

Sistematik Review: Perbandingan Penggunaan Kaolin dan Bentonit dalam Penelitian Remediasi Elektrokinetik untuk Penyisihan Logam Berat

Rahayu Puji Safitri*, Mochammad Arief Budihardjo, Budi Prasetyo Samadikun

Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto, SH, Kampus Undip, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia

*Corresponding author: safitripujirahayu@gmail.com

Info Artikel: Diterima 30 April 2022 ; Direvisi 9 Juli 2022 ; Disetujui 27 Juli 2022

Tersedia online : 21 Oktober 2022 ; Diterbitkan secara teratur : Oktober 2022

Cara sitasi (Vancouver): Safitri RP, Budihardjo MA, Samadikun BP. Sistematik Review: Perbandingan Penggunaan Kaolin dan Bentonit dalam Penelitian Remediasi Elektrokinetik untuk Penyisihan Logam Berat. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2022 Oct;21(3):301-310. <https://doi.org/10.14710/jkli.21.3.301-310>.

ABSTRAK

Latar belakang: Perbedaan mekanisme remediasi elektrokinetik salah satunya disebabkan oleh distribusi gugus $\equiv\text{SOH}$ yang berbeda-beda pada jenis lempung yang dapat mengontrol muatan permukaan lempung. Bentonit dan kaolin merupakan jenis lempung yang seringkali digunakan dalam penelitian remediasi elektrokinetik tanah terkontaminasi logam berat. Oleh karenanya, tujuan dari *review* jurnal ini adalah mengkaji perbandingan penggunaan kaolin dan bentonit dalam remediasi elektrokinetik tanah terkontaminasi logam berat, baik dalam publikasi penelitiannya, karakteristiknya dan pengaruhnya terhadap mekanisme remediasi elektrokinetik.

Metode: Metode yang digunakan dalam *review* jurnal ini adalah *systematic literature review*, yang terdiri dari tahap identifikasi kata kunci, *screening* dokumen terpublikasi dan pemilihan jurnal berdasarkan kriteria-kriteria tertentu. *Data base* yang digunakan berasal dari *Scopus*, *Science Direct* dan *Springer*. Dokumen yang telah terpilih selanjutnya dianalisis dan dibandingkan.

Hasil: Sebanyak 92% dari dokumen terpilih menggunakan kaolin dalam penelitian EKR, sedangkan 8% lainnya menggunakan bentonit. Berdasarkan karakteristiknya, bentonit memiliki daya adsorpsi yang lebih tinggi dari kaolin, namun, memiliki efisiensi penyisihan yang lebih rendah dari kaolin. Dalam pengaruhnya terhadap mekanisme remediasi elektrokinetik, arah aliran EOF kaolin maupun bentonit pada umumnya menuju katoda, namun bentonit dapat menyerap elektrolit lebih banyak dari kaolin, sehingga memiliki kadar air yang lebih tinggi. Sedangkan untuk konsumsi energi, remediasi elektrokinetik pada kaolin memerlukan energi yang lebih rendah dari bentonit.

Simpulan: Bentonit dan kaolin memiliki perbedaan karakteristik pada kapasitas adsorpsi, efisiensi penyisihan logam berat, dan konsumsi energi. Meskipun arah aliran EOF pada bentonit dan kaolin sama, namun kapasitas penyerapan elektrolit pada bentonit lebih besar dari kaolin.

Kata kunci: remediasi elektrokinetik; logam berat; bentonite; kaolin

ABSTRACT

Title: Research Study on the Use of Kaolin and Bentonite in Electrokinetic Remediation for Heavy Metal Removal

Background: One of the differences in the electrokinetic remediation mechanism is caused by the distribution of different $\equiv\text{SOH}$ groups on the type of clay that can control the surface charge of the clay. Bentonite and kaolin

are types of clay that are often used in the study of electrokinetic remediation of heavy metal contaminated soils. Therefore, the purpose of this journal review is to compare the use of kaolin and bentonite in the electrokinetic remediation of heavy metal contaminated soils, both in their research publications, their characteristics and their effect on the electrokinetic remediation mechanism.

