



Studi Optimasi Komposisi *Red Mud* dan Asam Sitrat untuk *Phytomining*

Gilang Lukman Hakim¹, Agus Prasetya², Panut Mulyono², Himawan Tri Bayu Murti Petrus²

¹ Program Studi Magister Teknik Pengendalian Pencemaran Industrial, Departemen Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada

² Departemen Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada

Email Korespondensi: aguspras@ugm.ac.id

Diterima: 17 September 2025

Disetujui: 5 Januari 2025

Diterbitkan: 9 Januari 2025

Kata Kunci:

asam sitrat, phytomining, red mud, remediasi tanah, response surface methodology

ABSTRAK

Red mud merupakan limbah pengolahan bauksit yang saat ini menjadi permasalahan serius dikarenakan sifatnya yang sangat basa, volume produksi yang tinggi, dan mengandung logam berat. Namun, *red mud* memiliki sisi positif berupa kandungan logam tanah jarang yang dapat di-*recovery*. Salah satu metode ramah lingkungan yang dapat diterapkan yakni *phytomining* dikarenakan metode ini dapat sekaligus meremdisi *red mud*. Agar *phytomining* dapat diterapkan dibutuhkan pengkondisian terlebih dahulu agar kondisi pH *red mud* dapat sesuai untuk ditanami tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi pH dan konduktivitas media tanam dengan cara mengoptimasi komposisi *red mud* dan dosis asam sitrat. Pada aplikasi *Design Expert*, dilakukan variasi level komposisi *red mud* yaitu (10%, 30%, dan 50%) dan dosis asam sitrat (20 mg/g, 60 mg/g, dan 100 mg/g) sehingga menghasilkan 13 percobaan. Hasil analisis ANOVA menunjukkan komposisi *red mud* 39.66% dan dosis asam sitrat 20,63 mg/g menghasilkan nilai pH 8,055, mendekati kondisi pH ideal media tanam yang berada pada rentang pH 8,0 – 8,5. Hasil penelitian menunjukkan potensi optimasi *red mud* dan asam sitrat dalam pengkondisian media tanam yang ideal untuk praktik *phytomining*.

Received: 17 September 2024

Accepted: 5 January 2025

Published: 6 January 2025

Keywords:

Citric acid, phytomining, red mud, response surface methodology, soil remediation

ABSTRACT

Red mud is a bauxite processing waste currently a serious problem due to its highly alkaline nature, high production volume, and heavy metal content. However, *red mud* has the positive side of containing rare earth metals that can be recovered. One of the environmentally friendly methods that can be applied is *phytomining* because this method can simultaneously remediate *red mud*. To succeed the *phytomining*, conditioning is needed first so that the pH conditions of *red mud* can be suitable for planting plants. This research aims to evaluate the pH and conductivity conditions of planting media by optimizing the *red mud* composition and citric acid dosage. In the *Design Expert* application, variations in the level of *red mud* composition (10%, 30%, and 50%) and citric acid dosage (20 mg/g, 60 mg/g, and 100 mg/g) were carried out, resulting in 13 experiments. The ANOVA results showed that the *red mud* composition of 39.66% and citric acid dosage of 20.63 mg/g produced a pH value of 8.055, close to the ideal pH condition of growing media (8.0 - 8.5). The results showed the potential for optimization of *red mud* and citric acid in conditioning the ideal growing media for *phytomining* practices.

1. PENDAHULUAN

Red Mud merupakan jenis limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan dan pemurnian bijih bauksit. Limbah ini memiliki sifat alkali yang sangat tinggi dengan rentang nilai pH berkisar di angka 10 – 13 dikarenakan adanya penggunaan NaOH pada proses pemasakan (*digestion*) bijih bauksit (Liu et al., 2007; Power et al., 2011). Hal tersebut dapat berdampak pada kesehatan manusia dan juga mencemari lingkungan dikarenakan *red mud* mengandung zat beracun berupa logam berat (Oprčkal et al., 2020). Selain itu, hal yang menjadi permasalahan pada *red mud* adalah jumlah produksinya yang sangat banyak dimana setiap 1 ton alumina yang dihasilkan akan menghasilkan 1,5 ton limbah *red mud* (Hua et al., 2017).

Saat ini di Indonesia terdapat dua pabrik utama pengolah bijih bauksit menjadi alumina dengan total produksi mencapai 1,3 juta ton tiap tahunnya (Grand Strategy Mineral Dan Batu Bara, 2021). Berdasarkan jumlah alumina yang diproduksi tersebut, maka jumlah *red mud* yang dihasilkan diprediksi berada pada angka 1,95 juta ton/tahun. Oleh karena itu, diperlukan suatu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut agar bencana berupa jebolnya penampungan *red mud* seperti yang terjadi di Ajka, Hungaria, tidak terulang kembali (Hua et al., 2017).

