

FOTODEGRADASI LIMBAH ZAT WARNA TEKSTIL DENGAN NANOPARTIKEL PERAK (NPAg) DARI EKSTRAK DAUN SIRSAK MENGUNAKAN SINAR TAMPAK

Jenny Angeline Tan*, Iryanti Eka Suprihatin, Ni Made Suaniti

Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Bali, Kampus
Bukit Jimbaran, 80361, Indonesia

*jennyangelinetan31@gmail.com

ABSTRAK: Limbah zat warna dari industri tekstil di Indonesia masih menjadi masalah lingkungan karena bersifat toksik dan sulit terurai. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas nanopartikel perak (NPAg) yang disintesis menggunakan ekstrak daun sirsak untuk mendegradasi zat warna tekstil melalui fotodegradasi berbasis sinar tampak. NPAg dibuat dengan mereaksikan AgNO_3 0,001 M dan ekstrak daun sirsak (rasio 1:9) pada suhu 40°C selama 60 menit. Karakterisasi UV-Vis dan PSA menunjukkan ukuran rata-rata partikel 63,11 nm dan puncak serapan pada 453,50–459,50 nm. Senyawa flavonoid, terpenoid, dan tanin dalam ekstrak berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabil. Uji fotodegradasi dilakukan dengan variasi waktu iradiasi, volume katalis, dan pH; kondisi optimal tercapai pada 15 menit, 0,5 mL katalis, dan pH 13, dengan efektivitas degradasi 34,37–37,76%. Penurunan BOD tercatat 5,54–11,08% dan COD sebesar 8,66–12,22%. Hasil ini menunjukkan potensi NPAg berbasis daun sirsak sebagai fotokatalis ramah lingkungan untuk pengolahan limbah tekstil.

Kata kunci: Fotodegradasi, Nanopartikel Perak, Daun Sirsak, Limbah Tekstil, Sinar Tampak.

ABSTRACT: Dye waste from the textile industry in Indonesia remains an environmental issue due to its toxic nature and resistance to degradation. This study evaluates the effectiveness of silver nanoparticles (AgNPs) synthesized using soursop leaf extract in degrading textile dyes through visible light-based photodegradation. The AgNPs were synthesized by reacting 0.001 M AgNO_3 with soursop leaf extract in a 1:9 ratio at 40°C for 60 minutes. UV-Vis and PSA characterizations showed that the resulting nanoparticles had an average size of 63.11 nm and characteristic absorption peaks between 453.50–459.50 nm. The flavonoid, terpenoid, and tannin compounds in the extract acted as reducing and stabilizing agents. Photodegradation tests were conducted with variations in irradiation time, catalyst volume, and pH. Optimal conditions were achieved at 15 minutes of irradiation, 0.5 mL of catalyst, and pH 13, with degradation efficiency ranging from 34.37% to 37.76%. BOD levels decreased by 5.54–11.08%, and COD levels dropped by 8.66–12.22%. These results indicate that soursop leaf-based AgNPs have strong potential as environmentally friendly photocatalysts for textile wastewater treatment.

Keywords: Photodegradation, Silver Nanoparticles, Soursop Leaf, Textile Waste, Visible Light

1. PENDAHULUAN

Di era modern ini perkembangan industri di Indonesia semakin pesat, khususnya perkembangan pada industri

tekstil. Dengan adanya perkembangan industri ini menimbulkan berbagai dampak negatif, antara lain adalah terdapatnya limbah zat warna hasil dari proses

pencelupan. Dengan terdapatnya limbah zat warna ini akan menimbulkan pencemaran yang berbahaya terhadap lingkungan perairan, karena limbah zat warna bersifat stabil, sulit terurai, dan beracun.

Upaya pengolahan limbah tekstil telah dilakukan dengan berbagai macam metode pengolahan baik secara konvensional maupun modern. Adapun beberapa metode konvensional yang dapat digunakan, yaitu metode biodegradasi, adsorpsi, koagulasi, dan filtrasi. Akan tetapi metode konvensional ini tidak cukup efektif dalam mendegradasi zat warna. Banyaknya kelemahan dari metode konvensional tersebut menuntut adanya upaya alternatif yang lebih efektif dan menjanjikan, seperti metode fotodegradasi. Fotodegradasi menjadi salah satu metode yang hemat biaya, ramah lingkungan, dan efisien dalam menguraikan limbah. Proses ini melibatkan pembentukan radikal aktif yang mampu mengoksidasi senyawa berbahaya yang terkandung dalam limbah. Oleh karena itu, metode fotodegradasi menjadi metode yang banyak dikembangkan saat ini [1].

Fotodegradasi merupakan mekanisme penyederhanaan senyawa organik melalui pemanfaatan energi cahaya, seperti sinar UV dan sinar matahari, dengan bantuan katalis [2]. Sinar tampak sebagai sumber energi dalam proses fotodegradasi memberikan keuntungan lebih karena energi matahari dapat dimanfaatkan secara langsung, menjadikan proses ini lebih hemat energi dan berkelanjutan. Fotokatalis fotodegradasi menjadi lebih cepat.