Method: The method used in this journal review is a systematic literature review consisting of keyword identification, screening published documents and selecting journals based on certain criteria. The database used comes from Scopus, Science Direct and Springer. The selected documents are then analyzed and compared.

Result: As many as 92% of the selected documents used kaolin in the EKR study, while 8% used bentonite. Based on its characteristics, bentonite has a higher adsorption capacity than kaolin. However, it has a lower removal efficiency than kaolin. In its influence on the electrokinetic remediation mechanism, the flow direction of kaolin and bentonite EOF is generally towards the cathode, but bentonite can absorb more electrolytes than kaolin, so it has higher water content. As for energy consumption, electrokinetic remediation on kaolin requires lower energy than bentonite.

Conclusion: Bentonite and kaolin have different characteristics in adsorption capacity, heavy metal removal efficiency, and energy consumption. Although the direction of EOF flow in bentonite and kaolin is the same, the electrolyte absorption capacity of bentonite is greater than that of kaolin.

Keywords: electrokinetic remediation; heavy metal; bentonite; kaolin

PENDAHULUAN

Remediasi elektrokinetik merupakan metode remediasi tanah yang mengaplikasikan medan listrik untuk menyisihkan kontaminan yang mencemari tanah. Terdapat tiga mekanisme utama pada remediasi elektrokinetik, yaitu elektroforesis, elektromigrasi dan elektro-osmosis¹. Mekanisme-mekanisme tersebut diikuti dengan reaksi elektrolisis dan geokimia². Geokimia merupakan mekanisme kimia yang terjadi pada tanah, dengan demikian jenis tanah dapat mempengaruhi mekanisme pada remediasi elektrokinetik, karena jenis tanah terkait dengan zeta potensial partikel tanah. Zeta potensial merupakan potensial elektrokinetik terukur pada bidang geser untuk mengidentifikasi kekuatan tolak menolak antar partikel koloid dan stabilitas suspensi koloid³. Permukaan padatan lempung memiliki dua situs permukaan yang berbeda, yaitu situs permukaan yang terdiri dari gugus $\equiv X^-$ dan membawa muatan permanen (pH-independen) serta situs permukaan yang terdiri dari gugus $\equiv SOH$ (*amphoteric pH-dependent*). Grup $\equiv SOH$ memiliki distribusi yang berbeda tergantung dari jenis lempungnya dan muatan permukaan dikontrol oleh grup ini⁴. Selain itu, zeta potensial juga dipengaruhi oleh pH. pH rendah menyebabkan penurunan pada negatif zeta potensial karena protonasi grup karboksil pada tepi permukannya, sehingga menimbulkan ketidakstabilan pada sistem koloid³.

Beberapa review mengenai remediasi elektrokinetik telah dilakukan. Wang, et al. (2021) mereview strategi remediasi hijau untuk tanah yang terkontaminasi logam berat⁵, Raffa, et al. (2021) mereview remediasi tanah yang tercemar logam⁶, Teng, et al. (2020) mereview remediasi tanah terkontaminasi merkuri⁷. Bentonit dan kaolin merupakan jenis lempung yang mudah ditemui dan seringkali digunakan dalam penelitian remediasi

elektrokinetik. Beberapa penelitian telah menjelaskan karakteristik bentonit maupun kaolin dalam mekanisme remediasi elektrokinetik. Namun, belum terdapat review yang menjelaskan perbedaan karakteristik antara bentonit dan kaolin pada remediasi elektrokinetik. Oleh karenanya, tujuan dari review jurnal ini adalah mengkaji penggunaan bentonit maupun kaolin pada remediasi elektrokinetik logam berat dalam hal publikasi penelitian, karakteristiknya sebagai adsorban maupun media yang teremediasi, serta pengaruhnya terhadap mekanisme remediasi elektrokinetik yaitu *electro-osmosis flow* dan konsumsi energi.

