

Studi Pustaka: Teknologi Pengolahan Air Limbah pada Industri Penyamakan Kulit

Yusita Mega Kuncoro dan Eddy Setiadi Soedjono

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: soedjono@enviro.its.ac.id

Abstrak—Industri penyamakan kulit merupakan salah satu industri di Indonesia yang mengalami peningkatan cukup pesat dan keberadaannya didominasi wilayah Magetan, Garut, dan Yogyakarta. Air limbah penyamakan kulit mengandung polutan organik dan kimia dengan kuantitas besar, serta termasuk limbah berbahaya dan beracun. Sebagian besar air limbah industri kecil penyamakan kulit belum dilakukan pengolahan dan langsung dibuang ke badan air. Adapun industri penyamakan lainnya yang telah memiliki Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), namun terdapat kualitas efluen air limbah yang masih tinggi dan melebihi baku mutu. Berdasarkan permasalahan yang ada, diperlukan kajian pustaka mengenai teknologi pengolahan yang tepat dalam mengolah air limbah penyamakan kulit. Dalam mendukung pembahasan mengenai penentuan teknologi pengolahan, diperlukan analisis karakteristik air limbah dari beberapa industri penyamakan kulit berdasarkan klasifikasi skala industri, kemudahan operasional, dan biaya investasi. Karakteristik air limbah penyamakan kulit dikelompokkan dalam tiga skala industri, diantaranya industri skala kecil, besar, dan klaster. Studi kasus yang digunakan dalam studi ini, yaitu industri skala kecil Kamila Leather, skala besar PT. Adi Satria Abadi, dan skala klaster LIK Magetan. Debit yang dihasilkan dari ketiga industri memiliki nilai beragam, diantaranya industri kecil sebesar 3 m³/hari, industri besar sebesar 61,83 m³/hari, dan industri klaster sebesar 594,4 m³/hari. Terdapat sepuluh teknologi pengolahan yang telah digunakan pada industri penyamakan kulit, salah satunya *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) yang paling banyak digunakan. Dari hasil analisis perbandingan teknologi pengolahan, didapatkan rekomendasi teknologi pengolahan yang tepat untuk ketiga skala industri, diantaranya industri kecil menggunakan unit adsorpsi, industri besar menggunakan tambahan unit wetland, dan industri klaster menggunakan tambahan unit adsorpsi.

Kata Kunci—Air Limbah, Industri Penyamakan Kulit, Skala Industri, Teknologi Pengolahan.

I. PENDAHULUAN

INDUSTRI penyamakan kulit merupakan industri yang mengolah kulit mentah menjadi kulit tersamak (*leather*) [1]. Proses penyamakan kulit terdiri dari tiga tahapan proses utama, yaitu pra-penyamakan (*beamhouse*), penyamakan (*tanning*), dan pasca penyamakan (*posttanning*) [2]. Tujuan dilakukannya penyamakan, yaitu untuk mengubah sifat-sifat kulit mentah yang mudah mengalami kerusakan menjadi kulit tersamak yang tahan terhadap aktifitas mikroorganisme dan pembusukan [3]. Dalam proses penyamakan, bahan baku yang digunakan adalah kulit hewan, seperti sapi, kerbau, kambing, maupun domba [4].

Industri penyamakan kulit termasuk salah satu industri penghasil limbah cair dengan kuantitas besar. Hal tersebut dikarenakan dalam proses penyamakan 1 ton kulit mentah menghasilkan air limbah sebesar 30-35 m³ [5]. Air limbah tersebut mengandung berbagai polutan organik yang berasal

dari bahan baku dan polutan kimia dari bahan pembantu proses produksi [6]. Bahan kimia yang digunakan dalam proses produksi, seperti kapur, natrium sulfida, ammonium sulfat, garam dapur, asam sulfat, dan krom [3]. Dalam proses penyamakan, kulit hanya mampu menyerap larutan kromium sulfat sekitar 60% hingga 70% dan sisanya akan terbawa dalam limbah cair sehingga limbah krom termasuk limbah yang paling banyak dihasilkan dari proses penyamakan [7].

Air limbah industri penyamakan kulit termasuk ke dalam limbah berbahaya dan beracun bagi lingkungan. Hal tersebut dikarenakan air limbah dari proses produksi mengandung zat kimia yang bersifat toksik dan karsinogenik, seperti sulfida, amonia, dan krom heksavalen (Cr⁶⁺) [8]. Tingkat keparahan toksisitas logam berat terhadap kesehatan sangat bervariasi dan tergantung pada parameter yang bervariasi. Paparan penyakit dapat menimbulkan bahaya yang signifikan bagi kesehatan ekosistem, terutama manusia dan hewan [9]. Berdasarkan salah satu penelitian, air limbah yang dihasilkan dari proses produksi penyamakan kulit memiliki nilai TSS sebesar 409 mg/L, BOD₅ sebesar 301 mg/L, dan COD sebesar 1.004 mg/L [10]. Konsentrasi zat organik yang tinggi menunjukkan bahwa kandungan organik dalam air limbah penyamakan kulit sulit terurai [11].

Kebanyakan industri penyamakan kulit termasuk skala kecil sehingga air limbah yang dihasilkan dari proses produksi belum dilakukan pengolahan. Adapun air limbah industri penyamakan kulit skala besar maupun klaster telah dilakukan pengolahan melalui Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), namun konsentrasi air limbah yang dihasilkan masih cukup tinggi dan melebihi baku mutu. Apabila limbah tersebut disalurkan ke badan air, dapat berpotensi mencemari lingkungan dan memberikan dampak buruk terhadap kehidupan manusia maupun makhluk hidup lainnya terutama biota perairan. Dari permasalahan tersebut, perlu adanya teknologi pengolahan yang tepat dalam mengolah air limbah yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit. Dalam menentukan teknologi pengolahan yang tepat harus berdasarkan karakteristik air limbah, klasifikasi skala industri, serta mempertimbangkan kinerja, biaya, operasional dan *maintance* dari masing-masing pengolahan.