Fotokatalis memiliki peran penting dalam proses fotodegradasi, sehingga diperlukan pengembangan material yang dapat berfungsi sebagai fotokatalis. Material tersebut biasanya terbuat dari bahan semikonduktor dan konduktor. Adapun, logam merupakan material konduktor yang tidak memiliki celah pita energi, tetapi energi celah antar pita konduksi dengan pita valensi akan semakin meningkat apabila partikel logam berukuran kecil [3]. Ukuran partikel katalis berpengaruh pada efisiensinya. Katalis

berukuran kecil memiliki luas permukaan yang besar, sehingga distribusi pada limbah yang akan didegradasi menjadi lebih merata [4].

Nanopartikel logam merupakan material berbasis logam dengan ukuran partikelnya yang kurang dari ukuran 100 nm. Contohnya adalah nanopartikel perak (NPAg). NPAg menjadi salah satu nanopartikel yang banyak diteliti karena memiliki sifat yang tidak toksik dan sangat baik dimanfaatkan sebagai antibakteri pada beberapa mikroorganisme yang dapat menyebabkan berbagai macam penyakit. NPAg memiliki manfaat di banyak bidang, diantaranya memiliki kemampuan dalam mendeteksi sensor optik dan dapat digunakan sebagai fotokatalis [5].

Sintesis nanopartikel logam biasanya menggunakan pendekatan top-down (fisik) atau bottom-up (kimia), tetapi metode-metode ini memiliki keterbatasan seperti penggunaan pelarut toksik, limbah toksik, dan penggunaan energi yang besar [6]. Oleh karena itu, metode fitosintesis banyak dipilih untuk sintesis nanopartikel perak. Fitosintesis adalah proses sintesis nanomaterial yang melibatkan ekstrak tanaman sebagai agen pereduksi dan penstabil. Ekstrak tanaman mengandung senyawa bioaktif seperti flavonoid, polifenol, dan alkaloid yang mampu mereduksi ion logam [6].

Tanaman sirsak menjadi tanaman yang banyak dikenal memiliki beragam manfaat karena hampir setiap bagian tanaman ini dapat dimanfaatkan, termasuk daunnya. Hal ini karena daun sirsak mengandung senyawa kimia seperti alkaloid, steroid (terpenoid), tannin, kumarin, dan flavonoid [5]. Ekstrak daun sirsak mengandung berbagai jenis dihidroflavonol, flavonoid, flavonol, yaitu dan flavon, flavanon, menjadikannya kandidat yang menjanjikan sebagai bioreduktor dalam sintesis nanopartikel perak.

Beberapa kajian jurnal telah membuktikan bahwa nanopartikel perak (NPAg) sebagai fotokatalis dapat mendegradasi zat warna. Menurut Lestari *et*

al. [6] dalam kondisi optimum sebanyak 94,75% zat warna indigosol blue dapat terdegradasi dengan NPAg. Kondisi tersebut berada pada waktu iradasi 4 jam, dengan volume 2 mL, dan derajat keasaman atau pH 3. Penelitian Suprihatin *et al.* [8] berhasil mendegradasi sekitar 97% dari 600 ppm Remazol brilliant blue dengan menggunakan 10 ml NPAg yang disintesis dengan ekstrak air bunga kemboja pada pH 4 dan waktu penyinaran selama 60 menit. Sinha *et al.* [9] telah membuktikan bahwa fotokatalis NPAg dapat mendegradasi sekitar 98,3% zat warna metilen ungu 6B selama 4 jam dan zat warna metilen jingga dalam waktu 1 jam. Dari banyak penelitian tersebut, belum ada yang melaporkan tentang fotodegradasi terhadap limbah zat warna tekstil.

Berdasarkan penjelasan tersebut, penelitian terkait hal ini menjadi penting untuk dilakukan penelitian tentang fotodegradasi zat warna limbah industri tekstil dengan nanopartikel perak (Ag) dari ekstrak daun sirsak, sehingga dapat memberikan metode alternatif dalam memecahkan masalah lingkungan khususnya akibat limbah.

1. PERCOBAAN

2.1 Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan adalah daun sirsak yang diperoleh dari daerah Jawa Tengah, limbah cair tekstil yang diambil dari industri pencelupan di Banjar Akta Gianyar Bali, AgNO_3 , MnSO_4 , H_2SO_4 , Mg, asam asetat anhidrat 98,5%, kloroform 99,8%, NH_4OH 25%, pereaksi Mayer, pereaksi Wagner, pereaksi Dragendroff, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, MgSO_4 , CaCl_2 , FeCl_3 , Ag_2SO_4 , HCl 37%, NaOH produksi Merck, EM4 produksi PT. Songgolangit Persada, indikator amilum, aqua demineralisasi, akuades.

Peralatan yang digunakan adalah blender, oven, ayakan 100 mesh, botol sampel, *magnetic stirrer*, *hotplate*, filler, neraca analitik Kern ABS 220-4N, klem, statif, buret, *vortex mixer* VM1 Ratek, pH

meter, COD *reactor* T-25 K-nai, sentrifuge *Clements* 2000, *waterbath*, kertas saring Beimu dengan ukuran 15-20 mikro, irradiator *visible*, spektrofotometer UV-Vis Shimadzu UV-2600, dan PSA Malvern.

