

## **OPTIMIZATION ADSORPTION OF HEXAVALEN CHROMIUM (Cr-VI) IN ACTIVATED CARBON (MICROWAVE-ASSISTED $ZnCl_2$ CHEMICAL-ACTIVATION) USING TAGUCHI METHOD**

### **OPTIMASI ADSORPSI KROMIUM HEKSAVALEN (CR-VI) DENGAN KARBON AKTIF TERAKTIVASI $ZnCl_2$ BERBANTU MICROWAVE MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI**

**Atiqa Rahmawati<sup>1\*</sup>, Fadzkurisma Robbika<sup>1</sup>, Yuafni<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Leather Processing Technology, Politeknik ATK Yogyakarta, 55188, Yogyakarta, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Leather Product Technology, Politeknik ATK Yogyakarta, 55188, Yogyakarta, Indonesia

\* Corresponding author: \*tiqa054@gmail.com

#### **Abstract:**

The issue of heavy metal pollution is a significant concern in the environmental. Hexavalent chromium (Cr(VI)) is hazardous heavy metal when it is discharged and expands within ecosystem. Cr(VI) is a hazardous compound that high susceptibility to oxidation and mutagenic. The tannery industry generates hexavalent chromium in its liquid waste. Managing Cr(VI) liquid waste could use the adsorption technique with activated carbon. In this study the activation of activated carbon using microwave-assisted  $ZnCl_2$  chemical activation. The activated carbon used for adsorbing the Cr(VI). The objective of this study was to ascertain the optimum parameters for the adsorption of Cr(VI) utilizing activated carbon. The optimization method is Taguchi, which incorporates three factors: A (pH), B (activated carbon dosage), and C (agitation). The result of optimization is pH 2; 0,4 g activated carbon dosage, and agitation 20 rpm, which the optimal response was 16.7498 mg/L. The analysis using the desirability obtained desirability value of 1. The ANOVA results indicate that the pH significant on the response. The adjusted R-square is 0.9667 and predicted R-square is 0.8668. It can be concluded that the model and actual conditions has slightly discrepancies. Then, the regression equation from the model can be estimate the actual value.

**Keywords:** activated carbon, adsorption, chromium heksavalen, optimization, taguchi method

#### **Intisari:**

Pencemaran logam berat merupakan salah satu masalah lingkungan. Kromium heksavalen (Cr(VI)) merupakan salah satu logam berat berbahaya apabila terlepas dan terakumulasi ke lingkungan. Cr(VI) merupakan senyawa beracun, mudah teroksidasi dan mutagenik. Industri penyamakan kulit merupakan industri yang menghasilkan limbah cair Cr(VI). Penanganan limbah cair Cr(VI) yaitu dengan metode adsorpsi menggunakan karbon aktif. Pada penelitian ini karbon aktif diaktivasi dengan aktivasi kimia menggunakan  $ZnCl_2$  berbantu mikrowave. Karbon aktif yang dihasilkan digunakan sebagai adsorben untuk penyerapan logam berat Cr(VI). Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui kondisi optimal proses adsorpsi Cr(VI) menggunakan karbon aktif

teraktivasi  $ZnCl_2$  berbantu microwave. Metode optimasi yang digunakan yaitu metode Taguchi dengan 3 faktor : A(pH); B(dosis karbon aktif); dan C(putaran pengadukan). Hasil penelitian menunjukkan optimasi proses adsorpsi yaitu pada pH 2; dosis karbon aktif 0,4 g; dan putaran pengadukan 20 rpm dengan nilai adsorpsi optimal 16,7498 mg/L. Hasil analisa dengan menggunakan fungsi desirability mempunyai nilai desirability sebesar 1. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa pH merupakan faktor yang berpengaruh signifikan terhadap respon. Nilai R-square adjusted sebesar 0,9667, sedangkan nilai R-square predicted sebesar 0,8668. R-square model dan actual mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda sehingga persamaan regresi yang dihasilkan dari model dapat digunakan untuk memprediksi hasil aktual dari penelitian.

