adalah 8.042 unit. Kota Makassar sebagai Ibu Kota Provinsi Sulawesi Selatan memiliki jumlah rumah makan sebanyak 715 unit (BPS, 2020b). Data ini bertambah dari tahun-tahun sebelumnya (Dinas Pariwisata, 2020). Sehingga, hal ini menjadi penegasan bahwa semakin banyaknya usaha rumah makan, maka semakin banyak pula kebutuhan air, serta semakin bertambah pula air limbah yang dihasilkan.

Air limbah yang dihasilkan dari rumah makan tanpa proses pengolahan menjadi salah satu sumber pencemar lingkungan (Gallego-Schmid & Tarpani, 2019; Lopes *et al.*, 2020). Efek yang ditimbulkan dari pencemaran dapat mengganggu kesehatan (Temitope & Abayomi, 2020). Fakta ini diperkuat oleh pemberitaan Hijau, (2022) dan Zufriyal, (2019) dimana masih terdapat rumah makan di kota-kota besar, seperti Bekasi dan Kota Makassar yang belum mengolah air limbah yang dihasilkan. Fakta serupa juga dilaporkan oleh DLH, (2019) di dalam “Petunjuk Teknis Pengelolaan Limbah Cair Kegiatan Rumah Makan,” dimana terdata 86 rumah makan yang belum memiliki pengolahan air limbah, baik secara pribadi maupun terintegrasi. Kobya *et al.*, (2020) dan Moradi, *et al.*, (2020a; 2020b) menerangkan saat ini menjadi suatu keperluan akan pengolahan air limbah dalam rangka penggunaan kembali (*reuse*). Hal ini menjadi suatu persoalan serius dan menyita perhatian segenap pihak maupun sistem atau tata kelola nasional dan komunal. Oleh karena itu, berbagai aturan dan kebijakan ditetapkan oleh Pemerintah Pusat dan Daerah.

Mengacu pada DLH, (2016) tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik Pasal 3 Ayat 1 sampai 5 bahwa segala jenis usaha atau kegiatan yang menghasilkan air limbah hendaknya melakukan pengolahan dalam memenuhi baku mutu, baik secara mandiri maupun terintegrasi. Selain itu, pengolahan dan pengelolaan air limbah

rumah makan maupun usaha lainnya juga dimuat oleh DLH, (2014); Pergub, (2010); Perda, (2016). Selanjutnya, penentuan jenis pengolahan atau teknologi air limbah rumah makan didasarkan pada karakteristik air limbah yang dihasilkan. Karakteristik air limbah yang dimuat dalam beberapa peraturan nasional dan daerah masih tergambar secara umum (skala domestik). Oleh karena itu, dibutuhkan riset dan referensi pendukung yang menjelaskan karakteristik air limbah rumah makan secara khusus dan spesifik.

Secara spesifik, karakteristik air limbah rumah makan selaras dengan observasi Gurd *et al.*, (2019), mencirikan kadar minyak dan lemak tinggi sesuai dengan jenis makanannya. Faktor ini menjadi penyebab terjadinya penyumbatan saluran pembuangan dan meluapnya air di selokan. Akibatnya, kisaran biaya yang direncanakan untuk penanganan saluran air yang tersumbat mencapai lebih dari Rp 2 Miliar hanya untuk di sebagian kecil wilayah Jakarta Selatan pada tahun 2023 (Nurchahyo, 2023). Sedangkan, untuk perubahan drainase di Kota Makassar diestimasikan rencana anggaran sebesar Rp 115 Miliar (Ibrahim, 2023).

Selain minyak-lemak, ditemukan pula COD dan TSS menjadi parameter dominan pada air limbah usaha penyedia makanan. Kemudian, parameter pH dan suhu selalu menjadi pertimbangan terhadap efisiensi pengolahan. Selain parameter tersebut yang sering terdapat pada air limbah, ada pula BOD sebagaimana yang telah ditinjau oleh Kadier *et al.*, (2022). Penentuan beberapa parameter yang mendominasi air limbah rumah makan tersebut dapat ditemukan di berbagai literatur terkait.

Parameter air limbah rumah makan yang berpotensi menjadi salah satu sumber pencemar lingkungan dijadikan sebagai dasar oleh pihak atau ahli untuk melakukan inovasi teknologi ramah lingkungan. Berkembanglah berbagai temuan teknologi atau pun metode pengolahan air limbah, seperti membran-bioreaktor (di-Trapani *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021a), penambahan bahan kimia (Mohamad *et al.*, 2021) dan sistem anaerobik-aerobik terintegrasi telah ditelusuri mampu mengolah air limbah dengan konsentrasi tinggi (Lacasa *et al.*, 2019; Shoukat *et al.*, 2019). Namun, seiring dengan evaluasi teknologi, sistem biologis tidak selalu relevan, karena membutuhkan ruang fisik (lahan) yang besar, juga beberapa mikroorganisme pengurai yang sensitif terhadap beberapa bahan kimiawi kompleks dan durasi dari proses pengolahan terbilang lama (Nunez *et al.*, 2019).

Elektrokoagulasi (EC) telah diamati mampu menyisihkan bahan organik dan padatan tersuspensi dari berbagai jenis air limbah (Bener *et al.*, 2019; Islam *et al.*, 2019). Atensi yang cukup besar terhadap metode ini dalam beberapa dekade terakhir. Kemampuannya dalam penyisihan minyak dan lemak pada air limbah telah teruji (de la Fuente *et al.*, 2019). Elektrokoagulasi sebagai teknologi hijau memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem biologi standar, antara lain adalah pengoperasian yang sederhana, waktu pengolahan singkat, ramah lingkungan, tidak memerlukan bahan kimia (koagulan) tambahan, efluen yang cukup bersih (Benekos *et al.*, 2019; Maitlo *et al.*, 2019; Zini *et al.*, 2020).

Pada dekade terakhir ini, pengaplikasian proses EC tidak hanya melalui reaktor *batch*, tetapi juga berfokus pada pengolahan melalui reaktor aliran kontinu (Kuokkanen *et al.*, 2021; Nguyen *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2020). Di samping itu, adanya determinasi umum tentang peningkatan jumlah dan material elektrode berpengaruh terhadap peningkatan kinerja reaktor. Peningkatan kinerja ini disebabkan oleh tingginya pembentukan *floc* (Toussaint *et al.*, 2019). Namun demikian, efek dari penambahan jumlah dan penggunaan material elektrode ini dapat menyebabkan peningkatan jumlah logam elektro-terlarut. Dampak ini biasa terjadi pada hanya beberapa jenis reaktor, sehingga diindikasikan kurang tepat jika digeneralisir. Misalnya, reaktor *Continuous Flow Single Channel* (CFSC). Reaktor ini tercatat digunakan untuk pengolahan air permukaan (Rajaniemi *et al.*, 2019).

Seiring dengan perkembangannya, geometri dan jumlah sekat (*baffle*) yang dimiliki oleh reaktor CFSC ini cukup beragam, bersifat relatif terhadap hasil olahan atau skala desain yang dibutuhkan (Castaneda *et al.*, 2019). Peneliti lain berfokus pada desain elektrode (bentuk dan ukuran) untuk meminimalkan konsumsi energi (Abdulhadi *et al.*, 2021). Selain itu, beberapa peneliti meninjau secara proporsional dalam kasus konsentrasi organik yang sangat tinggi dalam air limbah, dimana metode elektrokoagulasi menjadi kurang efisien. Oleh karena itu, untuk membantu peningkatan efisiensi metode ini dapat dikombinasikan atau dipasangkan dengan proses biologis terbaru lainnya (Al-Qodah, *et al.*, 2020a; 2020b; Al-Qodah *et al.*, 2019). Kombinasi ini dapat dipertimbangkan dan diwujudkan ketika estimasi biaya mencukupi. Kinerja metode elektrokoagulasi dimanifestasikan sebagai keselarasan fungsi dari beberapa parameter operasional, antara lain adalah jarak antar-elektrode, densitas arus dan konfigurasi elektrode (Al-Raad *et al.*, 2019).