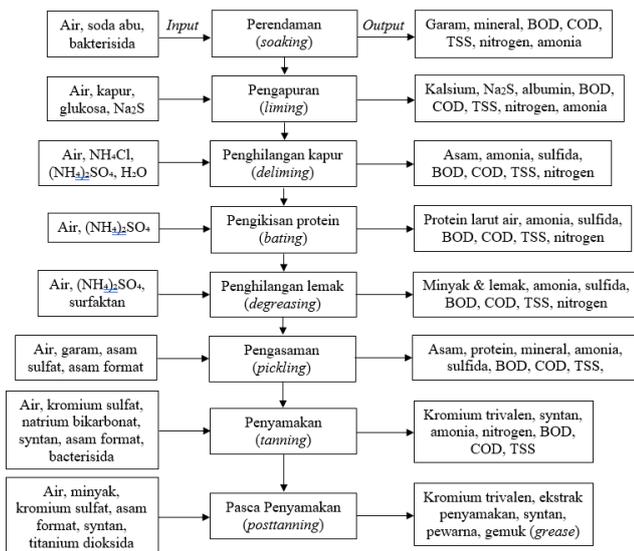
II. AIR LIMBAH PENYAMAKAN KULIT

A. Air Limbah Proses Produksi Penyamakan Kulit

Proses penyamakan kulit terdiri dari tiga tahapan [2], diantaranya:

1. Pra-Penyamakan (*Beamhouse*)

Proses pra-penyamakan dilakukan untuk mempersiapkan kulit segar atau mentah menjadi kulit piket yang siap untuk



Gambar 1. Diagram alir proses produksi penyamakan kulit. disamak menggunakan bahan penyamak [12]. Dalam proses ini terdapat beberapa tahapan, diantaranya: (1) perendaman (*soaking*) merupakan tahapan awal dalam proses pra-penyamakan yang bertujuan untuk menghilangkan kotoran, darah, larutan garam, dan protein terlarut yang masih menempel pada kulit, (2) pengapuran (*liming*) bertujuan untuk menghilangkan bulu dan bagian kulit yang tidak diperlukan dalam proses penyamakan, (3) penghilangan kapur (*deliming*) merupakan proses penghilangan kapur dengan menggunakan bahan kimia asam lemah (*latic acid*) untuk menghilangkan kapur yang terdapat pada kulit dan mengembalikan ukuran kulit setelah terjadinya pembengkakan [4], (4) pengikisan protein (*bating*) merupakan tahapan yang terintegrasi dengan proses deliming [8], (5) pengikisan lemak bertujuan untuk menghilangkan minyak dan lemak alami yang berlebih pada kulit [13], dan (6) pengasaman (*pickling*) bertujuan untuk mengawetkan kulit mentah sebelum persiapan proses penyamakan [4].

2. Penyamakan (*Tanning*)

Penyamakan (*Tanning*) merupakan proses inti penyamakan kulit menggunakan bahan penyamak, yaitu krom sulfat yang bertujuan untuk menstabilkan jaringan protein (collagen) dari kulit sehingga kulit mengalami perubahan sifat fisik, mekanik, kimia, dan biologi [8], [14]. Penggunaan air dan bahan kimia dalam proses ini ditambahkan secara bertahap (*batch*). Kulit yang telah melewati proses penyamakan ini akan resisten terhadap bakteri, serta suhu tinggi [4].

3. Pasca Penyamakan (*Posttanning*)

Pasca Penyamakan (*Posttanning*) merupakan tahapan terakhir dalam penyamakan kulit yang bertujuan untuk menyempurnakan kulit samak yang telah terbentuk [12]. Dalam proses ini terdapat beberapa tahapan, antara lain: (1) *pressing (sammying)* bertujuan untuk menghilangkan kelembapan kulit segar, serta menghasilkan limbah cair yang sama dengan proses penyamakan [2], (2) penyamakan sekunder (*retanning*) bertujuan untuk menyempurnakan penyamakan pada kulit sehingga kulit yang dihasilkan lebih resisten terhadap kerusakan, (3) pewarnaan (*dyeing*) merupakan proses pewarnaan dasar pada kulit samak, dan

Tabel 1. Baku mutu air limbah industri penyamakan kulit.

Parameter	Satuan	Baku Mutu
BOD ₅	mg/L	50
COD	mg/L	110
TSS	mg/L	60
Krom Total (Cr)	mg/L	0,60
Minyak dan Lemak	mg/L	5,0
Nitrogen Total (N)	mg/L	10
Amonia Total (NH ₃ -N)	mg/L	0,5
Sulfida	mg/L	0,8
pH	-	6,0 – 9,0

(4) peminyakan (*fatliquoring*) merupakan tahapan terakhir yang merupakan proses perminyakan pada kulit samak menggunakan minyak-minyak emulsi dengan tujuan untuk menjaga kelembapan kulit dan memberikan efek lentur [8].

Adapun diagram alir proses produksi penyamakan kulit beserta input dan output dari masing-masing tahapan proses pada (Gambar 1).

B. Baku Mutu Air Limbah Industri Penyamakan Kulit

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014, baku mutu air limbah adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau dilepas ke dalam media air dari suatu usaha dan/atau kegiatan [15]. Baku mutu air limbah industri penyamakan kulit mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha/dan atau Kegiatan Industri Penyamakan Kulit. Baku mutu air limbah industri penyamakan kulit diberikan pada Tabel 1.

III. METODE PENULISAN

A. Umum

Metode penulisan studi ini dilakukan dengan mengkaji literatur dan menerapkannya dalam bentuk studi kasus yang berkaitan dengan topik yang diambil. Tahap pencarian pustaka terkait ide pokok bahasan menggunakan berbagai *platform*, meliputi *publish or perish*, *google scholar*, *science direct*, *research gate*, maupun *mendeley*. Adapun sumber literatur lainnya yang digunakan, seperti prosiding ilmiah, buku teks, laporan penelitian, skripsi, tesis, dan disertasi.

B. Kerangka Studi

Kerangka studi disusun untuk mengetahui tahapan kegiatan yang dilakukan selama pelaksanaan studi agar berjalan secara sistematis dan terarah. Tahapan dalam kerangka studi dimulai dari asal usul ide studi yang diperoleh berdasarkan kondisi eksisting dan permasalahan yang ada, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan rumusan masalah dan tujuan studi, pengumpulan hingga pengolahan data, analisis pembahasan secara mendalam mengenai karakteristik air limbah yang dihasilkan dari proses produksi penyamakan kulit berdasarkan klasifikasi skala industri yang terbagi ke dalam 3 tiga, yaitu skala kecil, besar, dan klaster. Kemudian, mengkaji pengolahan air limbah yang telah digunakan di berbagai industri penyamakan kulit. Setelah itu, dilakukan penentuan teknologi yang tepat dan

diterapkan pada ketiga studi kasus yang telah dipilih agar sesuai dengan tujuan studi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Profil Industri Penyamakan Kulit

Industri penyamakan kulit telah tersebar di berbagai wilayah Indonesia, terutama di Pulau Jawa, meliputi Provinsi Jawa Timur, Jawa Tengah, Jawa Barat, Banten, DI Yogyakarta, dan DKI Jakarta. Sebagian besar industri penyamakan kulit berada di wilayah Kabupaten Magetan dan Garut yang kebanyakan tergolong industri kecil atau rumahan. Kedua wilayah tersebut terdapat kawasan khusus sebagai tempat berkumpulnya para penyamak kulit yang disebut dengan Lingkungan Industri Kulit (LIK) Magetan dan Kawasan Industri Kulit Sukaregang Garut.