Salah satu solusi yang saat ini banyak dikaji yaitu terkait konsep pemanfaatan *red mud* sebagai sumber sekunder untuk proses *recovery* logam yang terkandung di dalamnya. Hal tersebut dikarenakan *red mud* mengandung logam tanah jarang

(LTJ) yang memiliki nilai ekonomis yang tinggi dan sangat potensial untuk dilakukan *recovery* seperti Neodymium (Nd), Scandium (Sc), dan Praseodymium (Pr) (Borra et al., 2015).

Proses *recovery* yang umum digunakan yaitu dengan cara pelindian menggunakan larutan asam (*acid leaching*). Pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al. (2019), ia mencoba mengevaluasi efisiensi pelindian LTJ menggunakan asam dengan efisiensi pelindian mencapai 93,3 % untuk unsur scandium (Sc). Serupa halnya dengan yang dilakukan oleh Borra et al. (2015), ia menggunakan asam klorida untuk melakukan ekstraksi LTJ pada *red mud* dengan persentase ekstraksi sebesar 80%. Meskipun hasil ekstraksi dan pelindian LTJ pada *red mud* menggunakan asam dapat menghasilkan hasil yang positif dari segi kuantitas LTJ, namun metode ini dapat menimbulkan permasalahan baru berupa limbah asam yang dihasilkan. Oleh karena itu, alternatif yang dapat digunakan untuk melakukan proses *recovery* LTJ pada *red mud* adalah dengan menggunakan metode *phytomining*.

Phytomining merupakan suatu metode ekstraksi logam pada suatu media/substrat dengan menggunakan bantuan tanaman yang dikenal sebagai *hyperaccumulator* (Thomas et al., 2022). *Phytomining* dikatakan berhasil apabila tanaman tersebut dapat mengakumulasi logam sebesar 0,1% (1000 mg/kg) berat kering pada badan tanaman (Sheoran et al., 2009). Selain dapat berfungsi untuk mengakumulasi logam berharga yang terdapat pada suatu substrat, metode ini juga dapat sekaligus berfungsi untuk meremediasi lahan serta dapat memperbaiki struktur tanah yang telah rusak dikarenakan adanya pengayaan mikroba pada area sekitar akar tanaman yang berperan sebagai agen pendegradasi logam berat (Wang et al., 2011). Salah satu penelitian mengenai *phytomining* yang pernah dilakukan yaitu penelitian yang dilakukan oleh Tognacchini et al. (2020). Ia melakukan penelitian menggunakan tanaman *Odontarhena chalydica* pada substrat lumpur galvanik (*galvanic sludge*) dengan target logam berupa nikel. Hasil penelitian menyebutkan bahwa tanaman tersebut mampu untuk mengakumulasi nikel dengan kadar nikel maksimum sebesar 26,8 g/kg.

Untuk mendukung suksesnya metode *phytomining*, terdapat beberapa variabel yang perlu diperhatikan salah satunya yaitu kondisi pH substrat. Variabel pH merupakan variabel yang sangat penting dikarenakan ia dapat secara signifikan meningkatkan penyerapan nutrisi dari substrat oleh tanaman yang akan berimplikasi terhadap besar tanaman, biomassa tanaman, mikroba pada area perakaran, pertumbuhan serta kesehatan tanaman. (Ferrarezi et al., 2022). Selain itu, kondisi pH juga dapat meningkatkan kelarutan logam sehingga lebih mudah diserap oleh akar tanaman (Sheoran et al., 2016). Hal tersebut dikonfirmasi oleh Lian et al. (2022) dimana ia mengevaluasi efek peningkatan pH substrat terhadap tingkat penyerapan logam cadmium (Cd) oleh tanaman *Sedum alfredii* dan *Beta vulgaris*. Hasil penelitian menyebutkan bahwa akumulasi logam Cd meningkat seiring dengan menurunnya nilai pH dengan kondisi optimum berada pada pH 5.5. Mengingat *red mud* memiliki nilai pH basa yang cukup tinggi dan kandungan nutrisi yang minim, maka sebelum dilakukan proses *phytomining* perlu dilakukan penyesuaian kondisi pH terlebih dahulu.

Salah satu cara pengkondisian pH yang dapat dilakukan yaitu dengan cara mengoptimasi dosis asam sitrat dan komposisi *red mud* yang digunakan. Proses optimasi dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Response Surface*

Methodology (RSM). Metode RSM merupakan suatu metode yang mengkombinasikan konsep perhitungan matematis dan statistik yang dapat digunakan untuk memprediksi nilai respon sebagai variabel terikat terhadap variasi variabel bebas yang dijadikan objek studi (Sarker & Nahar, 2024).