**Kata kunci:** adsorpsi, Cr(VI), karbon aktif, optimasi, taguchi

## Pendahuluan

Industri penyamakan kulit seringkali mengeluarkan limbah cair yang mengandung logam berat beracun pada badan air. Hal ini menyebabkan pencemaran baik badan air maupun di lingkungan sekitar limbah terbuang [1]. Pencemaran logam berat merupakan salah satu masalah lingkungan di dunia, logam berat yang terlepas ke lingkungan akan terakumulasi pada badan air maupun tanah, sehingga dapat menyebabkan masalah pada ekosistem dan Kesehatan manusia [2]. Kromium heksavalen (Cr-VI) merupakan logam berat yang dihasilkan industri penyamakan kulit, Cr(VI) merupakan jenis kromium yang beracun dan karsinogenik terhadap hewan maupun manusia [3], selain itu adanya kandungan Cr(VI) pada limbah cair, dimana Cr(VI) merupakan senyawa beracun, mudah teroksidasi, karsinogenik, dan mutagenik sehingga menyebabkan resiko kesehatan pada manusia, khususnya resiko terhadap kanker [4]. Kandungan Cr(VI) dalam limbah cair dapat dikurangi secara efisien menggunakan beberapa metode, seperti ion exchange, presipitasi kimia, elektrokemikal, treatment secara biologi, nanofiltrasi, microfiltrasi dan adsorpsi[4]. Dari beberapa metode yang disebutkan, adsorpsi merupakan metode yang banyak digunakan dalam penyerapan logam Cr(VI) dalam limbah cair. Metode adsorpsi dipilih dikarenakan lebih ekonomis dan tidak menimbulkan efek samping yang beracun [5]. Keunggulan lain menggunakan metode adsorpsi yaitu mempunyai regenerasi yang tinggi, dan efisien dalam penyerapan heksavalen dan trivalent kromium dari air limbah walaupun dalam konsentrasi rendah [4]. Dalam pengolahan limbah, karbon aktif seringkali digunakan dalam proses adsorpsi, hal ini dikarenakan karbon aktif cukup menjanjikan dalam penyerapan anion Cr(VI) dan kation Cr(III) dari limbah cair [4].

Karbon aktif merupakan senyawa karbon amorf yang dapat dihasilkan dari arang dengan perlakuan khusus untuk mendapatkan permukaan karbon yang luas [5]. Karbon aktif terdiri dari gugus fungsi yang berikatan membentuk cincin aromatis. Perlakuan secara pemanasan, atau dengan bahan kimia digunakan untuk memperluas permukaan pada karbon, yang nantinya akan digunakan dalam aplikasi yang spesifik [6]. Karbon aktif dapat diproduksi dari limbah biomassa, seperti ampas tebu [7], sekam padi [8], limbah jagung, limbah pisang [5]. Produksi karbon aktif dilakukan melalui proses aktivasi fisik dan kimia [9]. Pada penelitian ini preparasi karbon aktif menggunakan bahan baku berupa ampas tebu, dan proses aktivasi dilakukan dengan kombinasi secara kimia dan fisik. Aktivasi kimia dilakukan dengan impregnasi menggunakan  $ZnCl_2$ , kemudian dilanjutkan dengan aktivasi fisik berbantu microwave. Pada permukaan karbon aktif banyak terdapat banyak gugus fungsi oksigen yang reaktif secara kimiawi, sehingga karbon aktif memiliki afinitas lebih kuat dengan ion logam. Adsorben berbasis karbon sering digunakan dalam pengolahan limbah cair yang terkontaminasi Cr(VI) [10]. Berdasarkan struktur dan kekhususan Cr(VI), gugus fungsi dalam karbon aktif reaktif dan berinteraksi kuat dengan  $Cr_2O_7^{2-}$ . Pada