Dalam penerapan metode elektrokoagulasi, beberapa riset menunjukkan adanya keberhasilan penggunaan kombinasi elektrode. Penggabungan antara dua jenis bahan, misalnya elektrode aluminium (Al) di katode dan besi (Fe) di anode (Sharma *et al.*, 2021). Hasil olahan yang dicapai melalui variasi ini adalah 92% dan 97% untuk penyisihan COD dan kekeruhan untuk air limbah tekstil. Optimalnya hasil efisiensi penyisihan yang diperoleh tersebut hanya membutuhkan konsumsi energi minimum, yaitu 0,007 KWh/L (Sharma *et al.*, 2021).

Khanitchaidecha *et al.*, (2022) telah menerapkan metode elektrokoagulasi, dimana tujuh buah elektrode aluminium terobservasi mampu mengolah air limbah kuliner jalanan (*street food*). Pada eksperimen tersebut, penyisihan optimal yang dapat dicapai adalah 98% dan 86 % untuk COD dan minyak-lemak. Operasi waktu pengolahan kurang dari 10 menit dan densitas arus optimal sebesar 20 mA/cm². Percobaan yang dilakukan tersebut berpotensi dapat diaplikasikan secara setempat (*on site*). Selanjutnya, hasil riset di tahun terkini oleh Bani-Melhem *et al.*, (2023) terhadap air limbah domestik (*grey water*) mampu mencapai hasil penyisihan COD sebesar 88%. Hasil tersebut diperoleh dengan menggunakan elektrode yang bersumber dari limbah logam bekas (kaleng minuman atau aluminium foil bekas, besi tua dan baja ringan bekas). Sedangkan, waktu pengolahan optimal yang terpantau adalah 10 menit dan densitas arus sebesar 5-20 mA/cm².

Martinez *et al.*, (2020) melakukan percobaan terhadap integrasi jaringan sensor sebagai validasi awal dalam skenario instalasi pengolahan air limbah. Wujud manfaat dari percobaan ini adalah alat pemantau kualitas air berbiaya rendah. Alat ini terdiri dari sensor nitrat dan penganalisis nitrit berdasarkan metode deteksi ion. Skenario teknologi *Internet of Things* (IoT) yang disajikan tersebut, memungkinkan data dapat diakses secara daring (*online*) dan waktu terkini (*real time*).

Penelitian oleh Zhang, *et al.*, (2021a) menemukan bahwa penerapan teknologi IoT dalam sistem membran-bioreaktor mampu memantau pengolahan air limbah area industri secara akurat. Eksplorasi teknologi IoT dalam mendukung proses pengolahan air limbah semakin berkembang hingga saat ini. Zhang *et al.*, (2022) menyatakan bahwa aplikasi sensor (IoT) mampu mendukung penyisihan bahan organik melalui sensor debit, tegangan tinggi dan pH pada air limbah plasma grafit. Teknologi IoT ini semakin dibutuhkan di dalam dunia usaha atau industri seiring dengan kemudahan yang ditawarkannya.

Berdasarkan uraian latar belakang ini, maka dilakukan riset untuk mengembangkan metode elektrokoagulasi, khususnya melalui performa reaktor aliran kontinu saluran tunggal (CFSC) yang direpresentasikan oleh material elektroda. Target besarnya adalah dapat mengurangi kandungan tinggi dari bahan organik pada air limbah rumah makan lokal, khususnya di Kota Makassar, Indonesia. Sekali lagi, hanya jika memungkinkan. Sekaligus memberikan gambaran terkini tentang karakteristik air limbahnya. Sedangkan, sub-targetnya adalah mencapai penyisihan yang memadai, waktu pengolahan yang cukup singkat, pengoperasian yang sederhana, dan parameter operasional yang termonitor secara *online-real time* melalui aplikasi sensor sederhana (IoT).

1.2 Rumusan Masalah

Terkait dengan topik dan latar belakang penelitian ini, terdapat tiga pokok permasalahan yang dirumuskan, yaitu:

1. Bagaimana karakteristik air limbah rumah makan lokal di Kota Makassar (pH, suhu, konduktivitas, BOD, COD, TSS, amonia, dan minyak-lemak)?
2. Bagaimana efisiensi pengolahan antara dua material elektrode (aluminium dan nikel)?
3. Bagaimana hasil pantauan data arus dan tegangan melalui aplikasi sensor catu daya antara material elektrode aluminium dan nikel?

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum, penelitian ini berpijak pada tujuan penyusunan tesis yang tercantum di dalam Statuta Penulisan Tesis dan Disertasi oleh Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Tahun 2023 (Ramli, 2023). Secara khusus, terdapat tiga pokok tujuan yang perlu dicapai di dalam penelitian ini, yaitu:

1. Mengidentifikasi karakteristik air limbah rumah makan X (lokal) di Kota Makassar (pH, suhu, konduktivitas, BOD, COD, TSS, amonia, dan minyak-lemak).
2. Menganalisis efisiensi pengolahan antara dua material elektrode (aluminium dan nikel).
3. Menganalisis hasil pantauan data arus dan tegangan melalui aplikasi sensor catu daya antara material elektrode aluminium dan nikel.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian dari sub-bab sebelumnya, maka penelitian ini ditargetkan sedapat mungkin membagikan sepenggal manfaat, yaitu:

1. Hendaknya ini menjadi salah satu sumber edukasi riset terkait di bidang rekayasa lingkungan.
2. Sebagai konektor kolaborasi antar elemen keilmuan secara objektif.
3. Menyokong optimalisasi pengolahan air limbah rumah makan lokal yang berwawasan lingkungan, khususnya di Kota Makassar.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Cakupan (batasan) penelitian ini melingkupi:

1. Karakteristik air limbah rumah makan X (lokal) di Kota Makassar (pH, suhu, konduktivitas, BOD, COD, TSS, amonia, dan minyak-lemak).
2. Efisiensi material (bahan) elektrode aluminium dan nikel dalam proses elektrokoagulasi.
3. Aplikasi sensor catu daya pada proses elektrokoagulasi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pengolahan Setempat di Rumah Makan

Sistem pengolahan setempat (*on-site system*) memungkinkan setiap usaha penyedia makan dan minum untuk mengolah air limbahnya secara mandiri. Pada prinsipnya, buangan dari pencucian peralatan bekas makan dan minum akan masuk ke dalam sistem pengolahan air limbah. Umumnya, pengolahan air limbah terdiri dari dua tahap, yaitu pengolahan awal (*pre-treatment*) dan pengolahan biologis. Di antara pengolahan tersebut biasanya terdapat bak penetralisasi pH. Pengolahan awal biasanya dilakukan dengan menggunakan bak/kotak pemisah minyak-lemak konvensional (*grease trap*). Namun, mekanisme kotak ini membutuhkan waktu yang cukup lama dan hanya mampu memisahkan minyak-lemak saja. Sementara itu, seiring dengan meningkatnya jumlah rumah makan, alhasil kapasitas rumah makan menjadi semakin minimalis, maka pengolahan biologis menjadi kurang ideal karena membutuhkan ruang fisik yang luas dan tenaga terampil (DLH, 2019).

Fakta saat ini adalah hanya sebagian kecil rumah makan lokal di Indonesia memiliki kotak pemisah minyak-lemak sederhana, sisanya langsung dibuang ke selokan. Di sisi lain, penggunaan sistem pengolahan air limbah masih menjadi tantangan terberat bagi pelaku usaha, karena membutuhkan anggaran yang tidak sedikit. Mulai dari pemasangan sampai uji laboratorium, sehingga banyak yang tetap menjalankan usahanya tanpa adanya proses pengolahan. Kondisi ini mendorong inovasi lebih lanjut dari elemen terkait untuk mencari alternatif strategi lainnya yang lebih ekonomis, efektif dan efisien (Arbi, 2019; Kamtono *et al.*, 2016).