2.2 Metode

2.2.1 Pembuatan ekstrak air daun sirsak

Daun sirsak dibersihkan dengan pencucian di air bersih, lalu ukuran daun diperkecil dan dikeringkan di tempat terbuka selama 7 hari. Setelah itu, dilakukan pengovenan dalam waktu 4 jam dengan suhu 60°C. Setelah kering, daun tersebut digiling menggunakan blender hingga membentuk serbuk halus yang selanjutnya diayak menggunakan saringan 100 mesh. Serbuk daun sirsak ditimbang sebanyak 2 gram dan dicampur dengan 100 mL aqua demineralisasi, lalu dilakukan pemanasan dalam waktu 20 menit pada suhu 60°C. Setelah dingin, campuran disaring dengan kertas saring, dan ekstrak yang dihasilkan siap digunakan untuk sintesis nanopartikel [10].

2.2.2 Skrining Fitokimia

Ekstrak daun sirsak digunakan untuk menganalisis kandungan senyawa alkaloid, terpenoid, flavonoid, saponin, dan tannin [11].

2.2.3 Sintesis nanopartikel perak

Sintesis nanopartikel perak (NPAg) dilakukan dengan menambahkan AgNO_3 0,001 M ke dalam ekstrak daun sirsak. Dilakukan perbandingan volume campuran 1:9 antara ekstrak daun sirsak dengan AgNO_3 0,001 M, yaitu ekstrak daun sirsak sebanyak 10 mL dan AgNO_3 0,001 M sebanyak 90 mL. Kemudian campuran dipanaskan pada suhu 40°C dan didiamkan selama 60 menit. Perubahan warna larutan menjadi merah kecoklatan secara visual menjadi indikator penentu nanopartikel perak telah terbentuk [10]. Karakterisasi nanopartikel perak pada tahap ini

menggunakan PSA dan spektrofotometer UV-Vis.

2.2.4 Karakterisasi limbah tekstil

2.2.4.1 Pengukuran pH limbah tekstil

Sampel limbah cair tekstil industri dipindahkan ke dalam gelas beaker. Setelah itu, pH meter dikalibrasi, dibilas dengan akuades, dan dikeringkan. Setelah itu, sampel air diukur pH nya dengan mencelupkan elektroda pH meter dan dibiarkan hingga pH mencapai nilai stabil [12].

2.2.4.2 Pengukuran BOD

Larutan buffer fosfat, MgSO_4 , CaCl_2 , dan FeCl_3 dimasukkan masing-masing sebanyak 1 mL ke dalam labu ukur 1000 mL lalu ditambahkan larutan EM4 sebanyak 0,1 mL. Kemudian campuran diencerkan dengan akuades hingga tanda batas dan dihomogenkan. Sampel limbah tekstil dimasukkan sebanyak 2,5 mL ke dalam labu ukur 250 mL dan diencerkan dengan larutan pengencer hingga tanda batas lalu dihomogenkan. Larutan uji dipindahkan ke dalam botol sampel 100 mL hingga penuh, lalu ditambahkan 0,4 mL MnSO_4 dan alkali iodida-azida. Botol ditutup, dihomogenkan, lalu didiamkan selama 5-10 menit. Selanjutnya, 0,4 mL larutan H_2SO_4 pekat ditambahkan ke dalam botol sampel, kemudian larutan dihomogenkan kembali. Larutan diambil menggunakan pipet volume sebanyak 50 mL, lalu dipindahkan ke erlenmeyer 250 mL untuk dititrasi dengan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,025 N hingga larutan mengalami perubahan warna menjadi kuning keemasan. Selanjutnya, 5-10 tetes larutan indikator amilum ditambahkan, menyebabkan larutan berubah menjadi biru tua. Titrasi dilanjutkan hingga warna biru pada larutan menghilang. Nilai BOD diperoleh dengan menghitung nilai DO_0 dan DO_5 dengan persamaan berikut [13]

$$\text{DO} \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{V \times N \times \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 8000 \times F}{50} \quad (1)$$

$$\text{BOD} \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{(A_1 - A_2) - \left(\frac{B_1 - B_2}{V_B}\right)V_C}{P} \quad (2)$$

Keterangan:

A_1 : Kadar DO_0 (mg/L)

A_2 : Kadar DO_5 (mg/L)

B_1 : Kadar DO_0 blanko (mg/L)

B_2 : Kadar DO_5 blanko (mg/L)

V_B : Volume suspensi mikroba dalam blanko (mL)

V_C : Volume suspensi mikroba dalam sampel (mL)

P: Perbandingan volume sampel (V_1) per volume total (V_2)

F: Faktor Pengenceran

2.2.4.3 Pengukuran COD

Sampel limbah cair tekstil dan akuades sebagai blanko dimasukkan masing-masing sebanyak 2,5 mL ke dalam tabung COD yang berbeda dengan menggunakan pipet volume. Kemudian larutan kalium dikromat sebanyak 1,5 mL dan larutan pereaksi asam sulfat sebanyak 3,5 mL dimasukkan ke dalam masing-masing tabung COD dengan menggunakan pipet volume lalu tabung COD ditutup rapat. Selanjutnya, campuran tersebut dikocok dan dipanaskan pada suhu 150°C selama 2 jam menggunakan COD reaktor. Kemudian masing-masing campuran didinginkan dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Sampel kemudian diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan panjang gelombang 600 nm [14].