penelitian ini dilakukan optimasi adsorpsi logam berat Cr(VI) dengan menggunakan karbon aktif. Untuk mendapatkan nilai parameter yang optimal dalam penyerapan kromium heksavalen dapat dilakukan dengan menggunakan Design of Experiment (DOE). DOE merupakan metode statistika yang efektif untuk menganalisa hasil eksperimen dan mengevaluasi kontribusi parameter penelitian. Selain itu DOE merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk tujuan optimasi proses [11]. Metode taguchi merupakan metode optimasi yang unik dan memungkinkan jumlah percobaan yang minimum, selain itu keunggulan metode taguchi yaitu mengurangi biaya, meningkatkan kualitas dan memberikan penyelesaian robus desain [12]. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui kondisi optimal proses adsorpsi Cr(VI) menggunakan karbon aktif teraktivasi  $ZnCl_2$  berbantu microwave. Selain itu untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap pengurangan kandungan Cr(VI) pada sampel.

## Metode Penelitian

### Alat Dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu flokulator (JLT6 Velp Scientifica), spektrofotometer Uv-vis (perkin elmer lamda 25), neraca analistis, dan alat gelas. Sedangkan bahan yang digunakan yaitu karbon aktif teraktivasi oleh  $ZnCl_2$  berbantu mikrowave (hasil penelitian),  $K_2Cr_2O_7$  (merck), dan aquades.

### Metode

#### Adsorpsi Cr(VI) Oleh Karbon Aktif Teraktivasi $ZnCl_2$ Berbantu Mikrowave

Adsorpsi Cr(VI) dengan karbon aktif dilakukan pada sistem batch. Larutan limbah sintesis kromium 50 ppm dibuat dengan menimbang potassium dikromat 50 mg dalam 1000 ml aquades. Adsorpsi Cr(VI) dilakukan dengan menggunakan flokulator JTL6 Velp Scientifica. Variabel proses adsorpsi yaitu pH (A), dosis karbon aktif (B), dan putaran pengadukan (C). Kombinasi variabel dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan kombinasi variabel dapat dilihat pada Tabel 2. Proses adsorpsi dilakukan selama 90 menit. Hasil adsorpsi dianalisa kandungan Cr-VI dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis Perkin Elmer lamda 25. Sedangkan data yang didapatkan diolah menggunakan Minitab 19®.

#### Desain Optimasi Taguchi

Design of Experiment dengan metode Taguchi digunakan untuk melihat interaksi antara variabel dan respon dari proses adsorpsi. Metode taguchi dapat digunakan untuk mengetahui pengaruh dari faktor pada respon dan kondisi optimal dari faktor yang digunakan pada penelitian [13]. Keunggulan metode taguchi dengan metode desain konvensional yaitu dapat menentukan kondisi optimal dengan variabilitas minimum, penentuan nilai optimal pada metode taguchi dinyatakan dengan signal-to-noise ratio (S/N) [12]. Pada penelitian ini variabel bebas A,B, C mempunyai 3 level, dengan menggunakan  $L_9$  ortogonal array (OA). Tipe S/N rasio yang digunakan pada penelitian ini yaitu "the larger is better" yang berarti nilai adsorpsi Cr(VI) yang tertinggi adalah hasil yang paling baik, dikarenakan tujuan penelitian ini untuk mendapatkan pengurangan kandungan Cr(VI) terbesar dalam sampel. *Analisa of Variance* (ANOVA) digunakan untuk penentuan pengaruh variabel terhadap respon. Respon pada penelitian yang dilaksanakan yaitu konsentrasi Cr(VI) yang terserap oleh karbon aktif.