Di dalam RSM, data-data respon yang didapatkan berdasarkan uji eksperimen akan dianalisis menggunakan ANOVA. Adanya analisis ANOVA pada RSM berfungsi untuk menguji apakah model yang digunakan signifikan secara statistik berdasarkan nilai dari *p-value*. Jika nilai *p-value* kurang dari 0,05 maka perubahan faktor input berpengaruh terhadap respon yang diuji. Adapun apabila nilai *p-value* lebih dari 0,05, maka perubahan pada faktor input tidak berpengaruh terhadap respon yang diamati (Datri et al., 2023). Selain itu, metode RSM juga dapat menyederhanakan jumlah percobaan yang seharusnya dilakukan sehingga dapat berimplikasi terhadap pengurangan biaya, minimasi limbah yang dihasilkan, serta meningkatkan efisiensi proses secara keseluruhan (Odunayo, 2024).

Metode RSM sudah banyak diterapkan untuk melakukan optimasi pada berbagai bidang penelitian. Pada penelitian yang dilakukan oleh Luo et al. (2022), ia memanfaatkan metode RSM menggunakan aplikasi *design expert* untuk memprediksi nilai *fatigue life* pada aspal daur ulang dengan melakukan variasi komposisi aspal. Pada penelitian tersebut, hasil aktual yang diperoleh di lapangan memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dibandingkan nilai prediksi, dengan nilai *p-value* kurang dari 0,0001. Hal tersebut mengindikasikan bahwa model yang diperoleh merupakan model yang signifikan.

Pada penelitian lainnya, Mahto dan Chakravarthy (2022) menggunakan metode RSM untuk mengoptimasi perancangan *gas turbine combustor*. Pada penelitian tersebut, ia mengevaluasi performa turbin berdasarkan parameter efisiensi pembakaran, *total pressure drop*, dan emisi yang dihasilkan berupa karbon monoksida (CO) dan nitrogen oksida (NOx) dengan melakukan variasi pada tiga variabel berupa *swirl number*, *secondary hole diameter*, dan *dilution hole diameter*. Berdasarkan dua penelitian yang telah dilakukan tersebut, maka RSM terbukti dapat diterapkan untuk proses optimasi. Namun, penerapan RSM pada ranah *phytomining* dan fitoremediasi masih belum banyak diteliti sehingga penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan.

2. METODE PENELITIAN

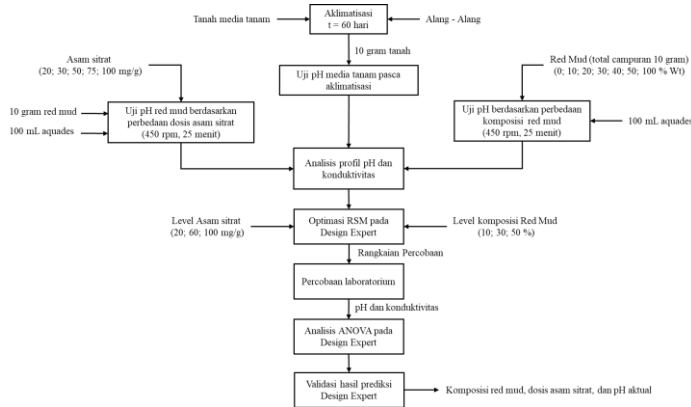
2.1 Bahan Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat 5 bahan baku utama yaitu *red mud*, tanah media tanam, asam sitrat, tanaman alang-alang, dan aquades. Bahan baku berupa *red mud* didapatkan dari pabrik pengolahan dan pemurnian bijih bauksit yang terletak di Kalimantan Barat. Adapun tanah media tanam dan tanaman alang-alang diperoleh dari toko penyedia perlengkapan tanaman, serta asam sitrat yang digunakan berjenis *analytical grade*.

2.2 Diagram Proses Penelitian

Proses penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap. Tahapan tersebut secara berurutan dimulai dari aklimatisasi, pengujian pH dan konduktivitas sampel, optimasi pada aplikasi *design expert*, dan diakhiri dengan tahapan validasi

untuk memperoleh hasil akhir berupa komposisi *red mud*, dosis asam sitrat, dan kondisi pH aktual. Tahapan proses yang terjadi pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan proses penelitian

2.3 Aklimatisasi

Aklimatisasi merupakan suatu tahapan yang dilakukan untuk melihat kemampuan adaptasi suatu tanaman pada wilayah dan kondisi cuaca tertentu. Tahapan ini penting untuk dilakukan agar dapat mengetahui tingkat kemampuan adaptasi tanaman ditinjau berdasarkan pertumbuhannya sehingga dapat ditentukan perlakuan yang tepat kepada tanaman seperti adanya penambahan pupuk (Kleine et al., 2021).