2.2.5 Penentuan panjang gelombang maksimum

Panjang gelombang maksimum zat warna dalam limbah tekstil dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis pada rentang 400-800 nm. Absorbansi tertinggi pada spektrum menunjukkan panjang gelombang maksimum zat warna tersebut.

2.2.6 Penentuan waktu penyinaran optimum

Sebanyak 5 buah gelas beaker yang telah berisi 2 mL NPAG, masing-masing ditambah 20 mL sampel limbah cair tekstil

dan diiradiasi dengan sinar tampak selama 15, 30, 45, 60 dan 90 menit dalam kotak radiasi sambil diaduk dengan *magnetic stirrer*. Campuran hasil penyinaran disentrifugasi selama 30 menit pada 3000 rpm untuk memisahkan katalis. Konsentrasi zat warna sisa selanjutnya diukur absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimumnya [6].

2.2.7 Penentuan volume katalis optimum

Nanopartikel perak (NPAg) dikocok hingga homogen. Sebanyak 6 buah gelas beaker yang telah berisi 1, 2, 5, 10, 15, dan 20 mL NPAg, masing-masing ditambah 20 mL sampel limbah cair tekstil. Campuran dimasukkan ke dalam kotak radiasi dan dihomogenkan dengan bantuan *magnetic stirrer* dan diiradiasi dengan sinar tampak selama waktu optimum. Campuran hasil penyinaran disentrifugasi selama 30 menit pada 3000 rpm untuk memisahkan katalis. Konsentrasi zat warna sisa selanjutnya diukur absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimumnya [6].

2.2.8 Penentuan pH optimum

Nanopartikel perak (NPAg) dikocok hingga homogen. Sebanyak 6 buah gelas beaker yang telah berisi 1, 2, 5, 10, 15, dan 20 mL NPAg, masing-masing ditambah 20 mL sampel limbah cair tekstil. Campuran dimasukkan ke dalam kotak radiasi dan dihomogenkan dengan bantuan *magnetic stirrer* dan diiradiasi dengan sinar tampak selama waktu optimum. Campuran hasil penyinaran disentrifugasi selama 30 menit pada 3000 rpm untuk memisahkan katalis. Konsentrasi zat warna sisa selanjutnya diukur absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimumnya [6].

2.2.9 Penentuan efektivitas fotodegradasi limbah tekstil

Masing-masing 20 mL sampel limbah cair tekstil pH nya telah diatur pada pH optimum dimasukkan ke dalam 3 buah gelas beaker yang telah berisi NPAg. Campuran dimasukkan ke dalam kotak radiasi dan dihomogenkan dengan bantuan *magnetic stirrer* dan diiradiasi dengan sinar tampak selama waktu optimum. Campuran hasil penyinaran disentrifugasi selama 30 menit pada 3000 rpm untuk memisahkan katalis. Konsentrasi zat warna sisa selanjutnya diukur absorbansinya dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimumnya. Persentase degradasi zat warna dihitung berdasarkan selisih absorbansi antara sebelum dan sesudah degradasi dengan persamaan berikut:

$$\%D = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

A₀: Absorbansi sebelum degradasi

A_t: Absorbansi sesudah degradasi

Sedangkan persentase penurunan kadar BOD dan COD dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \text{Penurunan} = \frac{\text{Kadar}_0 - \text{Kadar akhir}}{\text{Kadar}_0} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

Kadar₀: Kadar BOD dan COD sebelum degradasi

Kadar Akhir: Kadar BOD dan COD sesudah degradasi

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Skrining Fitokimia

Pada sintesis NPAg, metabolit sekunder yang dapat berperan antara lain adalah senyawa polifenol, seperti flavonoid, terpenoid dan tannin. Oleh karena itu, dilakukan skrining fitokimia pada ekstrak daun sirsak untuk mengetahui senyawa metabolit sekunder yang terkandung dalam ekstrak daun sirsak. Hasil skrining fitokimia menunjukkan

adanya flavonoid, tanin dan terpenoid dalam ekstrak daun sirsak.

Keberadaan flavonoid, tanin dan terpenoid terbukti berperan sebagai agen bioreduktor dan penstabil dalam sintesis nanopartikel perak (NPAg), seperti yang disampaikan oleh Suprihatin *et al.* [10] secara eksplisit menunjukkan bahwa kombinasi senyawa flavonoid, tanin dan terpenoid memiliki kemampuan yang sangat cukup untuk menghasilkan nanopartikel perak yang stabil. Hal ini menunjukkan potensi besar daun sirsak dalam sintesis nanopartikel, yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga efisien secara reaksi kimia.