Tabel 1. Controlable factor dan levelnya

Variabel Penelitian	Code	Unit	Level 1	Level 1	Level 3
---------------------	------	------	---------	---------	---------

pH	A	-	2	5	7
Dosis karbon aktif	B	gram	0,2	0,4	0,6
Kecepatan pengadukan	C	rpm	0	20	40

**Tabel 2.** L<sub>9</sub> Orthogonal array untuk adsorpsi Cr(VI) menggunakan karbon aktif

No eksperimen	Faktor		
	A; pH	B; Dosis Karbon Aktif	C; putaran Pengadukan (rpm)
1	2	0,2	0
2	2	0,4	20
3	2	0,6	40
4	5	0,2	20
5	5	0,4	40
6	5	0,6	0
7	7	0,2	40
8	7	0,4	0
9	7	0,6	20

### **Analisa Kandungan Cr(VI)**

Analisa Kandungan Cr(VI) dilakukan menggunakan alat Spektrofotometer Uv-Vis Perkin Elmer lamda 25. Metode yang digunakan yaitu sesuai dengan SNI 6989.71:2009 tentang Air dan Air Limbah – Bagian 71: Cara uji krom heksavalen (Cr-VI) dalam contoh uji secara spektrofotometri.

### **Hasil dan Pembahasan**

#### **Optimasi menggunakan metode Taguchi**

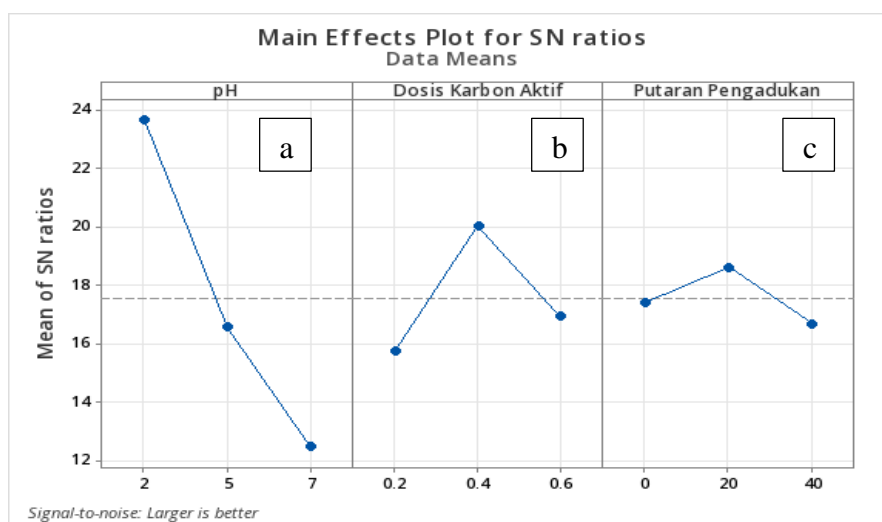
Data hasil penelitian dengan respon berupa konsentrasi Cr(VI) yang terserap karbon aktif dapat dilihat pada Tabel 3. Pada tabel 3 dapat pula dilihat nilai rasio S/N dengan kombinasi variabel orthogonal array L<sub>9</sub>. S/N ratio merupakan nilai terukur yang disarankan oleh metode Taguchi untuk digunakan sebagai pengukuran penyimpangan karakteristik kualitas dari nilai yang diinginkan [11]. Pada penelitian ini digunakan S/N ratio the larger is better dimana nilai optimum dapat ditunjukkan pada nilai S/N ratio yang tertinggi. Dari Tabel 3 dapat dilihat nilai S/N ratio tertinggi yaitu pada eksperimen no 2 dengan dengan nilai pH 2; dosis karbon aktif 0,4 gram; dan putaran pengadukan 20 rpm.