MATERI DAN METODE

Metode yang digunakan pada penulisan review jurnal ini adalah *systematic literature review*. *Systematic literature review* merupakan metode yang sistematis dalam pendekatan metodologinya, eksplisit dalam menjelaskan prosedurnya, komprehensif dalam cakupannya dan dapat direproduksi kembali melalui pendekatan yang sama. Tujuan dari *systematic review* adalah untuk mengidentifikasi, mengevaluasi dan melakukan sintesis (analisis) dari penelitian-penelitian sebelumnya⁸. Skema *systematic literature review* pada penulisan review jurnal ini disajikan dalam gambar 1.

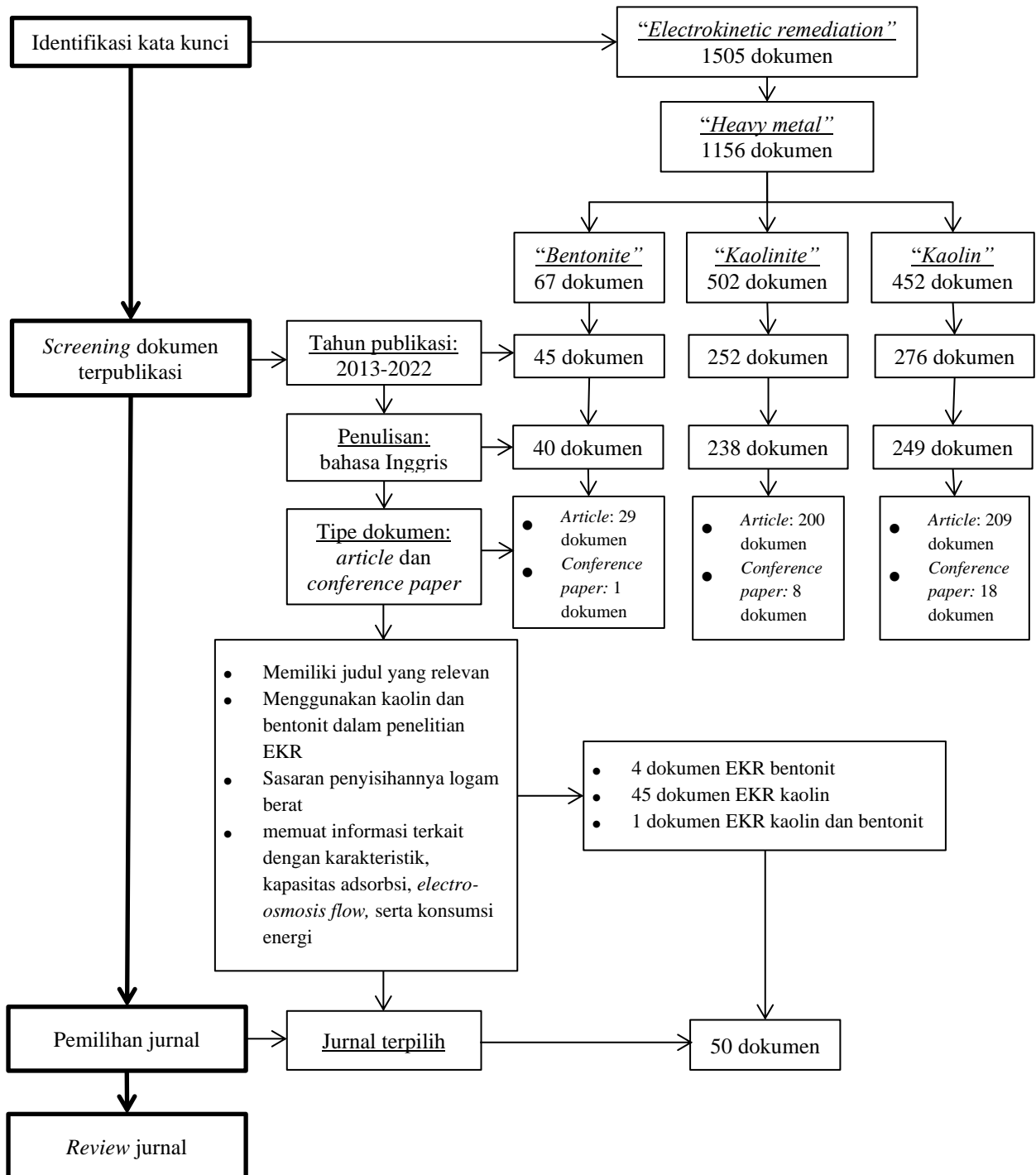
Systematic literature review ini terdiri dari tahap identifikasi kata kunci, *screening* dokumen terpublikasi, dan pemilihan jurnal. *Database* yang digunakan berasal dari *Scopus*, *Science Direct* dan *Spinger*. Pada tahap identifikasi kata kunci, kata kunci yang digunakan meliputi : "*electrokinetic remediation*", "*heavy metal*", "*bentonite*", "*kaolin*", dan "*kaolinite*". Pada tahap *screening* dokumen terpublikasi terdapat beberapa kriteria untuk mengeliminasi jurnal yang telah teridentifikasi. Kriteria tersebut meliputi : tahun publikasi, bahasa, jenis dokumen, judul dan abstrak yang relevan,