B. Industri Penyamakan Kulit Skala Kecil

Kamila *Leather* merupakan salah satu industri penyamakan kulit skala kecil yang berlokasi di Sukaregang Garut. Industri ini termasuk dalam golongan usaha kecil mikro dengan rata-rata jumlah pekerja sebanyak 6 orang dan menghasilkan debit air limbah yang cukup kecil sebesar 3 m³/hari. Industri Kamila Leather ini tidak memiliki teknologi pengolahan sehingga air limbah yang dihasilkan dari proses produksinya langsung dibuang ke badan air terdekat di sekitar wilayah Sukaregang Garut yang disebut sebagai anak Sungai Ciwalen dan Cigulampeng. Kedua anak sungai tersebut nantinya akan bermuara ke Sungai Cimanuk [10], [16].

Konsentrasi air limbah influen yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit Kamila *Leather* ini memiliki nilai krom total, minyak dan lemak, amonia total, dan sulfida yang tergolong rendah dikarenakan telah memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan. Berbeda dengan nilai konsentrasi pada parameter BOD₅, COD, dan TSS sebesar 301 mg/L, 1004 mg/L, dan 409 mg/L yang tergolong cukup tinggi dan melebihi baku mutu sebesar 50 mg/L, 110 mg/L, dan 60 mg/L. Ketiga parameter tersebut yang memiliki konsentrasi tinggi menunjukkan bahwa kandungan zat organik yang digunakan dalam proses produksi penyamakan kulit cukup banyak dan sulit terdegradasi. Penyumbang nilai BOD dan COD terbanyak berasal dari proses pengapuran dengan nilai masing-masing sebesar 70% dan 55%. Bukan hanya ketiga parameter yang tidak memenuhi baku mutu, melainkan terdapat parameter pH yang memiliki nilai sebesar 3,6 sehingga air limbah yang dihasilkan dalam kondisi asam. Nilai pH tersebut tidak sesuai dengan nilai ambang batas baku mutu antara 6-9 [10].

C. Industri Penyamakan Kulit Skala Besar

PT. Adi Satria Abadi merupakan salah satu industri penyamakan kulit skala besar yang memiliki luas lahan ± 10.000 m² dengan luas bangunan bertingkat ± 19.600 m² dengan jumlah pekerja yang dimiliki sebanyak 150 orang. Industri ini berlokasi di Kawasan Industri Piyungan (KIP), Dusun Banyak, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Jumlah bahan baku yang digunakan dalam proses produksi penyamakan kulit industri PT. Adi Satria Abadi ini sebanyak 1311 kg kulit per hari atau 1,3 ton kulit per hari dengan menghasilkan debit rata-rata air limbah sebesar

61,83 m³/hari [17-18].

Konsentrasi air limbah influen yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit PT. Adi Satria Abadi setelah dilakukan pengolahan melalui IPAL mengalami penurunan dengan nilai konsentrasi BOD₅, krom total, minyak dan lemak, amonia total, sulfida, dan pH tergolong rendah dikarenakan telah memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan. Berbeda dengan nilai konsentrasi pada parameter COD dan TSS masih tergolong cukup tinggi, yaitu sebesar 525 mg/L dan 93 mg/L sehingga kedua parameter tersebut melebihi baku mutu yang telah ditetapkan sebesar 110 mg/L dan 50 mg/L [13].

D. Industri Penyamakan Kulit Skala Klaster

Industri skala klaster merupakan industri yang berada di dalam satu kawasan dengan berbagai macam jenis industri dan memiliki jumlah pekerja yang berbeda-beda untuk setiap industrinya, salah satu contohnya yaitu Lingkungan Industri Kulit (LIK). LIK adalah sebuah tempat berkumpulnya komunitas penyamak untuk melakukan aktifitas penyamakan serta sebagai tempat berlangsungnya proses kemitraan antara komunitas penyamak dengan UPT Industri Kulit dan Produk Kulit Magetan [19]. Komunitas penyamak yang tergabung dalam LIK sebanyak 35 industri kecil penyamakan kulit. Lokasi LIK berada di Dusun Tulung, Desa Ringinagung, Kecamatan Magetan, Kabupaten Magetan dengan luas lahan sebesar 4 hektar yang terdiri dari 2 hektar untuk UPT Industri Kulit dan Produk Kulit Magetan sebagai tempat operasional IPAL dan pelayanan jasa bagi para penyamak kulit, serta 2 hektar untuk lokasi komunitas penyamak [20].

UPT Industri Kulit dan Produk Kulit Magetan memiliki jumlah pekerja sebanyak 36 orang dengan jumlah baku yang digunakan dalam proses produksi sebanyak 0,4 ton/hari kulit. Sementara 35 industri kecil menggunakan bahan baku kulit dalam proses produksinya sebanyak 8 ton/hari sehingga dapat diketahui bahwa setiap industri kecil (IKM) rata-rata membutuhkan bahan baku kulit sekitar 0,2 ton/hari. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) berada di lokasi UPT Industri Kulit dan Produk Kulit Magetan dengan kapasitas pengolahan sebesar 600 m³/hari. Debit total air limbah yang dihasilkan sebesar 594,4 m³/hari [20].

Konsentrasi air limbah influen yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit LIK Magetan setelah dilakukan pengolahan melalui IPAL memiliki nilai konsentrasi krom total, minyak dan lemak, sulfida, dan pH yang tergolong rendah dikarenakan telah memenuhi baku mutu. Berbeda dengan nilai konsentrasi pada parameter BOD₅, COD, TSS, dan amonia total yang masih tergolong cukup tinggi, yaitu sebesar 56,31 mg/L, 178,4 mg/L, 80 mg/L, dan 0,7356 mg/L. Nilai konsentrasi keempat parameter tersebut melebihi standar baku mutu yang telah ditetapkan sebesar 50 mg/L, 110 mg/L, 60 mg/L, dan 0,5 mg/L [15].