Pada gambar 1 dapat dilihat nilai dari rata – rata S/N ratio dianalisa, dan level optimum tiap faktor ditentukan dari nilai S/N ratio yang tertinggi. Gambar 1 menunjukkan nilai optimal pada masing – masing faktor. Pada pH nilai S/N ratio tertinggi yaitu pada pH 2, dosis karbon aktif memiliki nilai S/N rasio tertinggi pada dosis 0,4 gram, sedangkan putaran pengadukan menunjukkan nilai S/N rasio tertinggi pada putaran pengadukan 20 rpm. Hal tersebut sama halnya dengan hasil S/N rasio dari Tabel 3 yang menyebutkan nilai optimal pada proses adsorpsi Cr(VI) menggunakan karbon aktif teraktivasi ZnCl<sub>2</sub> berbantu microwave yaitu pada pH 2; dosis

karbon aktif 0,4 gram; dan putaran pengadukan 20 rpm. Pengaruh pH pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Jiang, dkk [7] menyatakan bahwa pH yang digunakan pada penelitian yaitu pada pH 2 sampai 10. Pada pH diatas 3 proses adsorpsi tidak menghasilkan respon yang tidak signifikan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan, bahwa pH optimal pada proses adsorpsi logam berat Cr(VI) pada pH 2. Pengaruh dosis karbon aktif, pada penelitian ini dosis karbon aktif yang paling baik pada dosis 0,4 gram. Pada penelitian yang dilakukan oleh Salihi dkk [14] meyakini bahwa pada dosis karbon aktif diatas 0,5 gram, removal efisiensi tidak memperlihatkan perubahan yang signifikan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan pada dosis diatas 0,4 g removal efficiency cenderung konstan dan turun.

**Tabel 3.** L<sub>9</sub> orthogonal array dengan respon konsentrasi Cr(VI) yang terserap dan S/N ratio

No eksperimen	Faktor			Konsentrasi Cr(VI) yang terserap (mg/l)	S/N Rasio
	A; pH	B; Dosis Karbon Aktif	C; putaran Pengadukan (rpm)		
1	2	0,2	0	13.4831	22,5958
2	2	0,4	20	16.7498	24,4802
3	2	0,6	40	15.7303	23,9347
4	5	0,2	20	7.5483	17,5569
5	5	0,4	40	8.9888	19,0740
6	5	0,6	0	4.4944	13,0534
7	7	0,2	40	2.2472	7,0328
8	7	0,4	0	6.7416	16,5753
9	7	0,6	20	4.8725	13,7550



**Gambar 1.** Main effect pada tiap faktor untuk S/N rasio : a) pH; b) Dosis karbon aktif; c) putaran pengadukan

**Analisa ANOVA**

Analisa ANOVA digunakan untuk mengevaluasi parameter control pada respon yang diberikan, dalam hal ini responnya berupa konsentrasi Cr(VI) yang terserap oleh karbon aktif. Hasil analisa ANOVA dapat dilihat pada Tabel 4. Analisa ANOVA dilakukan dengan menggunakan nilai  $\alpha(5\%)$  atau 0,05. Sehingga apabila nilai  $p\text{-value} > 0,05$  maka dapat dikatakan faktor tidak mempunyai pengaruh signifikan terhadap respon, sebaliknya apabila nilai  $p\text{-value} < 0,05$  maka faktor berpengaruh signifikan terhadap respon [15]. Pada tabel 4 dapat dilihat bahwa pada faktor pH mempunyai  $p\text{-value}$  sebesar 0,037 yang mengindikasikan pH merupakan faktor yang berpengaruh pada respon. Sedangkan pada variabel dosis karbon aktif dan putaran pengadukan nilai  $p\text{-value}$  lebih besar dari 0,05 yang mengindikasikan bahwa faktor tersebut kurang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon. Korelasi antara faktor dengan respon ditunjukkan pada persamaan regresi dibawah ini.