Tahap aklimatisasi pada penelitian ini dilakukan pada *polybag* dengan substrat berupa media tanam dengan komposisi berupa tanah, pupuk kandang, dan kompos. Pada tahap ini juga dilakukan penyiraman untuk memastikan ketersediaan air bagi tanaman tercukupi. Penyiraman dilakukan dengan intensitas sebanyak 150 mL air/hari pada masing-masing sampel. Tahapan ini dilakukan bertujuan untuk melihat performa pertumbuhan tanaman alang-alang yang ditinjau berdasarkan tumbuhnya bunga pada tanaman alang-alang seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah pertumbuhan bunga pada alang-alang mulai terlihat, maka pH dan konduktivitas media tanam diukur untuk dijadikan target pada proses optimasi komposisi red mud dan dosis asam sitrat.



Gambar 2. Tahap aklimatisasi tanaman

2.4 Pengujian Penurunan Nilai pH Awal

Pengujian nilai pH dilakukan pada *red mud*, media tanam, campuran antara *red mud* dan media tanam, serta campuran antara *red mud* dan asam sitrat. Pengujian ini dilakukan untuk melihat pengaruh perubahan nilai pH berdasarkan penambahan *red mud* dan asam sitrat secara terpisah. Komposisi asam sitrat yang diuji pada tahap ini yaitu 20 mg/g, 30 mg/g, 50 mg/g, 75 mg/g, dan 100 mg/g. Sedangkan komposisi *red mud* yang diuji pada tahap ini yaitu 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, dan 50 %. Pengujian pH campuran antara tanah

media tanam dan *red mud* dilakukan dengan total campuran sebanyak 10 gram dan perbandingan 1:10 antara total campuran dan aquades. Proses pencampuran dilakukan dengan melakukan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan laju pengadukan 450 rpm selama 25 menit. Setelah proses pencampuran selesai, nilai pH diukur menggunakan pH meter seperti yang dapat terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengukuran nilai pH campuran

2.5 Proses Optimasi pada Aplikasi Design Expert

Setelah dilakukan pengujian pH berdasarkan penambahan *red mud* dan asam sitrat secara terpisah, maka selanjutnya dilakukan proses optimasi dari dua variabel tersebut. Pada tahap ini, proses optimasi dosis asam sitrat dan komposisi *red mud* dilakukan dengan metode RSM berupa *Central Composite Design* (CCD) menggunakan aplikasi *design expert*. Dosis asam sitrat dan komposisi *red mud* ditentukan dalam tiga level yaitu berupa batas bawah (-1), batas tengah (0), dan batas atas (+1). Selain tiga jenis level tersebut, aplikasi *design expert* juga memberikan dua level tambahan yang disebut dengan *axial points* berupa nilai -alpha dan +alpha. *Axial points* dalam metode CCD berfungsi untuk memperluas cakupan eksperimen sehingga dapat memberikan lebih banyak informasi tentang hubungan antar variabel terutama ketika terdapat efek kuadrat. Nilai -alpha terletak di bawah batas bawah sedangkan nilai +alpha terletak di atas batas atas. Adapun level pada asam sitrat maupun komposisi *red mud* tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai level dosis asam sitrat komposisi *red mud* sebagai data masukkan pada aplikasi *design expert*

Komponen	Level -1	Level 0	Level +1	-alpha	+alpha
Dosis Asam Sitrat (mg/g)	20	60	100	3.43146	116.569
Komposisi Red Mud (%)	10	30	50	1.71573	58.2843

Setelah dilakukan entri data pada aplikasi *design expert*, maka didapatkan tabel percobaan dengan dua nilai respon yang harus diuji di laboratorium. Uji coba dilakukan dengan

jumlah campuran antara *red mud* dan media tanam sebanyak 20 gram. Campuran tersebut kemudian ditambahkan dengan asam sitrat dan 100 mL aquades (perbandingan 1:5). Rancangan percobaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan percobaan hasil aplikasi *design expert*

Run	Dosis Asam Sitrat (mg/g)	Komposisi Red Mud (%)	Respon 1 pH	Respon 2 Konduktivitas (µs/cm)
1	60	58.2843	....	....
2	3.43146	30	....	....
3	60	30	.....	.....
4	20	10	.....	.....
5	60	30	.....	.....
6	116.569	30	.....	.....
7	100	10	....	....
8	60	1.71573	....	....
9	60	30	.....	.....
10	100	50	.....	.....
11	60	30	.....	.....
12	20	50	.....	.....
13	60	30	.....	.....

lima percobaan tersebut memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Hal tersebut mengindikasikan bahwa model yang didapat nantinya akan memiliki hasil yang akurat. Hasil pengujian respon dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian respon pH dan konduktivitas