2.1.1 Sinkronisasi peraturan daerah dan nasional

Minimnya kesadaran diri dan pola pikir masyarakat yang keliru tentang tanggung jawab bersama terhadap lingkungan mengakibatkan terjadinya kerusakan lingkungan di setiap tempat (Al-Qaradhawi, 2001). Terlebih lagi biaya operasional yang sering menjadi momok bagi para pelaku usaha (Azzura, 2021; PDAM, 2023). Selain itu, persoalan ini masih menjadi tantangan tersendiri bagi para regulator untuk menyelaraskan aturan pengadaan sistem pengolahan air limbah secara setempat menuju terpusat (*off-site system*). Hal ini disebabkan oleh realisasi program sistem terpusat membutuhkan jangka waktu pengembangan yang cukup lama agar bisa terdistribusi merata (Pemkot, 2022).

Regulasi yang diterapkan oleh tiap daerah saat ini berpijak pada Permen LHK No. 68 Tahun 2016 tentang pengolahan air limbah domestik, mencakup rumah makan di dalamnya (DLH, 2016). Karakteristik air limbah domestik pun dicantumkan sebagai kontrol awal dalam menentukan teknologi pengolahan yang tepat guna. Penentuan teknologi ini secara rinci tidak dijelaskan di dalamnya. Namun, adanya konsep dasar tersebut guna sebagai pijakan bagi pelaku usaha domestik untuk memilih sistem pengolahan air limbahnya yang sesuai dengan kondisi, karakteristik air limbah dan anggaran usahanya (Kemenves, 2020).

2.1.2 Komposisi dan sumber parameter air limbah rumah makan

Air limbah rumah makan lokal sarat dengan konsentrasi bahan organik dari sisa makanan yang terbuat dari perasa berminyak seperti kecap dan saus atau bergantung dari jenis makanan tiap daerah. Sumbernya adalah proses pencucian peralatan makanan. Air limbah yang bersumber dari rumah makan lokal selalu dicirikan dengan kadar minyak-lemak tinggi. Parameter ini terdiri dari *trigliserida* dengan asam lemak rantai lurus melekat pada kelompok utama. *Gliserida* yang ada sebagai cairan pada suhu kamar dikenal sebagai minyak, sedangkan yang ada sebagai padatan disebut lemak. Umumnya, asam lemak ini dibuat dari 12-22 atom karbon. Ada 13 asam utama penyusun *gliserida*, di antaranya adalah *butyric* (C_3H_7COOH), *caproic* ($C_3H_{11}COOH$) dan *caprylic* ($C_3H_{15}COOH$) yang bersumber dari mentega, minyak sawit dan minyak kelapa (El-Ezaby *et al.*, 2020).

Riset sebelumnya melaporkan tentang klasifikasi ukuran tetesan (*droplet*). Laporan tersebut ditinjau oleh Gurd *et al.*, (2019) dan Othman *et al.*, (2021) tentang ukuran dan stabilitas partikelnya. Rata-rata 80% diameter minyak-lemak terdistribusi antara 20-150 mikrometer yang terdapat di dalam bak pencucian piring, disebut sebagai minyak terdispersi. 20% merupakan minyak bebas (*free oil*) yang berdiameter lebih dari 150 mikrometer. Umumnya, minyak bebas ini paling mudah dijumpai mengapung di atas permukaan air limbah.

Minyak bebas ini biasanya menjadi faktor penghalang badan air. Dampak yang ditimbulkan adalah terganggunya penetrasi sinar matahari. Juga masuknya oksigen dari udara ke air, sehingga dapat mengganggu aktivitas biologis di dalamnya. Mengurangi angka oksigen terlarut (DO) dalam air. Jika minyak bebas teremulsi secara fisik atau pun kimia, maka berubah menjadi minyak teremulsi.

Proses emulsi minyak secara fisik adalah pemecahan minyak bebas menjadi tetesan kecil oleh agitasi atau pencampuran dengan air. Sedangkan, proses emulsi minyak secara kimia adalah pemecahan minyak bebas menjadi tetesan kecil oleh reagen (bahan kimia) (Faradillah & Pujiastuti, 2022).

Seringkali dijumpai air limbah yang bersumber dari bak pencucian piring rumah makan memungkinkan terdapat bahan kimia. Proporsinya yang cukup kuat, memungkinkan terjadinya proses emulsi minyak-lemak. Proses ini terjadi, sebab aktivitas pencucian peralatan makan dan minum erat kaitannya dengan penggunaan surfaktan. Mayoritas studi sebelumnya mengaitkan air limbah berminyak dengan adanya potensi suhu, BOD, COD, dan TSS di dalamnya (Chinwetkitvanich, 2020).

Suhu merupakan parameter penting yang mempengaruhi laju reaksi kimia dari pengolahan. BOD merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk organisme biologis aerobik untuk menguraikan bahan organik. COD merupakan peluruhan bahan kimia pencemar organik dan anorganik terlarut atau tersuspensi di dalam air. TSS merupakan partikel padat dan memiliki berbagai bentuk. TSS diklasifikasikan berdasarkan ukuran, sifat kimia dan distribusi dalam air limbah (Chinwetkitvanich, 2020).

Hampir tidak ditemukan parameter amonia pada penelitian sebelumnya tentang karakteristik air limbah rumah makan. Namun, ketika ditinjau lebih dalam, bau tak sedap yang timbul dari proses organik di dalam air limbah berminyak, diindikasikan adanya kandungan amonia. Meskipun demikian, kadarnya mungkin relatif lebih rendah, dibandingkan dengan jenis air limbah berminyak lainnya, seperti lindi. Minyak-lemak yang berasal dari minyak bumi, dikenal sebagai minyak cokelat (*brown oil*) atau emas hitam (*black gold*). Sedangkan, yang berasal dari hewani dan nabati, dikenal sebagai minyak kuning (*yellow oil*) (Hamid *et al.*, 2020).

Minyak-lemak yang sukar terdegradasi ini, apapun jenis sumbernya berpotensi mencemari. Sekilas, minyak-lemak dalam bentuk cair tampak tidak berbahaya. Namun, jika mendingin, lalu membeku dan mengeras, maka kondisi ini dapat membahayakan. Pada bagian dalam lapisan pipa drainase dan selokan akan dijumpai terdapat banyak minyak-lemak yang menempel (kerak). Umumnya, pipa saluran pembuangan terbuat dari bahan *hidrofobik* dan *oleofilik*. Bahan yang secara alami mudah berikatan dengan minyak-lemak (Hamid *et al.*, 2020).

Pada akhirnya, minyak-lemak yang dibuang langsung ke lingkungan dalam jumlah berlebih, tanpa proses pengolahan sama sekali, maka dapat mengakibatkan badan air tersumbat. Kondisi ini memicu terjadinya luapan air limbah. Luapan ini semakin lama menjadi limpahan. Saat kondisi ini terjadi, maka besar potensi terjadi bencana lingkungan. Akibatnya, menyerang pada manusia. Kesehatan menjadi terganggu, sebab menyebarnya organisme pembawa patogen dari saluran air, termasuk virus. Kerusakan peralatan di sekitar tidak bisa dihindarkan. Dampak lain yang tidak kalah berbahaya adalah munculnya potensi titik api (kebakaran) (Cudjoe *et al.*, 2022). Oleh karena itu, konsentrasi awal air limbah rumah makan terkategori tinggi. Sehingga, ini penting untuk dipertimbangkan dalam proses pengolahan.

2.1.3 Teknik penyisihan parameter air limbah rumah makan

Beberapa teknologi pengolahan air limbah berminyak telah diamati. Mulai dari pengolahan konvensional, seperti kotak pemisah minyak-lemak, flotasi udara terlarut, flotasi udara kolom, adsorpsi, koagulasi, dan pengolahan biologis. Kemudian, pengolahan terkini dengan filtrasi membran (mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan osmosis balik). Sampai kepada proses elektrokimia (elektrofenton, elektrooksidasi dan elektrokoagulasi). Elektrokoagulasi yang dikombinasikan dengan mikrofiltrasi juga terbukti efektif (Othman *et al.*, 2021).