Tabel 1. Hasil Uji Fitokimia

Senyawa	Hasil	Keterangan
Alkaloid	(-)	
Flavonoid	(+)	
Saponin	(-)	
Tanin	(+)	
Terpenoid	(+)	

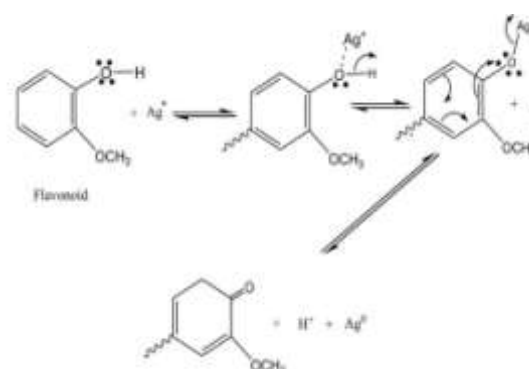


Gambar 1. Perubahan dalam sintesis nanopartikel perak

3.2 Sintesis Nanopartikel Perak

Adanya perubahan warna menjadi merah kecoklatan mengindikasikan nanopartikel perak. Hasil sintesis

nanopartikel perak dapat dilihat pada **Gambar 1**. Proses sintesis memanfaatkan ekstrak daun sirsak, yang mengandung metabolit sekunder berperan sebagai bioreduktor. Gugus hidroksil (-OH) pada terpenoid dan tanin dalam ekstrak tersebut mendonorkan elektron ke ion Ag^+ , mereduksi ion tersebut menjadi atom Ag serta menghasilkan NPAg [14]. Mekanisme pembentukannya diilustrasikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Mekanisme pembentukan NPAg oleh flavonoid [14]

3.3 Karakterisasi Nanopartikel Perak

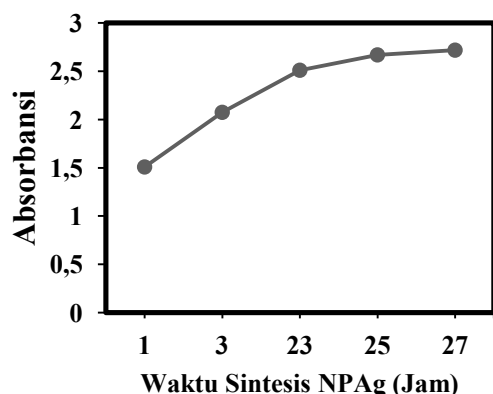
Nanopartikel perak (NPAg) diuji dengan spektrofotometer UV-Vis dan PSA. NPAg dikarakterisasi lalu diukur ukuran partikelnya dengan menggunakan instrumen PSA, sementara spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk memeriksa pembentukan awal NPAg dengan mengamati panjang gelombang maksimum yang berkisar pada 400-500 nm, dimana panjang gelombang tersebut mengindikasikan NPAg telah terbentuk [15].

3.3.1 Pembentukan Nanopartikel Perak

Pembentukan nanopartikel perak ditunjukkan pada panjang gelombang 400-500 nm, merupakan karakteristik resonansi plasmon permukaan (SPR) [15]. **Gambar 3** menampilkan grafik antara waktu sintesis dengan absorbansi setelah 1, 3, 23, 25, dan 27 jam reaksi dihentikan.

Hasil karakterisasi nanopartikel perak menggunakan spektrofotometri UV-Vis

menunjukkan adanya puncak serapan khas pada rentang 453,50 hingga 459,50 nm, yang menandakan terbentuknya NPAg melalui fenomena *Surface Plasmon Resonance* (SPR). Hal ini sesuai dengan karakteristik dari nanopartikel yang mengatakan bahwa panjang gelombang maksimum nanopartikel sebesar 400-500 nm [15].



Gambar 3. Grafik antara waktu sintesis dengan absorbansi

Stabilitas posisi puncak antara jam ke-23 hingga ke-27 menunjukkan bahwa reaksi sintesis mulai mencapai keadaan mendekati stabil, dengan laju pembentukan partikel yang menurun. Selain itu, tidak adanya pergeseran besar atau pelebaran puncak secara drastis menunjukkan bahwa partikel yang dihasilkan cukup stabil dan tidak mengalami aglomerasi berlebihan.

3.3.2 Penentuan Ukuran Partikel

Analisis ukuran partikel dilakukan menggunakan PSA dengan metode DLS yang mengukur penyebaran sinar inframerah akibat gerak Brown partikel dalam cairan. Adapun hasil pengukuran dengan PSA pada nanopartikel adalah rata-rata ukuran partikel berdiameter 63,11 nm dengan nilai zeta potensial sebesar -18,14 mV dan *Polydispersity Index* (PI) sebesar 0,2964.

Pada hasil diketahui ukuran nanopartikel perak yang didapatkan sebesar 63,11 nm, yang sesuai dengan karakteristik

nanopartikel yang berkisar antara 1-100 nm. Ukuran partikel perak yang homogen ditunjukkan oleh *Polydispersity Index* (PI) di bawah 0,5 yang menandakan distribusi ukuran yang sempit, yang merupakan tanda bahwa partikel terbentuk dengan baik dan seragam [16]. Stabilitas nanopartikel diukur melalui zeta potensial, dimana nilai zeta potensial yang diperoleh sebesar -18,14 mV. Menurut Akhter *et al.* [17], nilai zeta potensial di bawah ± 30 mV menandakan kestabilan koloid yang kurang, sehingga partikel cenderung berinteraksi satu sama lain dan membentuk aglomerat.

3.4 Karakterisasi Limbah Tekstil

Sampel limbah tekstil diperoleh dari pabrik pencelupan yang berlokasi di Banjar Akta, Gianyar. Hasil karakterisasi limbah tekstil berupa warna limbah, kejernihan, tingkat transparansi dan bau diperoleh dari pengamatan secara langsung. Limbah tekstil yang digunakan tampak sangat gelap dengan warna hitam pekat, yang secara kualitatif mengindikasikan adanya kandungan zat warna organik atau senyawa kompleks yang cukup tinggi. Limbah juga memiliki bau khas menyerupai aroma detergen, yang diduga berasal dari residu surfaktan dan bahan kimia pencelupan. Selain itu, limbah terlihat tidak jernih dan bersifat opak, hal ini ditandai dengan tidak adanya cahaya yang masuk ke limbah. Adapun wujud limbah dapat dilihat pada Gambar 4.