E. Analisis Karakteristik Air Limbah Berdasarkan Skala Industri Penyamakan Kulit

Karakteristik air limbah yang dihasilkan dari proses produksi penyamakan kulit terdiri dari organik dan anorganik. Hubungan antara BOD dan COD mempengaruhi proses pengolahan air limbah. Nilai COD akan selalu lebih tinggi dari BOD karena COD mengukur zat yang teroksidasi secara kimia dan biologis [21]. Nilai BOD dan COD yang

cukup tinggi dan melebihi baku mutu, dapat diketahui bahwa terdapat indikasi pencemar bahan organik [22]. Kemampuan untuk menguraikan bahan pencemar (*biodegradability*) dapat ditentukan dengan menggunakan rasio BOD/COD. Semakin tinggi nilai rasio BOD/COD maka semakin rendah biodegradabilitas dari air buangan [23]. Rasio BOD/COD berkisar antara 0,3 hingga 0,8, di mana rasio BOD/COD $\geq 0,5$ didefinisikan sebagai air limbah yang mudah terdegradasi (terurai) sehingga dapat diolah menggunakan proses biologi. Sementara rasio BOD/COD $< 0,3$ didefinisikan sebagai air limbah yang tidak dapat terdegradasi (terurai) sehingga untuk pengolahannya tidak menggunakan proses biologis karena memungkinkan terdapat banyak senyawa racun yang dapat membunuh bakteri sehingga air limbah tersebut dapat diolah secara fisik-kimia [24].

Besar kecilnya debit air limbah yang dihasilkan dari setiap industri tergantung pada banyaknya bahan baku yang digunakan. Adapun perbedaan debit air limbah yang dihasilkan dari ketiga skala industri penyamakan kulit, diantaranya industri skala kecil sebesar 3 m³/hari, skala besar sebesar 61,83 m³/hari, dan skala klaster sebesar 594,4 m³/hari. Sementara besar kecilnya nilai konsentrasi tergantung dari jenis, kandungan, dan jumlah dari bahan baku utama maupun pendukung yang digunakan. Adapun perbedaan jumlah bahan baku kulit yang digunakan dalam proses produksi dari ketiga skala industri penyamakan kulit, diantaranya industri skala kecil sebanyak 0,1 ton/hari, skala besar sebanyak 1,3 ton/hari, dan skala klaster sebanyak 8,4 ton/hari. Selain itu, alat proses produksi juga berpengaruh terhadap kualitas air limbah yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit. Alat yang digunakan terbagi menjadi dua proses, yaitu secara otomatis dan manual. Proses produksi yang dilakukan secara otomatis menggunakan alat mesin penyamakan kulit sehingga proses pengolahannya dioperasikan sesuai perlakuan dari operator mesin. Sementara proses produksi secara manual menggunakan tenaga manusia sehingga dilakukan sesuai perlakuan dari pekerja dan hasil produksinya sangat bergantung pada kemampuan dari pekerja.

F. Teknologi Pengolahan Air Limbah di Berbagai Industri Penyamakan Kulit

Saat ini, telah banyak industri penyamakan kulit yang menerapkan dan menggunakan teknologi pengolahan air limbah dengan berbagai metode. Setiap teknologi pengolahannya memiliki kemampuan dalam menyisihkan parameter air limbah yang berbeda-beda. Hal tersebut berdasarkan nilai efisiensi removal setiap teknologi pengolahan yang memiliki nilai beragam sehingga kemampuan dalam menyisihkan setiap parameter air limbah penyamakan kulit berbeda-beda. Terdapat berbagai macam teknologi pengolahan yang telah digunakan di berbagai industri penyamakan kulit, diantaranya:

1. Adsorpsi

Adsorpsi merupakan salah satu tahap pengolahan tersier di mana suatu zat terlarut dalam larutan menempel, terikat, atau terserap dan terakumulasi pada permukaan padatan. Mekanisme adsorpsi digambarkan sebagai proses di mana molekul yang semula ada pada larutan, menempel pada permukaan zat adsorben secara fisika. Proses adsorpsi

terjadi karena adanya luas permukaan, semakin luas permukaan adsorben yang disediakan maka semakin banyak molekul adsorbat yang diserap sehingga proses adsorpsi dapat semakin efisien [25-27].

2. Presipitasi

Presipitasi merupakan salah satu tahap pengolahan sekunder yang mengubah kondisi fisik limbah cair dari bentuk terlarut menjadi padatan tersuspensi. Proses presipitasi berlangsung dengan adanya penambahan sejumlah zat kimia tertentu untuk mengubah senyawa yang mudah larut ke bentuk padatan yang tak larut [27-28].

3. Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi merupakan teknologi gabungan dari proses elektrokimia dan proses koagulasi-flokulasi dengan arus listrik searah menggunakan elektroda yang biasanya terbuat dari aluminium atau besi, di mana kedua elektroda akan menarik zat pencemar menjadi flok yang dengan mudah dapat diendapkan dan dipisahkan. Gelembung gas yang dihasilkan pada proses ini dapat membawa polutan ke atas air sehingga dapat dengan mudah dihilangkan dan mampu memberikan efisiensi proses yang cukup tinggi untuk berbagai kondisi [29-30].

4. Aerasi

Aerasi merupakan proses pengolahan air limbah secara biologi di mana air limbah dihembuskan dengan udara sehingga mikroorganisme yang ada akan menguraikan zat organik yang ada dalam air limbah [31]. Aerasi dilakukan pada secondary treatment atau pengolahan biologis yang bertujuan untuk memperbanyak jumlah bakteri secara cepat agar proses biologis dalam penguraian bahan organik berjalan lebih cepat [32]. Di dalam proses aerasi, terjadi reduksi BOD dan COD secara aerob menggunakan aerator sebagai penghasil oksigen dengan cara menempelkan aerator di dalam kolam aerasi sehingga menghasilkan oksigen berupa buih udara yang tercampur dengan air [33].

5. Constructed Wetland (CWs)

Constructed Wetland (CWs) merupakan salah satu pengolahan air limbah olahan dari pengolahan biologis yang menggunakan tumbuhan air. Tumbuhan air dalam constructed wetland memegang peranan penting dalam proses pemulihan kualitas air limbah secara alamiah (*self purification*) sehingga metode ini didefinisikan sebagai teknologi pengolahan hijau yang ramah lingkungan. Metode *constructed wetland* dikelompokkan menjadi dua jenis, antara lain *free water surface* merupakan air limbah tergenang di atas tanah, seperti rawa atau mangrove dan *subsurface flow* merupakan air limbah mengalir di bawah permukaan tanah [34].