Suatu kewajaran apabila hasil yang diperoleh maksimal, sebab adanya kombinasi metode pengolahan lebih dari satu. Tentunya, penggunaan lebih dari satu teknologi membutuhkan pula anggaran yang berlebih. Berbeda dengan hanya menggunakan teknologi tunggal saja, terkadang hasil pengolahannya bisa optimal atau sebaliknya. Misalnya, proses elektrokoagulasi yang telah diamati dapat digunakan untuk menghilangkan minyak-lemak yang teremulsi (Othman *et al.*, 2021).

Penyisihan minyak-lemak oleh metode elektrokoagulasi terjadi sebab adanya *floc* aluminium hidroksida yang terbentuk. *Floc* ini adalah hasil dari pelepasan anode aluminium saat hidrogen terbentuk di sekitar katode. *Floc* hidroksida berperan sebagai penyerap minyak-lemak. Oleh karena itu, keberhasilan metode ini ditentukan oleh penggunaan jenis bahan elektrode. Elektrode aluminium seiringkali digunakan di berbagai jenis air limbah dan terbukti efektif. Misalnya, terbukti mampu mengurangi kekeruhan dan kandungan bahan organik (BOD, COD, TSS

dan berbagai parameter pencemar lainnya). Ini juga membuktikan bahwa metode ini tidak hanya untuk penyisihan minyak-lemak saja (Othman *et al.*, 2021).

Metode elektrokoagulasi ini dapat menjadi salah satu alternatif solusi. Solusi yang seharusnya diperhitungkan bagi Indonesia, sebagai salah satu negara penghasil sumber daya alam terbesar di dunia (misalnya, bauksit sebagai bahan baku aluminium dan nikel). Ini dibuktikan oleh data tentang daftar sepuluh besar negara penghasil logam di dunia seperti Indonesia. Sebagaimana yang diketahui sebelumnya, parameter operasional terpenting dalam metode elektrokoagulasi adalah bahan elektrode logam. Maka, kondisi ini seharusnya menjadi peluang besar untuk memaksimalkan potensi dalam negeri (Rahma, 2022; Soesatyo, 2023).

Namun, faktanya adalah kebanyakan hanya memilih perangkat pengolahan konvensional (kotak pemisah minyak-lemak) yang dipasang secara setempat untuk mengolah air limbahnya sendiri. Meskipun demikian, hal tersebut masih lebih baik. Dibandingkan dengan tanpa adanya sama sekali usaha pengolahan air limbah. Selanjutnya, penting diketahui dari desain kotak pemisah minyak-lemak ini dirancang hanya untuk memungkinkan pendinginan cairan yang masuk. Pendinginan tersebut bertujuan untuk memadatkan atau mengeraskan minyak-lemak saja. Pengerasan yang terjadi memungkinkan lebih mudah terpisah dengan air. Namun, proses pengerasan ini membutuhkan rentang waktu relatif lebih lama, yaitu rata-rata lebih dari 5 jam (Chinwetkitvanich, 2020).

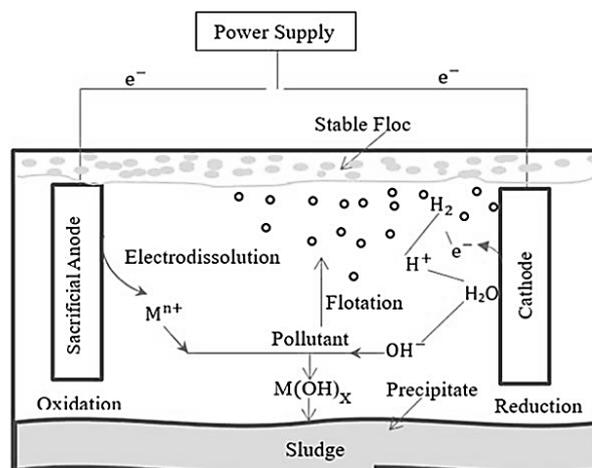
2.2 Elektrokoagulasi untuk air limbah rumah makan

Secara etimologi, elektrokoagulasi (EC) berasal dari kata *electro*, artinya listrik dan *coagulation*, artinya koagulasi. Secara terminologi, elektrokoagulasi adalah teknik, metode, teknologi, proses, strategi pengolahan, dan lain sebagainya, yang mengikuti prinsip kerja koagulasi konvensional. Umumnya, koagulasi konvensional diketahui menggunakan bahan kimia atau penambahan zat dari luar air limbah (*eksitu*). Perbedaannya dengan koagulasi listrik ini terletak pada input koagulan. Elektrokoagulasi menghasilkan koagulan di dalam air limbah (*insitu*). Koagulan ini terbentuk oleh adanya reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia ini disebabkan oleh induksi listrik (elektron). Sederhananya, elektrokoagulasi memanfaatkan aliran listrik untuk mengubah dan mendestabilisasi/mencampurkan muatan partikel pencemar di dalam air limbah. Proses ini menyebabkan penggumpalan massa sampai membentuk endapan (Othman *et al.*, 2021).

Sejatinya, koagulasi adalah proses kimia, dimana koagulan (misalnya, garam-logam terlarut, FeCl_3 atau $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ditambahkan ke dalam air limbah. Selanjutnya, terbentuklah sebuah massa gelatin atau gel yang berperan sebagai pengikat antar-partikel. Pengikatan partikel ini bertujuan untuk mengumpulkan partikel yang awalnya tersebar, lalu saling berikatan membentuk massa yang cukup besar, sehingga mudah terendapkan. Dalam air limbah, partikel koloid berada dalam kisaran 0,001 hingga 10 mikrometer. Partikel-partikel ini yang menentukan kadar kontaminan (misalnya kekeruhan dan warna) di dalam air limbah (Drogui *et al.*, 2022).

Proses koagulasi terjadi dalam tiga tahap secara berurutan. Tahapan tersebut adalah (Drogui *et al.*, 2022):

- 1) Kelarutan koagulan (koagulan dikelilingi oleh molekul air), dimana prekursor koagulan aktif terbentuk, karena oksidasi elektrolisis dari elektrode yang melebur atau terurai,
- 2) Destabilisasi partikel, dimana prekursor koagulan aktif akan mendestabilisasi kontaminan, suspensi partikulat, pemecahan campuran, dan
- 3) Tumbukan antar partikel, dimana agregat material yang tidak stabil membentuk *floc*. *Floc* yang memiliki massa lebih ringan akan terflotasi dan jika lebih berat akan tersedimentasi. Ketiga proses EC ini sesuai Gambar 1.



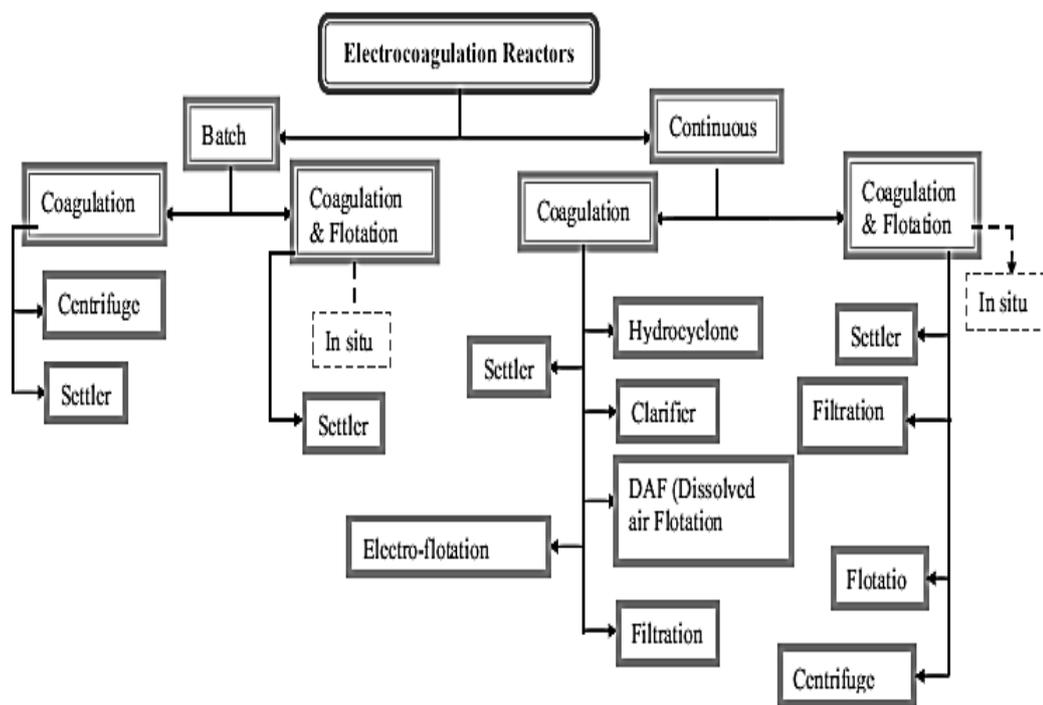
Gambar 1 Proses elektrokoagulasi (Drogui *et al.*, 2022)