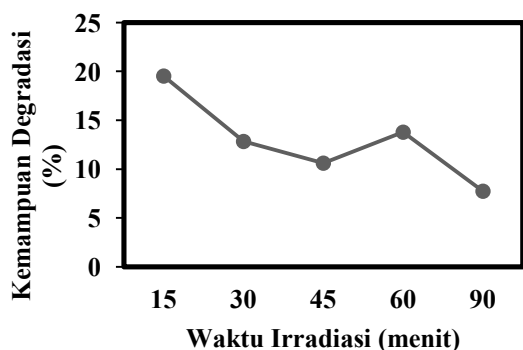


Gambar 4. Limbah cair tekstil

Pada pengukuran pH awal limbah, diperoleh pH 7,26 yang menandakan bahwa sampel limbah sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan. Selain itu, hasil pengukuran kadar BOD dan COD menunjukkan bahwa kadar BOD dan COD pada sampel tinggi, yaitu sebesar 181,944 mg/L dan 333,015 mg/L. Hasil yang diperoleh melampaui baku mutu yang telah ditetapkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No.16 tahun 2019 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Industri Tekstil.

3.5 Penentuan Waktu Penyinaran Optimum

Degradasi limbah tekstil mencapai puncaknya (19,52%) pada 15 menit, tetapi semakin lama waktu penyinaran, kemampuan katalis NPAg dalam mendegradasi zat warna semakin turun. Hal ini dapat dilihat pada waktu iradiasi 90 menit persentase degradasinya hanya sebesar 7,74%. Oleh karena itu, waktu optimum degradasi adalah 15 menit, karena menghasilkan degradasi hampir maksimal dengan waktu yang lebih singkat.

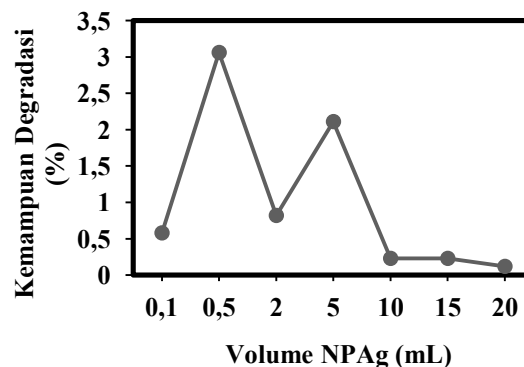


Gambar 5. Penentuan waktu penyinaran optimum

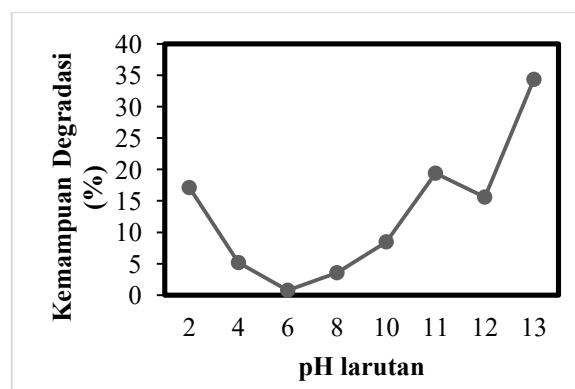
3.6 Penentuan Volume Katalis Optimum

Gambar 6 menunjukkan hasil fotodegradasi limbah tekstil menggunakan berbagai volume nanopartikel perak (NPAg). Degradasi tertinggi (3,06%) dicapai dengan volume NPAg 0,5 mL. Volume 0,5 mL memberikan keseimbangan antara jumlah katalis, luas permukaan aktif,

dan penetrasi cahaya, sehingga mendukung pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{O}_2^-$ secara optimal untuk mendegradasi zat warna [18]. Penurunan efisiensi pada volume di atas 0,5 mL diduga disebabkan oleh peningkatan kekeruhan dan efek bayangan yang menghambat penetrasi cahaya, sehingga aktivasi katalis menjadi tidak merata.



Gambar 6. Penentuan volume katalis optimum



Gambar 7. Penentuan pH optimum

3.7 Penentuan pH Optimum

Gambar 7 menunjukkan bahwa degradasi limbah tekstil optimal (34,35%) terjadi pada pH 13. Pada pH basa, permukaan nanopartikel Ag cenderung bermuatan negatif, sehingga dapat meningkatkan interaksi elektrostatis dengan molekul zat warna bermuatan positif, yang umum terdapat pada larutan zat warna sintetis. Interaksi ini mempercepat transfer elektron dan

pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yang merupakan agen oksidatif utama dalam fotodegradasi [19]. Kondisi pH basa ini merupakan kondisi operasional selama proses fotodegradasi dan tidak merepresentasikan kondisi akhir limbah. Setelah proses degradasi, pH limbah dapat dinetralkan kembali sehingga tidak meningkatkan risiko lingkungan. Oleh karena itu, pH optimum yang digunakan untuk fotodegradasi adalah pH 13.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Persentase Fotodegradasi