6. Multi Soil Layering (MSL)

Multi Soil Layering (MSL) merupakan metode pengolahan limbah cair yang memanfaatkan kemampuan tanah sebagai media utama dalam menyisihkan parameter pencemar dan meningkatkan kemampuan tanah tersebut dengan memperbaiki strukturnya [35]. Sistem MSL dibentuk pada sebuah konstruksi atau reaktor yang tersusun atas lapisan capuran tanah yang terdiri dari tanah terpilih, arang sebagai unsur karbon, material organik dan material tambahan lain, seperti bijih besi dan lapisan batuan yang dibentuk, seperti susunan batu bata [36].

Tabel 2.
Efisiensi Removal Setiap Teknologi Pengolahan Air Limbah Penyamakan Kulit

Unit Pengolahan	Efisiensi Removal (%)							
	BOD ₅ (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	Krom Total (mg/L)	Minyak & Lemak (mg/L)	Nitrogen Total (mg/L)	Amonia Total (mg/L)	Sulfida (mg/L)
Adsorpsi	76,58-99,5	76,49-98,47	72,13-99,1	94,99-99,19	85-97		45,72-90,96	
Presipitasi	97,23	96,06	43,55	99,35				
Elektrokoagulasi	88,2	72,14-97,33	17,37-85,33	68,20-99,99				
Aerasi	50-96	50-95,2	60-90	52,6			62,18-98	99,6
<i>Constructed Wetland</i> (CWs)	45-99,35	15-87,73	34-95	96,89		70,29-83,67		89,02
<i>Multi Soil Layering</i> (MSL)	95,3-99	85,7-92				56,4-86,6		35,6-66
<i>Moving Bed Biofilm</i> <i>Reactor</i> (MBBR)	85	80,85				62,85		
<i>Sequencing Batch</i> <i>Reactor</i> (SBR)	93,33	85,47				90-96		
<i>Advanced Oxidation</i> <i>Processes</i> (AOPs)	40-99,8	40,44-97,9	65,4-99,9	32,9-86,42			41,8-99,9	85
<i>Membrane Bioreactor</i> (MBR)	80	80				36		

7. *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)*

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) merupakan salah satu unit pengolahan biologis yang memanfaatkan biofilm dengan system fluidized attached growth (mikroorganisme yang tumbuh dan berkembangbiak pada media) [37]. Metode MBBR ini memanfaatkan proses anaerobik untuk mengolah COD yang tinggi mencapai 80.000 mg/L dan proses aerobik-anoksik yang berpotensi dalam mengolah organik dan nitrogen melalui nitrifikasi dan denitrifikasi [38]. MBBR menggunakan seluruh volume reaktor untuk pertumbuhan biomassa dan tidak memerlukan daur ulang lumpur aktif [39].

8. *Sequencing Batch Reactor (SBR)*

Sequencing Batch Reactor (SBR) merupakan salah satu teknologi pengolahan biologis dengan proses lumpur aktif (activated sludge), namun pengolahannya berbeda dengan pengolahan lumpur aktif konvensional pada umumnya. Pada pengolahan SBR semua proses pengolahan berlangsung dalam satu bak, sedangkan lumpur aktif konvensional menggunakan beberapa bak. Prinsip operasi SBR adalah mengisi dan menarik (*fill and draw*), yang terdiri dari lima tahapan, diantaranya pengisian (*fill*), reaksi (*reaction*), pengendapan (*settle*), pembuangan air olahan (*decand*), dan pembuangan lumpur (*idle*) [40].

9. *Advanced Oxidation Processes (AOPs)*

Advanced Oxidation Processes (AOPs) merupakan teknik oksidasi untuk mengurangi konsentrasi senyawa organik beracun yang menghambat pengolahan air limbah proses biologis dengan memanfaatkan spesies sangat reaktif, misalnya radikal hidroksil (OH). Cakupan teknologi AOPs cukup luas dan telah digunakan dalam pengolahan air limbah. Terdapat beragam tipe AOPs dengan basis reaksi, diantaranya oksidasi fenton, elektrooksidasi, iradiasi UV, sonikasi, dan ozonasi [19], [41-42].

10. *Membrane Bioreactor (MBR)*

Membrane Bioreactor (MBR). MBR merupakan unit pengolahan limbah cair industri yang terdiri dari proses biologis dan filtrasi membran. Penggunaan membran bioreaktor dapat mengatasi fluktuasi yang berlebih pada kualitas influen dan efluen dapat langsung digunakan serta

dengan bioreaktor membran, konsentrasi biomassa (MLSS), dan konsentrasi COD umpan yang terlalu tinggi tidak lagi menjadi masalah [43].

Dari sepuluh teknologi pengolahan tersebut, AOPs merupakan salah satu unit pengolahan yang paling banyak digunakan oleh industri penyamakan kulit, serta mampu menyisihkan enam parameter air limbah penyamakan kulit, diantaranya BOD₅, COD, TSS, krom total (Cr), amonia total (NH₃-N), dan sulfida (S).

G. *Penentuan Rekomendasi Teknologi Pengolahan Air Limbah Penyamakan Kulit Berdasarkan Skala Industri*

Dalam menentukan rekomendasi pengolahan yang tepat, diperlukan analisis perbandingan berdasarkan beberapa hal yang mendukung, meliputi hasil perhitungan kualitas efluen air limbah berdasarkan data efisiensi removal dari masing-masing teknologi pengolahan yang telah tercantum pada (Tabel 2.), kebutuhan luas lahan (*preliminary sizing*), kelebihan dan kekurangan dalam operasional dan perawatan (O&M), serta biaya investasi. Perhitungan kualitas efluen ini menggunakan data karakteristik air limbah dari ketiga industri yang telah dipilih, diantaranya industri skala kecil Kamila *Leather*, industri skala besar PT. Adi Satria Abadi, dan industri skala klaster LIK Magetan. Berdasarkan hasil perhitungan kualitas efluen air limbah penyamakan kulit dari ketiga skala industri tersebut, dapat disimpulkan bahwa teknologi pengolahan yang mampu menyisihkan parameter air limbah penyamakan kulit untuk industri kecil, meliputi adsorpsi, elektrokoagulasi, aerasi, AOPs, untuk industri besar, meliputi adsorpsi, presipitasi, elektrokoagulasi, aerasi, wetland, AOPs, dan untuk industri klaster, meliputi adsorpsi, aerasi, AOPs. Dari kesimpulan tersebut, dapat ditentukan bahwa alternatif pengolahan yang direkomendasikan dan dilakukan analisis perbandingan pada masing-masing skala industri, diantaranya metode adsorpsi, presipitasi, elektrokoagulasi, aerasi, wetland, dan AOPs.