2.2.1 Desain reaktor elektrokoagulasi

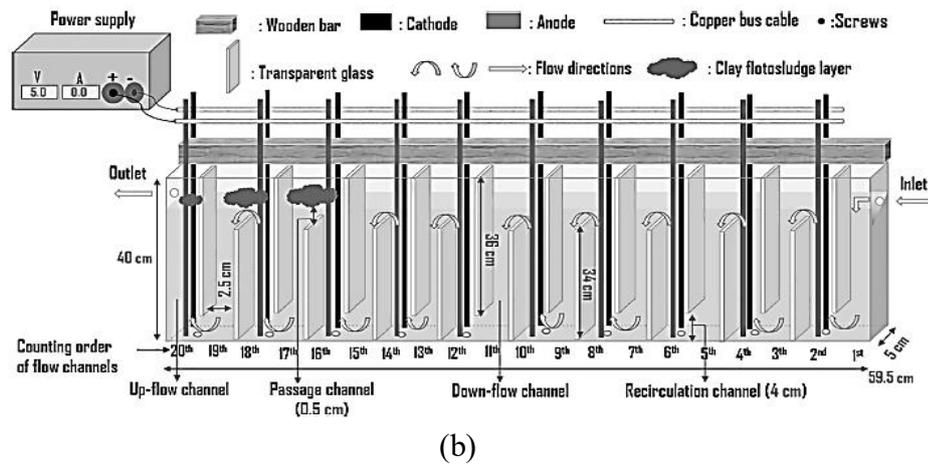
Geometri reaktor elektrokoagulasi adalah bentuk ruang dari alat pereaksi dan merupakan parameter operasioanal yang sangat penting. Urgensi dari geometri ini

karena pengaruhnya terhadap jenis aliran elektrolisis dan debit (laju aliran). Debit ditentukan oleh volume dan durasi pengolahan. Selain itu, berpengaruh juga terhadap pembentukan *floc*, gelembung, karakteristik campuran/endapan dan hasil penyisihan. Geometri reaktor elektrokoagulasi diklasifikasikan berdasarkan tiga perbedaan utama (Drogui *et al.*, 2022), yaitu:

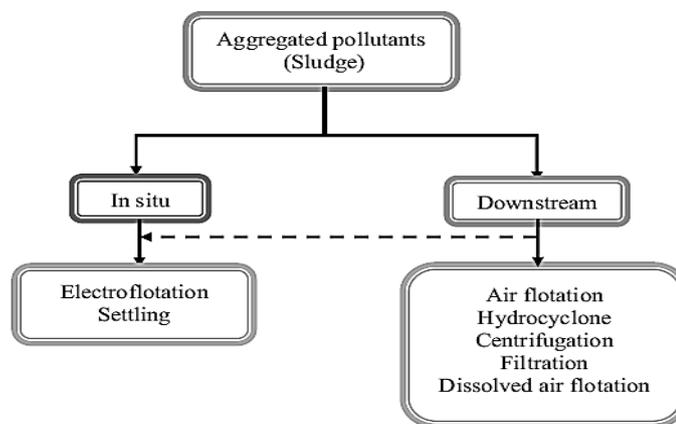
1. Konfigurasi reaktor: sistem *batch*, tanpa adanya aliran dari *inlet* ke *outlet* (seperti Gambar 1). Selain itu, ada pula sistem kontinu, yaitu adanya aliran dari *inlet* ke *outlet* dan terjadi proses pencampuran di dalamnya oleh sekat-sekat yang dibentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2b. Desain reaktor yang berkembang saat ini, yaitu *Continuous flow-single channel* (CFSC) atau aliran kontinu saluran tunggal (Ntambwe-Kambuyi *et al.*, 2022),
2. Mekanisme penyisihan kontaminan: flotasi dan lain sebagainya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2c. Biasanya, dalam proses elektrokoagulasi (*batch* atau kontinu) berlangsung lebih dari satu mekanisme penyisihan, selengkapnya ditunjukkan oleh Gambar 2a, dan
3. Geometri elektrode: umumnya sel pelat vertikal berbentuk persegi panjang.



(a)



(b)



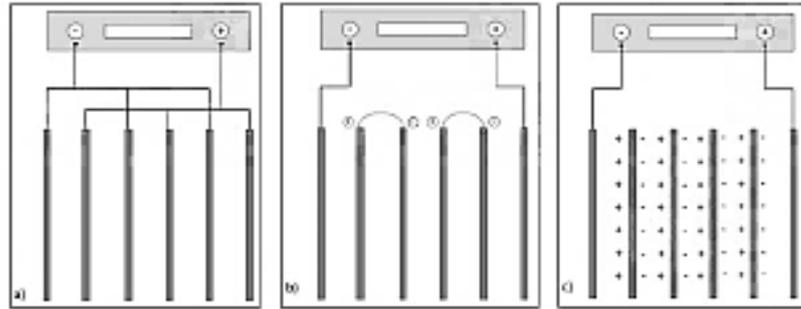
(c)

Gambar 2 Geometri elektrokoagulasi: (a) Proses pada jenis reaktor; (b) Desain reaktor aliran kontinu; (c) Mekanisme penyisihan reaktor (Drogui *et al.*, 2022)

2.2.2 Koneksi elektrode

Terdapat tiga rangkaian koneksi elektrode yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan polutan atau kontaminan (Hakizimana *et al.*, 2017) dalam (Drogui *et al.*, 2022) dan (Hayden, 2020), yaitu:

1. Monopolar-paralel (MP-P), dimana anode dan katode ditempatkan secara bergantian pada potensial yang sama,
2. Monopolar-seri (MP-S), dimana setiap pasangan anode-target bergabung secara internal tanpa saling berhubungan dengan elektrode luar, dan
3. Bipolar-seri (BP-S), dimana dua elektrode terluar (katode dan anode monopolar) terhubung ke suplai listrik dan elektrode-target berada di antara elektrode luar. Elektrode bagian dalam bersifat bipolar, sedangkan elektrode bagian luar bersifat monopolar. Hal ini sesuai dengan Gambar 3.