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi Cr(VI)} = & 8.984 + 6.337 \text{ pH}_2 - 1.974 \text{ pH}_5 - 4.364 \text{ pH}_7 - 1.224 \text{ Dosis Karbon Aktif}_{0.2} \\ & + 1.843 \text{ Dosis Karbon Aktif}_{0.4} - 0.618 \text{ Dosis Karbon Aktif}_{0.6} \\ & - 0.744 \text{ Putaran Pengadukan}_0 + 0.740 \text{ Putaran Pengadukan}_{20} \\ & + 0.005 \text{ Putaran Pengadukan}_{40} \end{aligned}$$

**Tabel 4.** Analisa ANOVA adsorpsi logam berat Cr(VI)

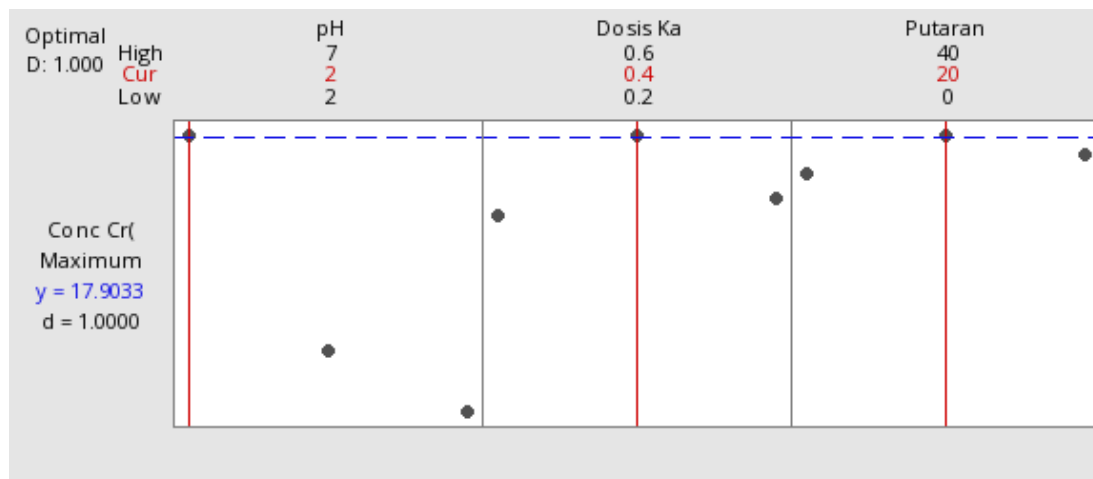
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	2	189.281	94.641	26.36	0.037
Dosis Karbon Aktif	2	15.832	7.916	2.20	0.312
Putaran Pengadukan	2	3.303	1.651	0.46	0.685
Error	2	7.181	3.591		
Total	8	215.597			

Selain itu hasil analisa ANOVA didapatkan nilai R-square adjusted sebesar 0,9667, sedangkan nilai R-square predicted sebesar 0,8668. Model yang signifikan mempunyai perbedaan nilai R-square kurang dari 0,2 [16]. Selisih antara R-square adjusted dan prediksi yaitu sebesar 0,099, sehingga dapat dikatakan model dari penelitian ini signifikan. Selain itu Nilai r-square dinyatakan sesuai dengan model apabila mempunyai nilai lebih dari 75% [17], sehingga dapat dikatakan persamaan regresi pada penelitian ini dapat digunakan untuk memprediksi hasil actual dari penelitian.

**Proses Optimasi**

Kondisi optimal untuk adsorpsi Cr(VI) menggunakan karbon aktif ditentukan dengan konsentrasi analisa Cr(VI) yang terserap oleh karbon aktif. Kondisi optimal untuk penyerapan kromium heksawavlen ditentukan dengan minitab. Kondisi optimal proses dioptimasi apabila bila desirability mendekati 1 [18]. Tujuan utamanya yaitu untuk menentukan nilai desirability yang maksimum. Fungsi desirability merupakan metode untuk menentukan optimalisasi yang simultan dari faktor A (pH); B (dosis karbon aktif); C (putaran pengadukan) yang menghasilkan respon paling optimal. Hasil variabel optimal yaitu pada pH 2; dosis karbon aktif 0,4 gram; dan putaran pengadukan 20 rpm dengan nilai penyerapan Cr(VI) sebesar 16,7498 mg/L. Nilai desirability yaitu 1 dapat dilihat pada Gambar 2. Secara keseluruhan terdapat korelasi yang baik