H. *Rekomendasi Teknologi Pengolahan Penyamakan Kulit Skala Kecil*

Berdasarkan analisis perbandingan dari keenam teknologi pengolahan yang telah dipilih, didapatkan salah satu teknologi pengolahan yang memiliki kemampuan paling baik dalam menyisihkan kandungan polutan air limbah

untuk industri penyamakan kulit skala kecil, seperti Kamila *Leather*, yaitu metode adsorpsi. Metode adsorpsi memiliki efisiensi removal cukup tinggi untuk parameter BOD₅, COD, TSS sebesar 99,5%; 98,47%; 99,10% sehingga menghasilkan kualitas efluen yang sangat baik, serta memenuhi nilai standar baku mutu.

Metode adsorpsi memiliki beberapa keunggulan, diantaranya prinsip alat yang digunakan sederhana sehingga pengoperasiannya mudah diterapkan, bahan adsorben yang digunakan dalam proses pengolahan mudah didapatkan dengan biaya relatif murah namun tergantung dari jenis adsorben yang digunakan, penggunaan adsorben dapat digunakan berulang kali hingga batas maksimal pemakaian, biaya perawatan cukup murah, serta tidak membutuhkan lahan yang terlalu besar. Namun, adapun kekurangan dari metode adsorpsi, diantaranya tidak efektif menyisihkan parameter pencemar dalam kondisi limbah bersifat basa karena akan menghasilkan garam yang dapat mengganggu proses pengolahan, serta perlu adanya proses regenerasi atau pencucian setelah pemakaian adsorben [10], [27], [44].

I. Rekomendasi Teknologi Pengolahan Penyamakan Kulit Skala Besar

Berdasarkan analisis perbandingan dari keenam teknologi pengolahan, didapatkan salah satu teknologi pengolahan yang cocok digunakan sebagai unit pengolahan tambahan untuk industri penyamakan skala besar yang telah memiliki IPAL, seperti IPAL PT. Adi Satria Abadi, serta memiliki kemampuan paling baik dalam menyisihkan kandungan polutan air limbah penyamakan kulit, yaitu metode wetland. Metode wetland memiliki efisiensi removal untuk parameter COD dan TSS sebesar 95,20% dan 90,00% sehingga mampu menyisihkan parameter air limbah penyamakan kulit dan menghasilkan kualitas efluen yang baik serta memenuhi nilai standar baku mutu.

Metode wetland sering kali digunakan sebagai pengolahan air limbah pada tahap lanjutan dan memiliki beberapa keunggulan mulai dari penyediaan bahan, keefektifan, kecocokan sistem kerjanya sesuai dengan iklim di Indonesia. Wetland merupakan teknologi pengolahan sederhana dan ramah lingkungan karena teknologinya bersifat alami sehingga pengoperasiannya mudah dan tidak memerlukan tenaga ahli, energi yang dibutuhkan rendah, memberikan manfaat ganda karena dapat berfungsi sebagai media hidup hewan maupun makhluk hidup lainnya, kebutuhan biaya mulai dari perencanaan, pengoperasian dan pemeliharaan tergolong murah dikarenakan proses pengolahannya menggunakan tumbuhan yang tetap dapat berkembang tanpa biaya sehingga dapat menghemat biaya operasional hingga 50%. Adapun kekurangan dari metode wetland, yaitu membutuhkan luas lahan yang cukup besar, namun dapat disesuaikan dengan kebutuhan [18], [24], [45-47].

J. Rekomendasi Teknologi Pengolahan Penyamakan Kulit Skala Klaster

Berdasarkan analisis perbandingan dari keenam teknologi pengolahan, didapatkan salah satu teknologi pengolahan yang cocok digunakan sebagai unit pengolahan tambahan untuk industri penyamakan skala klaster yang telah memiliki IPAL, seperti IPAL LIK Magetan, serta memiliki kemampuan paling baik dalam menyisihkan kandungan

polutan air limbah penyamakan kulit, yaitu metode adsorpsi. Metode adsorpsi memiliki efisiensi removal untuk parameter BOD₅, COD, TSS, amonia total sebesar 99,5%; 98,47%; 99,10%; 90,96% sehingga mampu menyisihkan parameter air limbah penyamakan kulit dan menghasilkan kualitas efluen yang sangat baik, serta memenuhi nilai standar baku mutu.

Metode adsorpsi memiliki beberapa keunggulan, diantaranya prinsip alat yang sederhana sehingga pengoperasiannya mudah diterapkan, bahan adsorben yang digunakan dalam proses pengolahan mudah didapatkan dengan biaya relatif murah namun tergantung dari jenis adsorben yang digunakan, penggunaan adsorben dapat digunakan berulang kali hingga batas maksimal pemakaian, biaya perawatan cukup murah, serta tidak membutuhkan lahan yang terlalu besar. Namun, adapun kekurangan dari metode adsorpsi, diantaranya tidak efektif menyisihkan parameter pencemar dalam kondisi limbah bersifat basa karena akan menghasilkan garam yang dapat mengganggu proses pengolahan, serta perlu adanya proses regenerasi atau pencucian setelah pemakaian adsorben [10], [27], [44].

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari studi literatur yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut: (1) Karakteristik air limbah penyamakan kulit yang dikelompokkan ke dalam tiga skala industri, diantaranya industri skala kecil, besar, dan klaster. Terdapat perbedaan debit air limbah yang dihasilkan dari ketiga industri, diantaranya industri kecil sebesar 3 m³/hari, industri besar sebesar 61,83 m³/hari, dan industri klaster sebesar 594,4 m³/hari. Karakteristik air limbah yang dihasilkan dari proses produksi penyamakan kulit terdiri dari polutan organik dan polutan anorganik. Kemampuan untuk menguraikan bahan pencemar dapat ditentukan dengan menggunakan rasio BOD/COD, di mana rasio BOD/COD $\geq 0,5$ didefinisikan sebagai air limbah mudah terdegradasi (terurai) sehingga dapat diolah menggunakan proses biologi. Sementara rasio BOD/COD $< 0,3$ didefinisikan sebagai air limbah tidak dapat terdegradasi (terurai) sehingga dapat diolah menggunakan proses fisik-kimia; (2) Dari sepuluh teknologi pengolahan yang telah digunakan di berbagai industri penyamakan kulit, AOPs merupakan salah satu unit pengolahan yang paling banyak digunakan. AOPs mampu menyisihkan enam parameter air limbah penyamakan kulit, diantaranya BOD₅, COD, TSS, krom total (Cr), amonia total (NH₃-N), dan sulfida (S); (3) Penentuan rekomendasi pengolahan yang tepat berdasarkan dari hasil perhitungan kualitas efluen air limbah dari ketiga skala industri dan didapatkan enam teknologi pengolahan yang mampu menyisihkan parameter air limbah, diantaranya metode adsorpsi, presipitasi, elektrokoagulasi, aerasi, wetland, dan AOPs. Keenam metode tersebut dilakukan analisis perbandingan dan didapatkan rekomendasi teknologi pengolahan yang tepat untuk ketiga skala industri, diantaranya industri kecil direkomendasikan menggunakan unit adsorpsi, industri besar direkomendasikan menggunakan tambahan unit pengolahan wetland, dan industri klaster direkomendasikan menggunakan tambahan unit pengolahan adsorpsi.