Run	Dosis Asam Sitrat (mg/g)	Komposisi Red Mud (%)	Respon 1 pH	Respon 2 Konduktivitas (µs/cm)
1	60	58,2843	6.65	13400
2	3,43146	30	8,59	6982
3	60	30	6,99	13400
4	20	10	6,09	10300
5	60	30	6,36	13800
6	116,569	30	4,58	28900
7	100	10	2,83	19200
8	60	1,71573	2,94	13300
9	60	30	5,6	15200
10	100	50	5,4	23200
11	60	30	5,6	13400
12	20	50	8,15	9523
13	60	30	5,59	15900

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

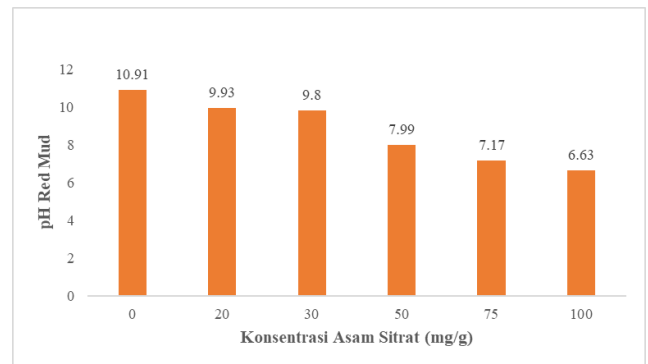
3.1 Pengujian Awal Nilai pH dan Pengujian Respon

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 dapat terlihat bahwa nilai pH tanah media tanam dan konduktivitas secara berturut-turut yakni sebesar 8,43 dan 4556 µs/cm. Nilai tersebut didapat setelah tahap aklimatisasi dilakukan. Kondisi pH tersebutlah yang akan dijadikan acuan sebagai target kondisi pH berdasarkan hasil pencampuran antara *red mud*, tanah media tanam, dan asam sitrat.

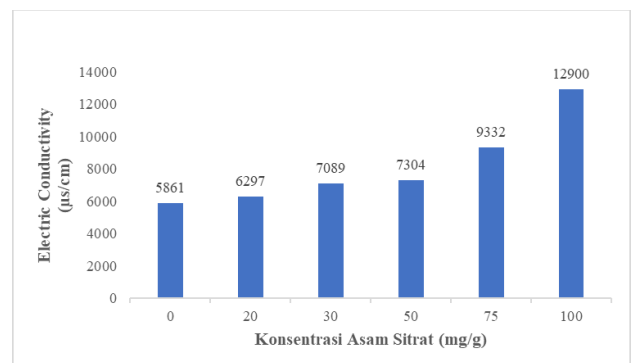
Berdasarkan pengujian penurunan nilai pH awal, didapatkan hasil bahwasannya penambahan asam sitrat dan media tanam dengan *red mud* secara terpisah keduanya dapat berdampak pada penurunan pH *red mud*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa tanah media tanam maupun asam sitrat memiliki potensi untuk pengkondisian pH *red mud* sebelum proses *phytomining* dilakukan.

Ditinjau dari sisi konduktivitas nya, ia memiliki tren yang berkebalikan dengan profil pH. Profil perubahan nilai pH dan konduktivitas *red mud* akibat penambahan asam sitrat dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Adapun profil perubahan nilai pH dan konduktivitas akibat pencampuran antara *red mud* dengan tanah media tanam dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

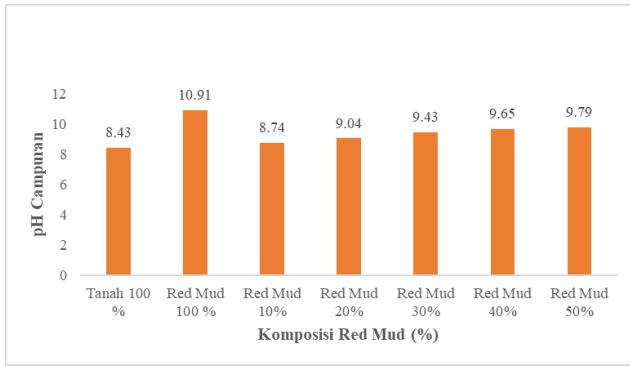
Pada proses uji laboratorium untuk mengetahui respon berupa pH dan konduktivitas, aplikasi *design expert* memberikan 13 desain percobaan. Terdapat pengulangan sebanyak lima percobaan dengan dosis asam sitrat dan komposisi red mud yang sama yaitu 60 mg/g dan 30%. Pengulangan percobaan membantu memberikan lebih banyak titik kontrol sehingga hasil proses *model fitting* menjadi lebih akurat dan dapat dipercaya (Luo et al., 2022). Dari hasil uji laboratorium, nilai pH dan konduktivitas dari pengulangan