Gambar 3 Koneksi elektrode: (a) Monopolar-paralel; (b) Monopolar-seri; (c) Bipolar-seri (Hayden, 2020)

2.2.3 Produksi agen koagulasi listrik

Elektrokoagulasi menyebabkan pelarutan logam anode-target secara *insitu*. Pelarutan ini menghasilkan ion logam aktif yang bertindak sebagai agen koagulan. Reaksi elektrokimia (redoks) yang terjadi di anode dan katode seperti yang ditunjukkan di dalam kotak persamaan reaksi kimia oleh Gambar 4 (Canizares *et al.*, 2005).

| Metal electrodes | Condition | Reactions | | Overall reaction |
|-----------------------------------|-----------|---|--|--|
| | | Anode | Cathode | |
| Aluminum anode (mechanism 1 or 2) | Alkaline | $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$ | $3\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightarrow \frac{3}{2}\text{H}_2 + 3\text{OH}^-$ | $2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2$ |
| | Acid | $\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$ | | |
| Iron anode (Mechanism1) | Alkaline | $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$ | | |
| | Alkaline | $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ | $8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2$ | $4\text{Fe} + 10\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 4\text{H}_2$ |
| | Acid | $\text{Fe}^{2+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ | | |
| | Acid | $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 4\text{OH}^-$ | | |

Gambar 4 Reaksi redoks proses elektrokoagulasi (Canizares *et al.*, 2005)

2.2.4 Parameter energetik elektrokoagulasi

Pelarutan anode-target (Al atau Fe) dan pelepasan ion (Al^{3+} atau Fe^{2+}) bergantung pada suplai listrik (Liu *et al.*, 2010). Naje *et al.*, (2017) telah mencatat bahwa rapat arus merupakan parameter penting untuk menganalisis laju dosis

koagulan, laju pembentukan gelembung, ukuran, dan perkembangan *floc*. Pelarutan anode-target berbanding lurus dengan rapat arus. Jika rapat (densitas) arus meningkat melebihi nilai optimal, maka tidak ada efek pada efisiensi penyisihan kontaminan. Namun, kemungkinan besar energi listrik akan terbuang sia-sia atau terjadi pemborosan energi (Khaled *et al.*, 2019; Naje *et al.*, 2017).

2.2.5 Catu daya elektrokoagulasi

Umumnya, catu daya atau *power supply* (PS) yang digunakan dalam metode elektrokoagulasi adalah suplai arus searah atau *direct current* (DC) dibandingkan dengan *alternating current* (AC). Vasudevan *et al.*, (2011a) membandingkan catu daya AC dan DC dalam proses elektrokoagulasi untuk menghilangkan fluorida dari air. Kesimpulan yang diperoleh adalah efisiensi penyisihan ekuivalen. Selanjutnya, Vasudevan *et al.*, (2011b) mengevaluasi perbedaan antara catu daya AC dengan DC. Efisiensi penyisihan yang dicapai pun sebanding untuk parameter kadmium. Mansour dan Hasieb, (2012) juga mengamati penyisihan Ni(II) dan Co(II) pada air minum sintetis menggunakan catu daya AC. Efisiensi penyisihan yang dicapai lebih kecil. Menurut Khanitchaidecha *et al.*, (2022) penggunaan catu daya DC memungkinkan pengolahan air limbah menjadi lebih optimal. Penggunaan energi pun memungkinkan menjadi lebih rendah.

2.2.6 Pengaruh material elektrode

Elektrode aluminium (Al) dan besi (Fe) sering digunakan sebagai pilihan bahan elektrode dalam proses elektrokoagulasi. Material elektrode merupakan salah satu parameter operasional yang sangat penting untuk dipertimbangkan dalam proses elektrokoagulasi. Sebab, daya hantar listrik elektrode sangat ditentukan oleh material (bahan) elektrode itu sendiri (Kabdasli *et al.*, 2012; Khandegar dan Saroha, 2013; Naje *et al.*, 2017). Kobya *et al.*, (2003) menyatakan bahwa elektrode aluminium tampaknya lebih unggul dari elektrode besi untuk mengolah air limbah, khususnya bersumber dari usaha tekstil. Penggunaan elektrode aluminium sebagai bahan anode dapat meningkatkan kinerja penyisihan dibandingkan logam murni yang diamati (Vasudevan *et al.*, 2009a; 2009b; 2011c). Paduan aluminium dan zink (Al-Zn) mampu digunakan sebagai anode untuk mengolah air yang mengandung fosfat dan arsenat (Vasudevan *et al.*, 2010), kromium (Vasudevan *et al.*, 2011c) dan tembaga (Vasudevan dan Lakshmi, 2012).

2.2.7 Parameter operasional elektrokoagulasi

Beberapa parameter operasional dalam metode elektrokoagulasi yang penting untuk dipertimbangkan (Khandegar & Saroha, 2013; Naje *et al.*, 2017; Yilmaz *et al.*, 2008), yaitu:

1. Derajat keasaman atau pH, adalah parameter yang mempengaruhi konduktivitas larutan (*indirect*), pelarutan elektrode, spesiasi hidroksida, dan potensial zeta (muatan listrik antar-partikel koloid) dari spesies koloid,
2. Konduktivitas, yaitu parameter elektrokoagulasi yang erat kaitannya dengan katalisator efisiensi penyisihan kontaminan dan biaya pengoperasian (energi),
3. Waktu pengolahan, yaitu durasi optimal dalam kaitannya dengan efisiensi pengolahan yang dapat dicapai oleh proses elektrokoagulasi,
4. Jarak antar-elektrode, yaitu jarak antara anode (positif) dengan katode (negatif). Medan elektrostatik bergantung pada jarak antar-elektrode. Jarak antar-elektrode sama secara vertikal maupun horizontal, dan
5. Suhu atau derajat panas-dingin, dimana suhu larutan yang optimal dapat menyebabkan peningkatan perpindahan massa dan kinetika tumbukan partikel menjadi polimer hidroksida.

2.2.8 Kelebihan dan kekurangan elektrokoagulasi

Beberapa kelebihan dari metode elektrokoagulasi (Singh & Ramesh, 2013), yaitu:

1. Biaya operasional relatif rendah dibandingkan dengan metode konvensional,
2. Membutuhkan peralatan sederhana dan mudah dikontrol,
3. *Sludge* (lumpur-endapan) yang dihasilkan mudah dihilangkan (dibersihkan),
4. Flokulasi meningkat,
5. Laju filtrasi lebih tinggi,
6. Volume lumpur (residu) yang dihasilkan lebih rendah,
7. Penyisihan bahan organik lebih efektif dan cepat,
8. Total padatan terlarut yang dihasilkan lebih sedikit,
9. Efektif dalam menghilangkan partikel koloid terkecil,
10. Mampu menetralkan bahan kimia berlebih,
11. Evolusi gelembung gas memudahkan terjadinya penggumpalan, dan
12. Mudah dipasang sesuai lokasi (fleksibel dan *onsite*).

Selain itu, terdapat pula beberapa kekurangan dari metode elektrokoagulasi (Singh & Ramesh, 2013), yaitu:

1. Penggantian rutin elektrode,
2. Kurang memungkinkan pada lokasi biaya listrik yang relatif tinggi (mahal),
3. Rentan terjadi *pasivasi* elektrode, yaitu pembentukan lapisan oksida pada elektrode dan berpotensi menghambat proses,
4. Menghasilkan konsentrasi elektrode terlarut (residu) dalam air limbah,
5. Perancangan awal desain proses elektrokoagulasi harus dilakukan, karena tidak ada aturan baku terkait metode ini (*trial and error*),
6. Pengaruh pH, suhu, material elektrode harus dipertimbangkan sejak awal dan seoptimal mungkin,
7. Penambahan elektrolit yang berlebihan dapat menyebabkan korosi lebih cepat pada elektrode,
8. Terkadang hidroksida (agen koagulasi) cenderung larut atau tidak terjadi pengikatan dengan partikel kontaminan (stagnan), dan
9. Hasil laboratorium yang diperoleh dalam kondisi terkendali, terkadang sukar untuk diperluas ke skala besar karena pertimbangan biaya.