menggunakan material kaolin dan bentonit, penyisihannya berupa logam berat serta memuat informasi terkait dengan karakteristik, kapasitas adsorpsi, *electro-osmosis flow*, serta konsumsi energi kaolin maupun bentonit. Terdapat 50 jurnal yang telah terpilih, kemudian akan dianalisis dan dibandingkan.

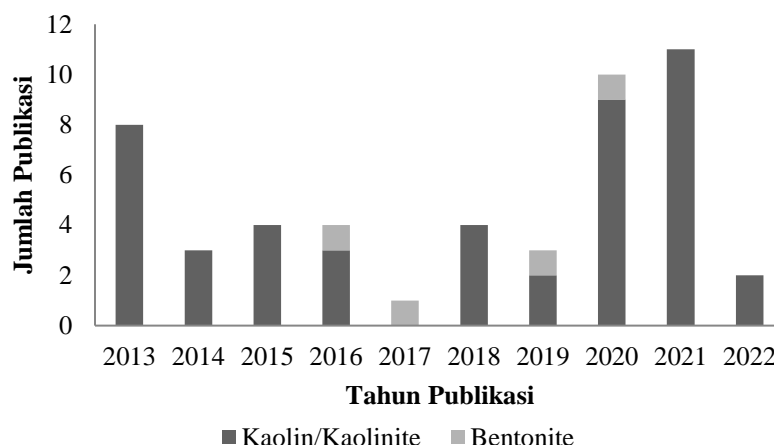
HASIL DAN PEMBAHASAN

Publikasi Remediasi Elektrokinetik Logam Berat Terkait dengan Kaolin dan Bentonit

Gambar 2. menunjukkan grafik penggunaan bentonit dan kaolin dalam penelitian remediasi elektrokinetik. Berdasarkan hasil skematik *review*, diperoleh bahwa jumlah penelitian EKR (*Electrokinetic Remediation*) dengan menggunakan kaolin lebih banyak dari bentonit, dengan total 92% menggunakan kaolin dan 8% lainnya menggunakan bentonit. Publikasi penelitian remediasi elektrokinetik logam berat dengan menggunakan kaolin dan bentonit disajikan pada tabel 1.