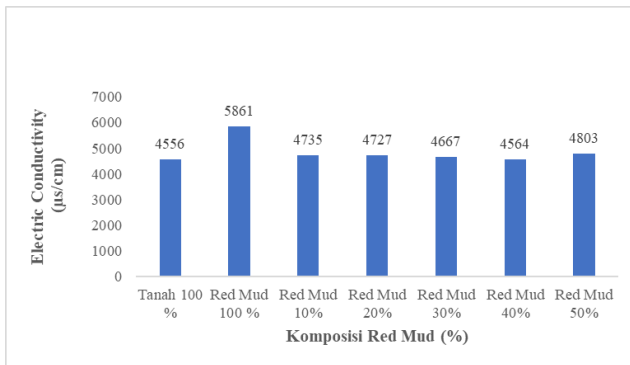
Gambar 4. Perubahan pH *red mud* akibat penambahan asam sitrat



Gambar 5. Perubahan nilai konduktivitas *red mud* akibat penambahan asam sitrat



Gambar 6. Nilai pH campuran antara red mud dengan tanah media tanam



Gambar 7. Nilai konduktivitas campuran antara red mud dengan tanah media tanam

3.2 Analisis Respon pH dan Konduktivitas

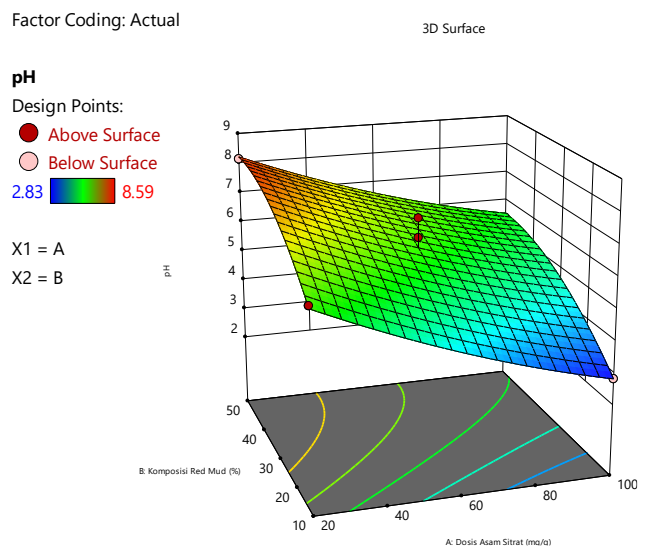
Ditinjau dari hasil respon pH, nilai pH yang didapatkan bervariasi dengan rentang nilai 2,94 hingga 8,59 seperti yang terdapat pada Tabel 3. Hasil analisis menggunakan ANOVA menunjukkan bahwa model respon pH merupakan model persamaan kuadrat dikarenakan nilai R^2 lebih besar dibandingkan model lainnya dengan nilai 0,9175. Sedangkan berdasarkan nilai p -value, model ini merupakan model yang signifikan dikarenakan nilai $p < 0,05$ dengan nilai sebesar 0,0174 sebesar. Kemudian model ini juga memiliki nilai *lack of fit p-value* yang lebih besar dari 0,05 ($p > 0,05$) dengan nilai 0,9779. Hal tersebut menandakan bahwa perbedaan antara data aktual dan model tidak signifikan secara statistik atau dengan kata lain model sudah sesuai dengan data (Goos & Gilmour, 2017).

Sedangkan ditinjau berdasarkan respon konduktivitas nya, model yang didapatkan yaitu model berbentuk linier dengan nilai R^2 sebesar 0,8498 dan p -value kurang dari 0,0001. Nilai R^2 tersebut memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan model lainnya. Namun pada faktor *lack of fit p-value*, respon konduktivitas memiliki nilai 0,1609 yang menandakan bahwa probabilitas perbedaan data aktual dan data model yakni sebesar 83,91 %. Oleh karena itu, pada penelitian ini, nilai konduktivitas tidak menjadi fokus utama selain dikarenakan hasilnya yang tidak signifikan, variabel konduktivitas juga tidak terlalu berpengaruh terhadap proses *phytomining* yang akan dilakukan. Hasil analisis respon pH dan konduktivitas dapat dilihat pada Tabel 4.