No	%D	%BOD	%COD
A	34,27±0,01	5,54	9,10
B	37,44±0,007	11,08	12,22
C	37,76±0,02	5,54	8,66

3.8 Penentuan Efektivitas Fotodegradasi Limbah Tekstil

Efektivitas fotodegradasi limbah zat warna dievaluasi melalui tiga parameter utama, yaitu persentase degradasi zat warna, penurunan nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Chemical Oxygen Demand* (COD), yang secara kolektif mencerminkan tingkat penghilangan senyawa organik dalam limbah. Hasil evaluasi ditampilkan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, efektivitas fotodegradasi limbah zat warna tekstil menggunakan nanopartikel perak dari ekstrak daun sirih (NPAg) mencapai 34,27-37,76% dengan penurunan nilai COD sebesar 8,66-12,22% dan BOD sebesar 5,54-11,08%. Hasil yang diperoleh ini dapat dikaitkan dengan beberapa faktor penting, termasuk karakteristik fisikokimia dari nanopartikel yang digunakan, intensitas sinar tampak, serta kondisi awal limbah seperti konsentrasi awal zat warna dan keberadaan senyawa pengganggu lainnya.

Selain itu, karakteristik limbah tekstil yang kompleks, mengandung berbagai

senyawa organik dan anorganik, serta zat warna yang memiliki struktur aromatik stabil seperti metilen biru atau remazol, dapat menghambat proses degradasi. Struktur ini memerlukan radikal dalam jumlah besar untuk dipecah, dan jika konsentrasi radikal terbentuk tidak mencukupi akibat rendahnya efisiensi fotokatalis, maka proses fotodegradasi menjadi tidak maksimal [20].

Penelitian ini memiliki keunggulan dibanding studi lain dalam fotodegradasi limbah tekstil, baik dari sisi teknis, jenis sampel, maupun aplikasinya. Salah satu keunggulan utama adalah penggunaan sinar tampak sebagai sumber energi, memungkinkan proses berlangsung hanya dengan cahaya matahari sehingga lebih hemat energi dan ramah lingkungan [21]. Pemilihan ini didasari oleh kecocokan energi foton sinar tampak dengan *band gap* nanopartikel perak (NPAg), yang berkisar 2-4 eV, memungkinkan eksitasi elektron tanpa bantuan sinar UV [22]. Keunggulan lainnya adalah penggunaan limbah tekstil asli dari industri pencelupan, bukan larutan simulasi zat pewarna seperti yang biasa digunakan dalam banyak studi. Limbah asli jauh lebih kompleks karena mengandung banyak zat kimia berbeda, yang membuat pengolahannya lebih menantang tapi juga lebih realistis untuk diterapkan di lapangan [23].

Meskipun penurunan parameter seperti BOD dan COD belum maksimal, hal itu wajar karena limbah yang digunakan memang sangat kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi dasar penting untuk pengembangan berikutnya. Secara keseluruhan, penelitian ini menggabungkan pendekatan inovatif, realistis, dan berkelanjutan yang membuatnya relevan tidak hanya secara akademis, tapi juga untuk diterapkan langsung di industri pengolahan limbah di Indonesia.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat dilihat jika nanopartikel perak yang

diperoleh dari ekstrak daun sirsak terbukti efektif dalam melakukan fotodegradasi limbah tekstil pada kondisi optimum. Kondisi terbaik ditemukan pada pH 13, waktu iradiasi 15 menit, dan dengan volume NPAg 0,5 mL. Dalam kondisi tersebut, diperoleh tingkat degradasi sebesar 34,37-37,76% dengan persentase penurunan kadar BOD sebesar 5,54-11,08% dan kadar COD sebesar 8,66-12,22%. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan pretreatment pada limbah tekstil sesuai dengan standar pengolahan awal, mengingat bahwa fotodegradasi merupakan metode pengolahan lanjutan (*advanced treatment*) yang memerlukan kondisi awal limbah yang terkontrol.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tong, X., Zhan, X., Rawach, D., Chen, Z., Zhang, G., & Sun, S. (2020). Low-Dimensional Catalysts for Oxygen Reduction Reaction. *Progress in Natural Science: Materials International*, 30(6), 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.09.011>
- [2] Saraswati, I. G. A. A., Diantariani, N. P., & Suarya, D. P. (2015). Fotodegradasi Zat Warna Tekstil Congo Red dengan Fotokatalis ZnO-Arang Aktif dan Sinar Ultraviolet (UV). *Jurnal Kimia*, 9(2), 175–182.
- [3] Gharibshahi, L., Saion, E., Gharibshahi, E., Shaari, A. H., & Matori, K. A. (2017). Structural and Optical Properties of Ag Nanoparticles Synthesized by Thermal Treatment Method. *Materials*, 10(4), 402–415. <https://doi.org/10.3390/ma10040402>
- [4] Herrmann, J. M. (1999). *Water Treatment by Heterogeneous Photocatalysis* (pp. 171–194). Environmental Catalysis. https://doi.org/10.1142/9781848160613_0009
- [5] Rahmadani, D., Side, S., & Putri, S. E. (2020). Pengaruh Penambahan PVA terhadap Ukuran Nanopartikel Perak Hasil Sintesis Menggunakan Bioreduktor Ekstrak Daun Sirsak (*Annona muricata* L.). *Sainsmat*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.35580/sainsmat91141862020>
- [6] Lestari, G. A. D., Suprihatin, I. E., & Sibarani, J. (2019). Synthesis of Silver Nanoparticles (NPAg) using Andaliman (*Zanthoxylum acanthopodium* DC.) Fruit Water Extract and Its Application in Indigosol Blue Photodegradation. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(5), 200–205. <https://doi.org/10.14710/jksa.22.5.200-205>
- [7] Singh, P., Kim, Y.-J., Zhang, D., & Yang, D.-C. (2016). Biological Synthesis of Nanoparticles from Plants and Microorganisms. *Trends in Biotechnology*, 34(7), 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.02.006>
- [8] Suprihatin, I. E., Lestari, G. A. D., Mardhani, R., & Edoway, V. (2020). Silver Nanoparticles (AgNPs) as Photocatalyst in the Photodegradation of Rhemazol Brilliant Blue. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 959(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/959/1/012018>
- [9] Sinha, T., Ahmaruzzaman, M., & Bhattacharjee, A. (2016). A Green and Facile Synthesis of Silver Nanoparticles and its Application in the Reduction and Photodegradation of Organic Compounds. *Indian Journal of Chemical Technology*, 23(6), 462–468. <https://doi.org/http://op.niscair.res.in/index.php/IJCT/article/view/6969>
- [10] Suprihatin, I. E., Widihati, I. A. G., Suastuti, N. G. A. M. D. A., & Lestari, G. A. D. (2023). *Nanopartikel Perak Si Kecil dengan Segudang Manfaat*. NILACAKRA. Lampung.
- [11] Harborne, J. B. (1984). *Phytochemical Methods*. Springer Netherlands.