Secara substansial, kelebihan metode elektrokoagulasi masih lebih unggul dibandingkan dengan kekurangannya sendiri. Untuk mengetahui kinerja metode ini, maka dapat ditentukan dengan menghitung efisiensi penyisihan (Ef_{EC}) seperti pada Persamaan (1), dimana konsentrasi parameter air limbah (misalnya, COD, TSS, minyak-lemak dan lain sebagainya) yang diolah dan diuji menjadi indikator penting dalam persamaan ini (Benekos *et al.*, 2019), yaitu:

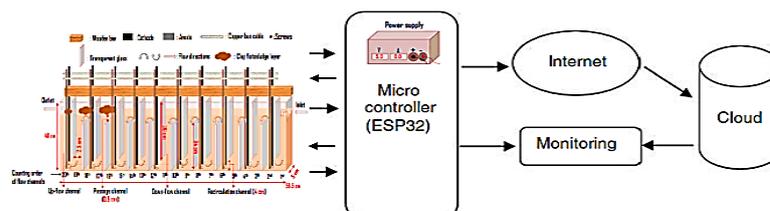
$$Ef_{EC}(\%) = \frac{\sum \frac{\text{konsentrasi awal} - \text{konsentrasi akhir}}{\text{konsentrasi awal}} \times 100}{\text{banyaknya parameter } (n)} \quad (1)$$

2.2.9 ` Sensor untuk mendukung pengolahan air limbah rumah makan

Internet of Things (IoT) atau sensor adalah paradigma yang bertujuan untuk memberikan kemampuan pemrosesan dan komunikasi ke objek fisik. Kemampuan ini berjalan melalui sensor dan aktuator yang terintegrasi dengan akses internet. Salah satu pendekatan atau strategi yang dilakukan untuk memantau kualitas air dan proses pengolahannya. Metode sensor atau IoT ini terbukti efektif, ramah

lingkungan dan biaya terjangkau (ekonomis) untuk beberapa sensor, serta mudah digunakan. Selanjutnya, munculnya gagasan tentang “Pemantauan (*Monitoring*) Kualitas Air menggunakan *Internet of Things*,” menyajikan konsep dan aplikasi sistem pemantauan kontaminan air atau air limbah, serta segala hal yang terkait dengan pengelolannya secara terkini (*real-time*) (Islam *et al.*, 2023).

Mekanisme IoT pada gagasan tersebut diterapkan sebagai pemantauan awal terhadap informasi kualitas air. Ini terekam melalui sensor yang berbeda untuk setiap parameter. Beberapa sensor yang umum digunakan adalah sensor pH, sensor suhu, dan sensor kekeruhan. Saat ini, dengan segala kemudahan akses teknologi, sensor-sensor tersebut telah tersedia secara komersial. Selain itu, terkait juga dengan kinerja proses elektrokoagulasi dalam pengolahan air limbah, teknologi sensor dapat diaplikasikan untuk memantau parameter arus dan tegangan, Gambar 5 adalah contoh penerapan IoT dalam bentuk sensor catu daya pada reaktor elektrokoagulasi aliran kontinu saluran Tunggal (CFSC). Secara umum, integrasi proses ini dapat dibagi menjadi tiga bagian utama (alur proses), yaitu pengumpulan data, pemrosesan dan pemantauan. Pada proses elektrokoagulasi, data secara *real-time* dikumpulkan melalui sensor catu daya. Data terkumpul saat *relay* (saklar arus dan tegangan) dibuka (*on process*), juga saat proses pengolahan (elektrolisis) berlangsung di dalam reaktor elektrokoagulasi kontinu. Semua perangkat, termasuk sensor terhubung ke sebuah mikrokontroler melalui PIN koneksi oleh Arduino-UNO (ESP32). Model ESP32 (sensor induk/utama) ini seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6. Mikrokontroler ini mentransfer data melalui komunikasi WiFi (*Wireless Fidelity*) (Islam *et al.*, 2023). Data yang tersimpan dalam *cloud*, kemudian dimunculkan pada tampilan layar aplikasi android (perangkat lunak, misalnya di *handphone* atau laptop) untuk memudahkan pemantauan (*monitoring*). Data hasil pantauan ini direkam dan dianalisis lebih lanjut. Kualitas data menggunakan teknologi sensor mendukung analisis yang optimal (Triadi *et al.*, 2023).



Gambar 5 Integrasi sensor catu daya dengan reaktor aliran kontinu (Islam *et al.*, 2023; Ntambwe-Kambuyi *et al.*, 2022; Triadi *et al.*, 2023)



Gambar 6 Model ESP32 dan koneksi PIN penghubung ke sensor cabang lainnya (ditunjukkan oleh berbagai kotak warna) (Triadi *et al.*, 2023)

2.3 Regresi Linear

Pada uji regresi, variabel dibedakan menjadi dua bagian yaitu variabel respon, variabel bergantung (*dependent variable*) atau observasi, dan variabel penjelas, variabel penduga (prediktor), atau variabel bebas (Wohon dkk., 2017). Regresi linier terbagi atas dua jenis, yaitu regresi linier sederhana dan berganda. Regresi linier sederhana merupakan uji regresi linier yang terdiri dari satu variabel observasi (Y) dan satu variabel prediktor (X), sedangkan regresi linier berganda memiliki lebih dari satu variabel prediktor. Metode ini membantu analisis ketergantungan atau pengaruh sebab-akibat oleh variabel observasi terhadap dua atau lebih prediktor (Wohon dkk., 2017). Secara umum, uji regresi linear dapat juga didefinisikan dengan suku-suku galat yang terdistribusi normal seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2):

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \quad (2)$$

Dimana, Y adalah variabel terikat (observasi). Selain itu, untuk X_1, X_2, \dots, X_n merupakan variabel bebas (prediktor). A adalah konstanta, dan B_1, B_2, \dots, B_n adalah koefisien regresi (Kewan, 2015) dalam (Rajalau, 2020).

Selanjutnya, di dalam uji regresi terdapat koefisien determinasi, signifikansi (*p-value*, batas nilai 0,05), metode uji terbaik dari regresi (metode *stepwise*), dan *root mean square error* (RMSE). Koefisien determinasi atau *R-Square* (R^2) merupakan koefisien yang berperan untuk mengetahui ketepatan, kesesuaian atau kecocokan garis regresi yang terbentuk dalam merepresentasikan kelompok data hasil observasi, sehingga penting untuk diketahui kinerja model atau hasil uji yang

terbentuk mampu menjelaskan kondisi yang sebenarnya (nyata). Nilai koefisien determinasi merupakan suatu standar yang menunjukkan besar kontribusi dari variabel prediktor terhadap observasi (Wohon, dkk. 2017; Harel, 2009). Persamaan (3) merupakan persamaan umum dari *R-Square* (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Jumlah Kuadrat Galat (SSR)}}{\text{Jumlah Kuadrat Total (SST)}} \quad (3)$$

Kemudian, input data observasi yang lebih banyak ke dalam model atau uji selalu akan menaikkan nilai R^2 (tidak terjadi kondisi penyusutan nilai). Oleh karena itu, dibutuhkan koefisien determinasi terkoreksi atau tersesuaikan (*adjusted coefficient determination*), dilambangkan oleh $(R^2)_{adj}$ mengoreksi R^2 dengan cara membagi setiap jumlah kuadrat dalam formula R^2 dengan derajat bebasnya (jumlah data dan probabilitasnya) masing-masing (Wohon, dkk. 2017; Halide, 2000). Persamaan (4) merupakan persamaan umum dari *adjusted R-Square* $(R^2)_{adj}$:

$$(R^2)_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \left(\frac{SSR}{SST} \right) \quad (4)$$

Dimana, n adalah ukuran sampel (jumlah data observasi), p adalah jumlah estimasi parameter di dalam model. $(R^2)_{adj}$ dimaksudkan untuk mereduksi bias pada Nilai R^2 . Oleh karena itu, nilai $(R^2)_{adj}$ selalu lebih kecil dari R^2 . Berbagai persamaan statistik regresi ini secara umum terdapat pada berbagai publikasi dan aplikasi (*software*, SPSS dan Matlab) terkait (Rajalau, 2020). Selanjutnya, metode regresi *stepwise* (bertahap) adalah kombinasi dari metode regresi *forward selection* atau seleksi maju dan *backward elimination* atau eliminasi mundur. Metode *stepwise* bertujuan untuk memilih model langkah demi langkah, menambah atau menghapus satu prediktor berdasarkan signifikansi statistik. Hasil dari proses ini adalah model regresi tunggal terbaik. Seleksi variabel maju adalah memasukkan variabel dalam model satu per satu berdasarkan kriteria masuk. Sedangkan, eliminasi variabel mundur memasukkan semua variabel, kemudian menghapusnya satu per satu berdasarkan kriteria penghapusan (Alexopoulos, 2010) dalam (Rajalau, 2020). Kemudian, *root mean square error* (RMSE) atau kesalahan (penyimpangan) kuadrat dari akar rata-rata antara elemen (nilai) yang sesuai dari data prediktor dan observasi. RMSE ini berguna untuk mengukur tingkat akurasi dari uji regresi yang ditunjukkan oleh Persamaan (5):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Dimana, X_i dan Y_i masing-masing adalah prediksi dan observasi ke- i (dimana $i = 1, 2, \dots, n$) dan n adalah banyaknya pengamatan. RMSE dapat bernilai (0) sampai (∞). Semakin kecil atau mendekati nol nilai RMSE, maka semakin baik (pengaruh antara prediktor terhadap observasi) (Halide, 2009; Jim, 2023).