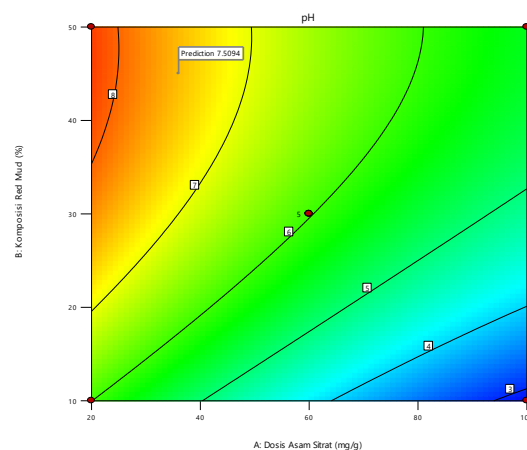
Tabel 4. Hasil analisis respon pH dan Konduktivitas

Respon	Model	Sequential p -value	Lack of fit p -value	R^2
pH	Kuadrat	0,0174	0,9779	0,9175
Konduktivitas	Linier	<0,0001	0,1609	0,8498

Pada aplikasi *design expert*, interaksi antara dosis asam sitrat dan komposisi red mud dapat dilihat melalui grafik 3 dimensi. Berdasarkan Gambar 8 dan Gambar 9, dapat terlihat bahwa kondisi pH optimum yakni dengan nilai mendekati kondisi pH media tanam yaitu terletak pada saat komposisi red mud sekitar 40% dan dosis asam sitrat 22 mg/g. Namun untuk dapat memastikan angka yang pasti dari kedua variabel tersebut, maka diperlukan hasil optimasi yang lebih valid berupa tabel hasil optimasi yang akan dibahas pada bagian berikutnya.



Gambar 8. Tampilan 3 dimensi pengaruh komposisi red mud dan dosis asam sitrat terhadap nilai pH



Gambar 9. Tampilan kontur pengaruh komposisi red mud dan dosis asam sitrat terhadap nilai pH

3.4 Hasil Optimasi dan Validasi

Setelah dilakukan analisis berdasarkan data statistik dan grafik 3 dimensi yang dihasilkan oleh aplikasi, maka dapat diperoleh hasil optimasi berupa dosis asam sitrat dan komposisi *red mud* dengan target nilai pH yang diinginkan. Pada tahap ini, nilai pH ditentukan berada pada rentang 8 – 8,5 dengan komposisi *red mud* berada pada rentang 20% – 50%. Adapun variabel asam sitrat menjadi variabel yang terikat terhadap kondisi pH dan komposisi asam sitrat.

Terdapat 89 data yang diberikan oleh *design expert* yang dapat dijadikan pilihan untuk dapat diaplikasikan pada saat *phytomining* dilakukan. Dari 89 data yang disajikan, seluruh data memiliki tingkat *desirability* 1 yang menandakan keseluruhan data tersebut ideal untuk diterapkan di lapangan. Namun pada penerapan *phytomining* yang nantinya akan dilakukan, jumlah *red mud* yang termanfaatkan diharapkan dapat semaksimal mungkin namun tidak melebihi 40% dikarenakan *red mud* miskin akan unsur hara. Oleh karena itu, kondisi yang dipilih pada penelitian ini adalah kondisi komposisi *red mud* yaitu 39,66 % (mendekati 40%) dan dosis asam sitrat 20,632 mg/g. Hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data hasil optimasi komposisi *red mud* dan dosis asam sitrat

No	Dosis Asam Sitrat (mg/g)	Komposisi Red Mud (%)	pH	Konduktivitas (µs/cm)	Desirability
1*	20.632	39.66	8.105	9055.619	1
2	20.656	41.516	8.144	8999.594	1
3	20	50	8.221	8647.978	1
4	20.813	44.063	8.175	8944.358	1
...
...
89	24.099	45.442	8.035	9399.299	1

Catatan *: Kondisi terpilih

Kondisi terpilih tersebut kemudian akan dilakukan validasi kembali untuk memastikan apakah pH yang diprediksi dengan nilai 8,105 dapat benar-benar diperoleh dengan kondisi asam sitrat 20,632 mg/g dan komposisi asam sitrat 39,66 %. Dari hasil validasi yang dilakukan, didapatkan bahwa kondisi pH aktual tidak terlalu berbeda jauh dengan nilai pH yang diprediksi yaitu 8,055. Tabel hasil validasi kondisi pH dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil validasi kondisi pH

Respon	Prediksi	Aktual	95% Prediction Level	
			Low	High
pH	8,105	8,055	7,06178	9,14805
Konduktivitas (µs/cm)	9055,54	6981	5253,97	12857,1

4 SIMPULAN

Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan asam sitrat dan variasi komposisi *red mud* secara signifikan mempengaruhi pH media tanam. Hasil optimasi menunjukkan bahwa kondisi pH optimum, mendekati pH awal tanah sebesar 8,43, dapat dicapai pada komposisi *red mud* 39,66% dan dosis asam sitrat 20,632 mg/g. Pada kombinasi tersebut, pH aktual media tanam adalah 8,055. Hal tersebut menegaskan bahwa perlakuan ini efektif untuk menyesuaikan kondisi pH media tanam sebelum masuk ke dalam tahap *phytomining*.