- <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5570-7>
- [12] Badan Standarisasi Nasional. 2004. SNI. 06-6989.11-2004 Air dan Air Limbah-Bagian 11: Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan Alat pH Meter. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
 - [13] Badan Standarisasi Nasional. 2009. SNI. 06-6989.72-2009 Air dan Air Limbah-Bagian 72: Cara Uji Uji Kebutuhan Oksigen Biokimia (Biochemical Oxygen Demand). Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
 - [14] Fajri, N., Putri, L. F. A., Prasetyo, M. R., Azizah, N., Pratama, Y., & Susanto, N. C. A. (2022). Potensi Batang Pisang (*Musa paradisiaca* L) Sebagai Bioreduktor dalam Green Sintesis Ag Nanopartikel. *Jurnal Penelitian Sains*, 24(1), 33–37. <https://doi.org/10.56064/jps.v24i1.668>
 - [15] Singh, T. D., Singh, T. G., & Henam, S. D. (2017). Green Synthesis, Growth and Catalytic Activity of Silver Nanoparticles. *Green Materials*, 5(4), 165–172. <https://doi.org/10.1680/jgrma.17.00022>
 - [16] Suprihatin, I. E., Saraswati, A. A. S. D., & Bawa, I. G. A. G. (2024). Sintesis Fotokatalis Nanopartikel Perak (NPAg) dengan Bioreduktor Ekstrak Daun Sirsak (*Annona Muricata* L.) Dan Aplikasinya Dalam Fotodegradasi Zat Warna Congo Red. *Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)*, 12(2).
 - [17] Akhter, Mst. S., Rahman, Md. A., Ripon, R. K., Mubarak, M., Akter, M., Mahbub, S., Al Mamun, F., & Sikder, Md. T. (2024). A systematic review on green synthesis of silver nanoparticles using plants extract and their bio-medical applications. *Heliyon*, 10(11), 1–39.
 - [18] Tâm, K. T., & Ngân, N. T. K. 2022. Green Synthesis Of Silver Nanoparticles Using Citrus Maxima Peel Extract For Photocatalytic Degradation Of Methylene Blue, And Rhodamine B Under Sunlight. *TNU Journal Of Science And Technology*, 227(08), 410–416. <https://doi.org/10.34238/Tnu-Jst.5896>
 - [19] Vaez, Z., & Javanbakht, V. (2020). Synthesis, characterization and photocatalytic activity of ZSM-5/ZnO nanocomposite modified by Ag nanoparticles for methyl orange degradation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 388, 112064. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112064>
 - [20] Bahadori, E., Rapf, M., Di Michele, A., & Rossetti, I. (2020). Photochemical vs. photocatalytic azo-dye removal in a pilot free-surface reactor: Is the catalyst effective? *Separation and Purification Technology*, 237, 116320. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116320>
 - [21] Taymaz, B. H. (2023). A novel Ppy/ZnO@Co ternary nanocomposite with enhanced visible light-driven photocatalytic performance. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 144, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104741>
 - [22] Khanna, S. N., & Castleman, A. W. (2003). *Quantum Phenomena in Clusters and Nanostructures*. Springer.
 - [23] Ahmed, T., Noman, M., Shahid, M., Niazi, M. B. K., Hussain, S., Manzoor, N., Wang, X., & Li, B. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles transformed synthetic textile dye into less toxic intermediate molecules through LC-MS analysis and treated the actual wastewater. *Environmental Research*, 191, 110142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110142>