Gambar 1. Skema *Systematic Literature Review*



Gambar 2. Grafik Publikasi Penelitian Remediasi Elektrokinetik dengan Kaolin dan Bentonit

Tabel 1. Publikasi Remediasi Elektrokinetik Logam Berat dengan Kaolin dan Bentonit

No	Referensi	Sasaran Penyisihan	Jenis Tanah
1.	Mu'azu et al. (2016) ⁹	Cd, Hg, and Cr	Bentonit and lempung (terdiri dari ilit, kalsit, muskovit, kuarsa, dan sangat sedikit kaolin)
2.	Mu'azu dan Jarrah (2017) ¹⁰	Pb	Bentonit and lempung (terdiri dari ilit, kalsit, muskovit, kuarsa, dan sangat sedikit kaolin)
3.	Wan et al. (2019) ¹¹	Cd	Bentonit (sebagai adsorban) and tanah asli
4.	Usman et al. (2020) ¹²	Cu and Pb	Bentonit and lempung
5.	Ammami et al. (2014) ¹³	Cd, Cr, Cu, Zn, and Pb	Kaolinit, lanau dan pasir
6.	Behrouzinia et al. (2021) ¹⁴	Cu	Kaolinit
7.	Camenselle et al. (2020) ¹⁵	Mn	Kaolin and lumpur terkontaminasi dari kawasan industri
8.	Ghobadi et al. (2020) ¹⁶	Cu	Kaolinit
9.	Hassan dan Mohamedelhassan (2021) ¹⁷	Cu and Cd	Lempung yang didominasi oleh kaolinit
10.	Hassan et al. (2015) ¹⁸	Cu	Lempung yang didominasi oleh kaolinit
11.	Kim et al. (2020) ¹⁹	Cu	Kaolinit
12.	Lee et al. (2021) ²⁰	Cu and Pb	Kaolinit
13.	Li et al. (2019) ²¹	Pb	Kaolin and tanah asli yang terkontaminasi
14.	Li et al. (2020) ²²	Pb	Kaolinit
15.	Mascia et al. (2015) ⁴	Cd and Pb	Kaolinit
16.	Naidu et al. (2013) ²³	Pb	Kaolinit
17.	Nasiri et al. (2020) ²⁴	Cr	Kaolinit
18.	Saeedi et al. (2013) ²⁵	Cr	Kaolinit
19.	Shady et al. (2018) ²⁶	Cu, Zn, Cd, Co, Mn, Pb, Sr, Ni	Kaolinit and lempung asli
20.	Kim et al. (2021) ²⁷	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Kaolinit and tanah <i>smelter</i> terkontaminasi
21.	Suzuki et al. (2013) ²⁸	As	Kaolinit
22.	Suzuki et al. (2014) ²⁹	Cr	Kaolinit
23.	Wang et al. (2021) ⁵	Cu, Pb, Zn	Kaolin
24.	Wang et al. (2022) ³⁰	Cu, Pb, Zn	Kaolin
25.	Wen et al. (2021) ²	Pb, Cd	Kaolin
26.	Wu et al. (2016) ³¹	Cr	Tanah asli yang terkontaminasi and kaolin
27.	Xu et al. (2021) ³²	Cd	Kaolin
28.	Yuan et al. (2016) ³³	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Kaolin
29.	Yuan et al. (2016) ³⁴	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Kaolin