DAFTAR PUSTAKA

Borra, C. R., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Van Gerven, T. (2015). Leaching of rare earths from bauxite residue (*red mud*). *Minerals Engineering*, 76, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.005>

Datri, S., KS, N., & Rao, L. (2023). Response Surface Methodology-A Statistical Tool for the Optimization of Responses. *Global Journal of Addiction & Rehabilitation Medicine*, 7(1). <https://doi.org/10.19080/GJARM.2023.07.555705>

Ferrarezi, R.S., Lin, X., Gonzalez Neira, A. C., Tabay Zambon, F., Hu, H., Wang, X., Huang, J.-H., & Fan, G. (2022). Substrate pH Influences the Nutrient Absorption and Rhizosphere Microbiome of Huanglongbing-Affected Grapefruit Plants. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.856937>

Goos, P., & Gilmour, S. G. (2017). Testing for Lack of Fit in Blocked, Split-Plot, and Other Multi-Stratum Designs. *Journal of Quality Technology*, 49(4), 320–336. <https://doi.org/10.1080/00224065.2017.11918000>

Grand Strategy Mineral dan Batu Bara. (2021).

Hua, Y., Heal, K. V., & Hanl, W. (2017). The use of red mud as an immobiliser for metal/metalloid-contaminated soil: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.073>

Kleine, T., Nägele, T., Neuhaus, H. E., Schmitz-Linneweber, C., Fernie, A. R., Geigenberger, P., Grimm, B., Kaufmann, K., Klipp, E., Meurer, J., Möhlmann, T., Mühlhaus, T., Naranjo, B., Nickelsen, J., Richter, A., Ruwe, H., Schroda, M., Schwenkert, S., Trentmann, O., ... Leister, D. (2021). Acclimation in plants – the Green Hub consortium. *The Plant Journal*, 106(1), 23–40. <https://doi.org/10.1111/tpj.15144>

Lian, M., Ma, Y., Li, J., Sun, J., & Zeng, X. (2022). Influence of pH on the Particulate-Bound Cd Speciation and Uptake by Plants. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(6), 5511–5517. <https://doi.org/10.15244/pjoes/152224>

Liu, Y., Lin, C., & Wu, Y. (2007). Characterization of red mud derived from a combined Bayer Process and bauxite calcination method. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1–2), 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.015>

Luo, Y., Guo, P., Gao, J., Meng, J., & Dai, Y. (2022). Application of Design-Expert response surface methodology for the prediction of rejuvenated asphalt fatigue life. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134427>

- Mahto, N., & Chakravarthy, S. R. (2022). Response surface methodology for design of gas turbine combustor. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118449. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118449>
- Oduwayo, O. (2024). RESPONSE SURFACE TECHNIQUES AS AN INEVITABLE TOOL IN OPTIMIZATION PROCESS. In *Response Surface Methods - Theory, Applications and Optimization Techniques*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004575>
- Oprčkal, P., Mladenovič, A., Zupančič, N., Ščančar, J., Milačič, R., & Zalar Serjun, V. (2020). Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash. *Journal of Cleaner Production*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120440>
- Power, G., Gräfe, M., & Klauber, C. (2011). Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*, 108(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>
- Sarker, S. D., & Nahar, L. (2024). Response surface methodology (RSM) in phytochemical research. In *Computational Phytochemistry* (pp. 59–90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16102-5.00007-9>
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2009). Phytomining: A review. In *Minerals Engineering* (Vol. 22, Issue 12, pp. 1007–1019). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.001>
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2016). Factors Affecting Phytoextraction: A Review. In *Pedosphere* (Vol. 26, Issue 2, pp. 148–166). Institute of Soil Science. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60032-7)
- Thomas, G., Sheridan, C., & Holm, P. E. (2022). A critical review of phytoremediation for acid mine drainage-impacted environments. In *Science of the Total Environment* (Vol. 811). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152230>
- Tognacchini, A., Rosenkranz, T., van der Ent, A., Machinet, G. E., Echevarria, G., & Puschenreiter, M. (2020). Nickel phytomining from industrial wastes: Growing nickel hyperaccumulator plants on galvanic sludges. *Journal of Environmental Management*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109798>
- Wang, H., Li, H., & Sun, T. (2011). Notice of Retraction: Microbe Agent Enhanced Phytoremediation of PAHs Contaminated Farmland Soil with Alfalfa (*Medicago sativa* L.). 2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 1–4. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2011.5781342>
- Zhang, X. kai, Zhou, K. gen, Chen, W., Lei, Q. yuan, Huang, Y., & Peng, C. hong. (2019). Recovery of iron and rare earth elements from red mud through an acid leaching-stepwise extraction approach. *Journal of Central South University*, 26(2), 458–466. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4018-6>