2.4 Komparasi Riset Elektrokoagulasi

Berikut ini adalah komparasi (matriks) riset spesifik terkait dengan kemutakhirannya selama lima tahun terakhir (Scholar, 2023):

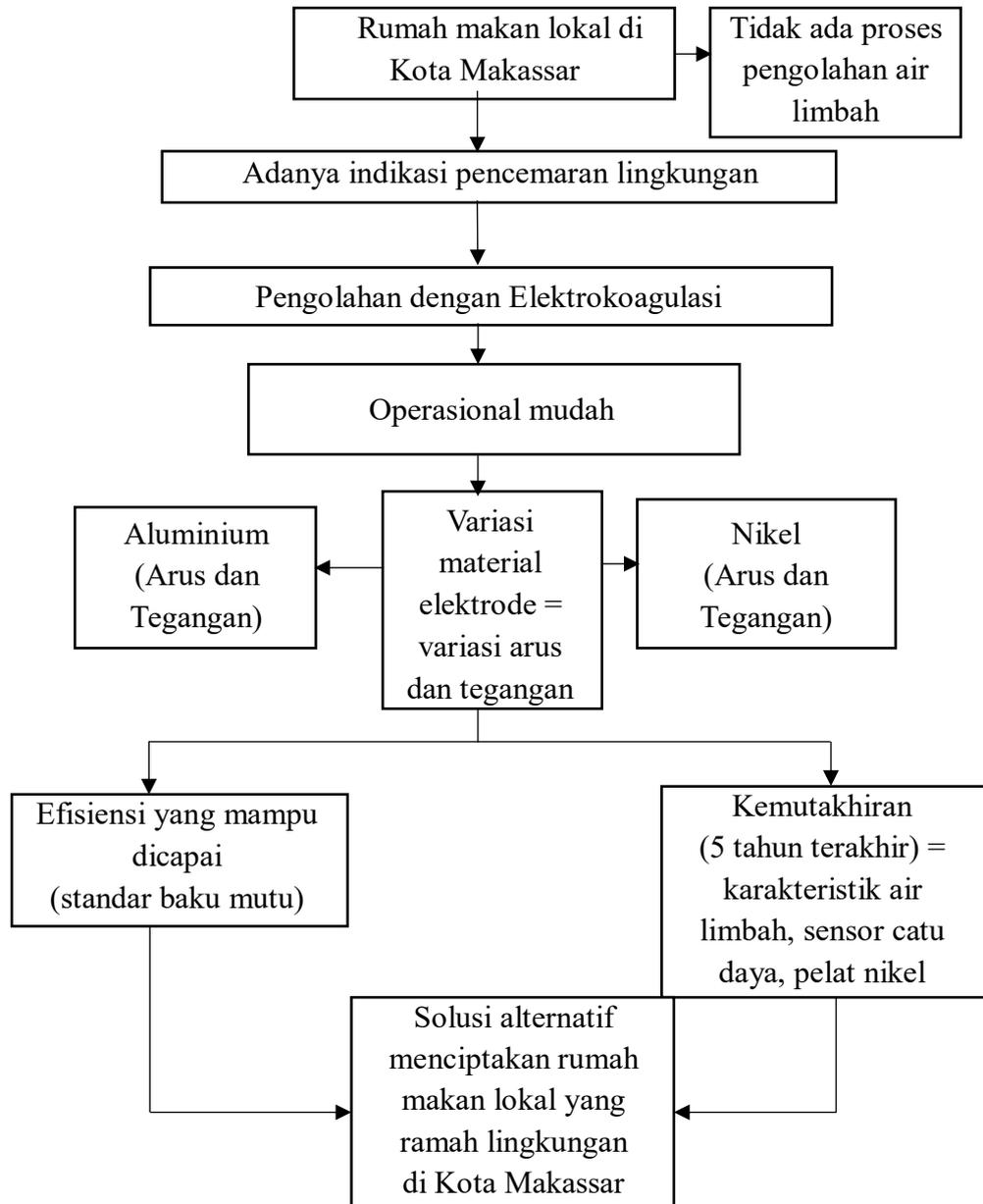
Tabel 1 Perbedaan pokok antara riset sebelumnya dengan saat ini

| Penulis, Tahun | Jenis (Desain) Reaktor | Material Elektrode, Efisiensi penyisihan | Catu daya/power supply/power source (PS) | Sumber Air (Limbah)/ Negara |
|--|---|---|---|--|
| **Temitope & Abayomi, 2020 | <i>Batch</i> | Karbon, (53,6%) - *2 parameter | DC power source (30V/40A) | Rumah makan/ Nigeria |
| **El-Ezaby, et al., 2020 | <i>Batch</i> | Aluminium (61,1%) - *7 parameter | DC power source (18V/1A) | Rumah makan/ Mesir |
| **Khanitchai- decha et al., 2022* | <i>Continuous</i> | Aluminium (89,5%) - *2 parameter | DC power source (12V/45A) | Rumah makan/ Thailand |
| **Hayden, 2020 | <i>Continuous- manifold</i> | Aluminium (74,4%) - *1 parameter | DC power source (60V/8A) | Domestik/ Kanada |
| **Ntambwe- Kambuyi et al., 2022 | <i>Continuous flow single channel</i> | Aluminium (52,2%) - *1 parameter | DC power source (24V/-) | Air permukaan/ Maroko |

| Penulis, Tahun | Jenis (Desain) Reaktor | Material Elektrode, Efisiensi penyisihan | Catu daya/power supply/power source (PS) | Sumber Air (Limbah)/ Negara |
|---------------------------------|--|---|---|--|
| **Al-Raad et al., 2019 | <i>Batch</i> | Aluminium (91,5%) - *2 parameter | DC power source (40V/6A) | Air laut/ Iraq |
| **Benekos et al., 2019 | <i>Batch</i> | Aluminium (63,9%) dan Besi (56,4%) - *2 parameter | DC power source (30V/5A) | Pengolahan minyak zaitun/ Yunani |
| **Nugroho et al., 2019 | <i>Continuous</i> | Aluminium (69,5%) - *2 parameter | DC power source (30V/30A) | Air sungai/ Indonesia |
| **Phan et al., 2019 | <i>Batch</i> | Aluminium dan Titanium (93%) - *1 parameter | DC power source (-) | Pengolahan kopi/ Vietnam |
| **Preethi et al., 2019 | <i>Batch-box behnken</i> | Aluminium (70,8%) - *1 parameter | DC power source (30V/5A) | Kilang minyak nabati/ India |
| Rajalau, 2023 (saat ini) | <i>Modified-continuous flow single channel</i> | Aluminium, (81,6%,) & Nikel, (31,1%) - *5 parameter | DC-Lead Acid Battery (12V/7,5A) sensor (IoT)- Arduino ESP32 | Rumah Makan Lokal di Kota Makassar/ Indonesia |

Ket.: (*) = Misalnya, COD, minyak-lemak, TSS, BOD, amonia. (**) = Data review dari Google Scholar (2018-2023), kata-kunci: *Application of Electrocoagulation in Restaurant Wastewater* (909 hasil). Diakses 05-06-2023.

2.5 Kerangka Pemikiran Penelitian Elektrokoagulasi untuk Air Limbah Rumah Makan Lokal di Kota Makassar



Gambar 7 Kerangka pemikiran penelitian