B. Saran

Dari studi literatur yang telah dilakukan, dapat digunakan sebagai acuan dalam merencanakan sebuah pengolahan air limbah untuk industri penyamakan kulit skala kecil yang belum melakukan pengolahan. Sementara, tambahan unit pengolahan dikhususkan untuk industri penyamakan kulit skala besar maupun klaster yang telah memiliki Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Maka dari itu, diperlukan penerapan lebih lanjut terkait alternatif pengolahan yang telah direkomendasikan berdasarkan karakteristik air limbah yang terkandung pada masing-masing industri penyamakan kulit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Hasyati, E. Hartati, and D. Djaenudin, "Penyisihan krom pada pengolahan air limbah penyamakan kulit menggunakan metode elektrokoagulasi," *J. Serambi Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 1589–1595, 2020.
- [2] Setiyono and S. Yudo, *Daur Ulang Air Limbah Industri Penyamakan Kulit (Studi Kasus di Lingkungan Industri Kulit, Magetan, Jawa Timur)*. BPPT Press, 2014.
- [3] Prayitno, *Teknologi Bersih Proses Penyamakan Kulit*. Yogyakarta: CV. Grafika Indah, 2017.
- [4] D. Ilmasari, "Kajian Minimisasi Limbah Cair pada Kegiatan Penyamakan Kulit (Studi Kasus Industri X dan Y)," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2019.
- [5] B. U. N. R. G. Bhargavi, G. C. Jayakumar, K. J. Sreeram, J. R. Rao, "Towards sustainable leather production: vegetable tanning in non-aqueous medium," *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, vol. 110, no. 4, pp. 97–102, 2015.
- [6] M. H. Sulhan, "Analisis nilai chemical oxygen demand (COD) pada buangan limbah penyamakan kulit dengan metode spektrofotometri UV-VIS," *J. Sanitasi*, vol. 4, no. 6, pp. 12–25, 2017.
- [7] Maryudi, A. Rahayu, R. Syaqui, and M. K. Islami, "Teknologi pengolahan kandungan kromium dalam limbah penyamakan kulit menggunakan proses adsorpsi: review," *J. Tek. Kim. dan Lingkung.*, vol. 5, no. 1, pp. 90–99, 2021, doi: 10.33795/jtkl.v5i1.207.
- [8] A. W. Nugraha, O. Suparno, and N. S. Indrasti, "Analisis material, energi, dan toksisitas (MET) pada industri penyamakan kulit untuk identifikasi strategi produksi bersih," *J. Teknol. Ind. Pertanian*, vol. 28, no. 1, pp. 48–60, 2018, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2018.28.1.48.
- [9] S. Ayob *et al.*, "A review a adsorption of heavy metals from wood-industrial wastewater by oil pal waste," *J. Ecol. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 249–265, 2021.
- [10] R. Fachria, H. Ramdan, and I. Aryantha, "Efektivitas pengolahan limbah cair industri penyamakan kulit Sukaregang Garut dengan adsorben karbon aktif dan ijuk," *J. Pengelolaan Lingkung. Berkelanjutan*, vol. 3, no. 3, pp. 379–388, 2019, doi: 10.36813/jplb.3.3.379-388.
- [11] A. Isnaini, F. Rohman, and H. Tuarita, "Pengaruh Jenis Gulma Air terhadap Penurunan Kadar Krom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit di Kota Malang," Universitas Negeri Malang, 2015.
- [12] A. W. Nugraha, O. Suparno, and N. S. Indrasti, "Analisis potensi jejak karbon limbah cair dan listrik pada proses penyamakan kulit," *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 30, no. 3, pp. 256–264, 2020, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.3.256.
- [13] R. Yuliatmo and M. Udkhiyati, "Aplikasi enzim bakteri pada penyamakan kulit: review dalam pengolahan kulit mutakhir," in *Cleaner Technology for Future Trend in The Leather Making*, 2020, pp. 184–190.
- [14] O. R. Riandini, "Adsorpsi Cr⁶⁺ Menggunakan Kulit Umbi Singkong (Manihot sp.) dan Aplikasinya pada Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit," Universitas Airlangga, Surabaya, 2018.
- [15] P. Indonesia, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah*. Jakarta: Sekretariat Negara, 2014.
- [16] C. P. Dewi, "Analisis Fungsi Produksi pada Industri Jacket Kulit di Sentra Industri Kulit Sukaregang Kabupaten Garut dengan Pendekatan Fungsi Cobb Douglas," Universitas Pasundan Bandung, 2018.
- [17] I. Tahir, M. Khairi, Supraptiningsih, and Marsono, "Evaluasi dan Rencana Tindak Pengelolaan Bahan Kimia di Industri: Studi Kasus PT. Adi Satria Abadi-Bantul DIY," 2003.
- [18] F. Hanafi, "Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Penyamakan Kulit di PT. X," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2019.
- [19] I. Mahendra, "Analisis Efisiensi Removal Kadar pH, Krom, dan Amonia dalam Pengolahan Limbah Industri Penyamakan Kulit Menggunakan Metode Elektro Fenton," Universitas Brawijaya, Malang, 2019.
- [20] UPT Industri dan Produk Kulit Magetan, *Laporan Pemantauan Lingkungan Triwulan*. Magetan: UPT Industri dan Produk Kulit Magetan, 2019.
- [21] I. M. W. Wijaya and E. S. Soedjono, "Physicochemical Characteristic of Municipal Wastewater in Tropical Area: Case Study of Surabaya City, Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, pp. 1–6.
- [22] W. Atima, "BOD dan COD sebagai parameter pencemaran air dan baku mutu air limbah," *J. Biol. Sci. Educ.*, vol. 4, no. 1, pp. 83–93, 2015.
- [23] M. Tamyiz, "Perbandingan rasio BOD/COD pada area tambak di hulu dan hilir terhadap biodegradabilitas bahan organik," *J. Res. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 9–15, 2015.
- [24] D. Kurniawan, "Perancangan Bangunan Pengolahan Air Limbah Domestik," Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Surabaya Jawa Timur, 2022.
- [25] A. H. Saputra, L. B. Purnama, and M. Karmini, "Perbedaan waktu kontak karbon aktif pada limbah cair penyamakan kulit di PT. XYZ," *J. Kesehatan. Siliwangi*, vol. 2, no. 2, pp. 420–426, 2021, doi: 10.34011/jks.v2i2.726.
- [26] S. Sugihartono, D. Rahmawati, and A. Priatni, "Kemampuan hydrogel komposit berbasis produk samping industri penyamakan kulit dalam menyerap air dan larutan garam," *Maj. Kulit, Karet, dan Plast.*, vol. 36, no. 1, pp. 35–44, 2020, doi: 10.20543/mkpp.v36i1.6097.
- [27] E. Wardhani, M. Dirgawati, and I. F. Alvina, "Kombinasi proses presipitasi dan adsorpsi karbon aktif dalam pengolahan air limbah industry penyamakan kulit" lingkungan tropis," *Lingkung. Trop.*, vol. 7, no. 1, pp. 39–52, 2013.
- [28] N. Hendrawati, B. A. Prasetyo, and Z. A. Prayogi, "Penurunan kadar pencemar dengan penambahan Ca(OH)₂ menggunakan metode aerasi dan presipitasi pada air buangan sulfur recovery unit (SRU)," 2017.
- [29] A. N. Fauziyah, "Pengolahan Limbah Cair Penyamakan Kulit dengan Metode Elektrokoagulasi," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2016.
- [30] T. S. B. Suharto and Shofiyunniswah, "Elektrokoagulasi untuk penurunan kadar kromium (Cr), chemical oxygen demand (COD), dan total suspended solid (TSS) pada limbah industry penyamakan kulit di Singosari Kabupaten Malang," *J. Tek. Lingkung. Univ. Andalas*, vol. 16, no. 2, pp. 131–138, 2019, doi: 10.25077/dampak.16.2.131-138.2019.
- [31] N. I. Ariska, Y. Emma, and C. Dian, "Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Pabrik Penyamakan Kulit di Desa Mojopurno Kecamatan Ngariboyo Kabupaten Magetan," Universitas Brawijaya, Malang, 2017.
- [32] I. A. H. Putri, A. Lastriyanto, and A. A. Sulianto, "Efektivitas pengolahan limbah cair penyamakan kulit terhadap kadar BOD, COD, DO, pH, sulfida, krom dengan metode deep aeration," *J. Agric. Biosyst. Eng. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 35–45, 2020.
- [33] N. K. Mandala, "Pengaruh Laju Aerasi Terhadap Penurunan Kadar Polutan pada Limbah Cair Industry Penyamakan Kulit dengan Metode Aeration," Universitas Brawijaya, Malang, 2019.
- [34] Y. Afifah and S. Mangkoediharjo, "Studi literatur pengolahan air limbah menggunakan mixed aquatic plants," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 1, pp. 228–232, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.29334.
- [35] L. Latrach *et al.*, "Domestic wastewater disinfection by combined treatment using multi-soil-layering system and sand filters (MSL-SF): a laboratory pilot study," *Ecol. Eng.*, vol. 91, pp. 294–301, 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.02.036.
- [36] R. Haribowo, S. Megah, and W. Rosita, "Efisiensi sistem multi soil layering pada pengolahan air limbah domestic pada daerah perkotaan padat penduduk," *J. Tek. Pengair.*, vol. 10, no. 1, pp. 11–27, 2018, doi: 10.21776/ub.pengairan.2019.010.01.2.
- [37] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th Edition*. New York: McGraw-Hill, 2014.
- [38] H. L. Putra, "Penurunan Kadar Total N (NH₃-N) dan COD pada Limbah Cair Penyamakan Kulit dengan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)," Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Surabaya, Jawa Timur, 2019.
- [39] A. U. Farahdiba, T. A. Rachmanto, D. K. A. Pamungkas, and F. Rizqa, "Pengolahan air limbah penyamakan kulit dengan modifikasi teknik aerasi," *J. Sains dan Teknol. Lingkung.*, vol. 14, no. 1, pp. 12–27, 2022.
- [40] N. I. Said, *Teknologi pengolahan air limbah*. Yogyakarta: Erlangga,