antara nilai dari fungsi desirability dan nilai dari data aktual. Nilai prediksi dan nilai aktual mempunyai nilai error yaitu 6,88%. Penelitian menunjukkan bahwa model Taguchi dengan fungsi desirability dapat digunakan untuk mengoptimalkan kondisi eksperimen untuk penyerapan Cr(VI) dengan menggunakan karbon aktif [16]. Hasil proses optimasi baik dari optimasi taguchi menggunakan S/N rasio maupun optimasi menggunakan fungsi desirability menghasilkan hasil yang sama yaitu pada faktor pH 2; dosis karbon aktif 0,4 gram; dan putaran pengadukan 20 rpm.



**Gambar 2.** Optimasi dengan menggunakan fungsi desirability

### Kesimpulan

Penelitian optimasi adsorpsi Cr(VI) dengan menggunakan karbon aktif teraktivasi ZnCl<sub>2</sub> berbantu mikrowave telah berhasil dilakukan. Metode optimasi yang digunakan yaitu metode Taguchi. Hasil optimasi dari metode taguchi dilihat dari nilai S/N rasio tertinggi, nilai S/N rasio tertinggi yaitu pada faktor pH 2; dosis karbon aktif 0,4 gram; dan putaran pengadukan 20 rpm dengan nilai S/N rasio 24,4802. Analisa optimasi juga dilakukan dengan fungsi desirability. Hasil optimasi dari fungsi desirability yaitu pada faktor pH 2; dosis karbon aktif 0,4 gram; dan putaran pengadukan 20 rpm dengan nilai desirability 1. Nilai prediksi dan nilai aktual mempunyai nilai error yaitu 6,88%. Penelitian menunjukkan bahwa model Taguchi dengan fungsi desirability dapat digunakan untuk mengoptimalkan kondisi eksperimen untuk penyerapan Cr(VI) dengan menggunakan karbon aktif. Hasil analisa ANOVA pada penelitian ini menunjukkan bahwa hanya faktor pH yang mempunyai pengaruh signifikan terhadap respon. Nilai R-square adjusted sebesar 0,9667, sedangkan nilai R-square predicted sebesar 0,8668 dengan selisih sebesar 0,099 (kurang dari 0,2) sehingga dapat dikatakan model dari penelitian signifikan, dan persamaan regresi yang dihasilkan dari model dapat digunakan untuk memprediksi hasil aktual dari penelitian.

### Daftar Pustaka

- [1] A. Apriliani, "Pemanfaatan Arang Ampas Tebu sebagai Adsorben Ion Logam Cd, Cr, Cu dan Pb dalam Air Limbah," *Repositoy UIN*, pp. 1–91, 2010.
- [2] R. Delaroza, "Adsorpsi logam berat menggunakan adsorben alami pada air limbah industri," 2018.