- 2017.
- [41] M. Muruganandham and M. Swaminathan, "Advanced oxidative decolourisation of reactive yellow 14 azo dye by UV/TiO₂, UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/Fe²⁺ processes—a comparative study," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 48, no. 3, pp. 297–303, 2006, doi: 10.1016/j.seppur.2005.07.036.
- [42] M. Sholeh and I. Setyorini, "A Review on Application of Advanced Oxidation Processes for Tannery Wastewater Treatment," 2014.
- [43] I.-S. Chang, P. Le Clech, B. Jefferson, and S. Judd, "Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment," *J. Environ. Eng.*, vol. 128, no. 11, pp. 1018–1029, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:11(1018).
- [44] Meirinna, Moh. Fahrurrozi, and S. J. Santosa, "Sistem penurunan kadar krom (III) limbah cair industri penyamakan kulit dengan kombinasi presipitasi menggunakan natrium hidroksida dan adsorpsi menggunakan bagase fly ash," *ASEAN J. Od Syst. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 62–67, 2013.
- [45] A. Husnabilah, "Perencanaan Constructed Wetland untuk Pengolahan Greywater Menggunakan Tumbuhan *Canna Indica* (Studi Kasus: Kelurahan Keputih Surabaya)," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [46] G. Langergraber, G. Dotro, J. Nivala, A. Rizzo, and O. R. Stein, *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*. London: IWA Publishing, 2019. doi: 10.2166/9781789060171.
- [47] M. S. Prayitno, "Pengurangan nitrogen pada limbah cair terolah industri penyamakan kulit menggunakan sistem wetland buatan," *Maj. Kulit, Karet, dan Plast.*, vol. 30, no. 2, pp. 79–86, 2014, doi: 10.20543/mkpp.v30i2.129.