- [3] M. Mohammad, I. Yakub, Z. Yaakob, N. Asim, and K. Sopian, "Adsorption Isotherm of Chromium (VI) into ZnCl<sub>2</sub> Impregnated Activated Carbon Derived by Jatropha Curcas Seed Hull," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jan. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/293/1/012013.
- [4] A. T. Vo *et al.*, "Efficient removal of Cr(VI) from water by biochar and activated carbon prepared through hydrothermal carbonization and pyrolysis: Adsorption-coupled reduction mechanism," *Water (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.3390/w11061164.
- [5] Wardalia, "Karakterisasi Pembuatan Adsorben Dari Sekam Padi Sebagai Pengadsorp Logam Timbal Pada Limbah Cair," *Jurnal Integrasi Proses*, vol. 6, no. 2, pp. 83–88, 2016.
- [6] W. Ao *et al.*, "Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92. Elsevier Ltd, pp. 958–979, Sep. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.051.
- [7] W. Jiang *et al.*, "Adsorption of cationic dye from water using an iron oxide/activated carbon magnetic composites prepared from sugarcane bagasse by microwave method," *Environmental Technology (United Kingdom)*, vol. 42, no. 3, pp. 337–350, 2021, doi: 10.1080/09593330.2019.1627425.
- [8] A. Arnelli, U. H. H. Putri, F. N. Cholis, and Y. Astuti, "Use of Microwave Radiation for Activating Carbon from Rice Husk Using ZnCl<sub>2</sub> Activator," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 22, no. 6, pp. 283–291, Nov. 2019, doi: 10.14710/jksa.22.6.283-291.
- [9] A. S. Abdulhameed *et al.*, "Statistical modeling and mechanistic pathway for methylene blue dye removal by high surface area and mesoporous grass-based activated carbon using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activator," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 4, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105530.
- [10] X. Luo, Y. Cai, L. Liu, and J. Zeng, "Cr(VI) adsorption performance and mechanism of an effective activated carbon prepared from bagasse with a one-step pyrolysis and ZnCl<sub>2</sub> activation method," *Cellulose*, vol. 26, no. 8, pp. 4921–4934, May 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02418-9.
- [11] F. Googerdchian, A. Moheb, R. Emadi, and M. Asgari, "Optimization of Pb(II) ions adsorption on nanohydroxyapatite adsorbents by applying Taguchi method," *J Hazard Mater*, vol. 349, pp. 186–194, May 2018, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.056.
- [12] R. Flouty, J. El-Khoury, E. Maatouk, and A. El-Samrani, "Optimization of cu and pb biosorption by aphanizomenon ovalisporum using taguchi approach: Kinetics and equilibrium modeling," *Desalination Water Treat*, vol. 155, pp. 259–271, Jul. 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.24005.
- [13] F. Abbasi, M. Tavakkoli Yarak, A. Farrokhnia, and M. Bamdad, "Keratin nanoparticles obtained from human hair for removal of crystal violet from aqueous solution: Optimized by Taguchi method," *Int J Biol Macromol*, vol. 143, pp. 492–500, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.12.065.
- [14] I. U. Salihi, S. Rahman, and M. Kutty, "SORPTION OF ZINC USING MICROWAVE INCINERATED SUGARCANE BAGASSE ASH (MISCBA)," vol. 3, pp. 47–51, 2016.
- [15] A. H. Jawad, I. A. Mohammed, and A. S. Abdulhameed, "Tuning of Fly Ash Loading into Chitosan-Ethylene Glycol Diglycidyl Ether Composite for Enhanced Removal of Reactive Red 120 Dye: Optimization Using the Box–Behnken Design," *J Polym Environ*, vol. 28, no. 10, pp. 2720–2733, Oct. 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01804-w.
- [16] A. H. Jawad, A. S. Abdulhameed, M. A. K. M. Hanafiah, Z. A. ALOthman, M. R. Khan, and S. N. Surip, "Numerical desirability function for adsorption of methylene blue dye by



- sulfonated pomegranate peel biochar: Modeling, kinetic, isotherm, thermodynamic, and mechanism study," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 38, no. 7, pp. 1499–1509, Jul. 2021, doi: 10.1007/s11814-021-0801-9.
- [17] B. Yingngam, A. Chiangsom, and A. Brantner, "Modeling and optimization of microwave-assisted extraction of pentacyclic triterpenes from *Centella asiatica* leaves using response surface methodology," *Ind Crops Prod*, vol. 147, no. February, p. 112231, 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112231.
- [18] O. Pezoti Junior *et al.*, "Synthesis of ZnCl<sub>2</sub>-activated carbon from macadamia nut endocarp (*Macadamia integrifolia*) by microwave-assisted pyrolysis: Optimization using RSM and methylene blue adsorption," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 105, pp. 166–176, 2014, doi: 10.1016/j.jaap.2013.10.015.