No	Referensi	Sasaran Penyisihan	Jenis Tanah
30.	Zhang et al. (2022) ³⁵	Cr	Kaolinit and pasir
31.	Zhou et al. (2020) ³⁶	Cd	Kaolin
32.	Zhou et al. (2021) ³⁷	Pb	Kaolin
33.	Azhar et al. (2016) ³⁸	Zn, Pb, Cr, Cu	Kaolin
34.	Cameselle et al. (2013) ³⁹	Ni, Fe	Kaolin
35.	Chakraborty, et al. (2020) ⁴⁰	Cr	Kaolin
36.	Chen et al. (2013) ⁴¹	Cr	Kaolin
37.	Fansheng et al. (2013) ⁴²	Cr	Kaolin and tanah berpasir
38.	Li et al. (2013) ⁴³	Cr	Kaolin and gipsum
39.	Saberi et al. (2018) ⁴⁴	Pb, Zn, Ni	Kaolin and pasir
40.	Sun et al. (2021) ⁴⁵	Zn	Kaolin
41.	Wu et al. (2018) ⁴⁶	Cr	Kaolin and tanah asli yang terkontaminasi
42.	Ahmed et al. (2020) ⁴⁷	Pb	Tanah asli yang mengandung kaolinit
43.	Barghavi dan Suda (2015) ⁴⁸	Cr and Cd	Tanah asli terkontaminasi and tanah terkontaminasi buatan yang mengandung kaolin
44.	Jeon et al. (2015) ⁴⁹	As, Cu, Pb	Tanah asli terkontaminasi yang mengandung kaolin
45.	Putra et al. (2021) ⁵⁰	Cs	Tanah asli tidak terkontaminasi yang mengandung kaolinit
46.	Liu et al. (2013) ⁵¹	Cu	Tanah asli terkontaminasi yang mengandung kaolin
47.	Betremieux dan Pajany (2021) ⁵²	As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn	Sedimen asli terkontaminasi yang mengandung kaolin
48.	Wu et al. (2020) ⁵³	Cr	Kaolin and tanah asli terkontaminasi
49.	Hu et al. (2019) ⁵⁴	Cu	Kaolin
50.	Mu'azu (2018) ⁵⁵	Zn and Pb	Bentonit and lempung (terdiri dari kaolin, muskovit kalsit, and mineral kuarsa)

Kapasitas Adsorpsi dan Efisiensi Penyisihan Logam Berat pada Bentonit dan Kaolin

Mu'azu et al. (2016) menggunakan tanah terkontaminasi buatan dengan campuran lempung dan bentonit. Penambahan rasio bentonit menyebabkan peningkatan adsorpsi logam berat pada media tanah terkontaminasi buatan dan karenanya dapat menurunkan efisiensi penyisihannya. Dengan *running time* 3 minggu, logam berat yang dapat disisihkan dari bentonit untuk Cd sebanyak 5.05%-21.87%; Hg sebanyak 7.65%-78.06%; dan Cr sebanyak 48.77%-89.64%⁹. Dengan *running time* yang sama, pada penelitian yang dilakukan oleh Usman et al., (2020), sebanyak 5.94%-17.81% Pb dan 10.06%-62.41% Cu tersisihkan dari bentonit.

Bentonit sebagai adsorben logam berat memiliki kapasitas 25 mg/g – 15 mg/g. Kondisi optimum bentonit sebagai adsorben didapatkan pada pH 5 dengan massa sorben 0.2 g dan rasio bentonit terhadap komposisi lempung 30% serta konsentrasi logam berat Pb 100 mg/L¹⁰. Kapasitas adsorpsi pada bentonit GMZ (gaomiaozi) terhadap logam berat Cd sebesar 3.16 mg/g. Kesetimbangan adsorpsinya terjadi dalam waktu 50 menit. Kemampuan adsorpsinya meningkat seiring dengan meningkatnya pH pada 2-12, namun menurun seiring dengan peningkatan kekuatan ion karena peningkatan molaritas KNO₃⁵⁷.

Pada penelitian Naidu, et al. (2013), sebanyak 720 mg/kg Pb (95.91%) terserap dalam kaolinit yang

telah dikontaminasi dengan 1200 mg/L Pb nitrat selama 1 jam. Dengan menggunakan waktu remediasi selama 4 hari, sebanyak 14.5-94.5% Pb tersisihkan dari kaolinit²³. Kim et al. (2021) melakukan kontaminasi pada kaolin dengan masing-masing Cd, Cu, Ni, Pb, Zn sebanyak 500 mg selama 7 hari, menghasilkan konsentrasi logam berat pada kaolin sebesar 475 mg Cd/kg (95%), 479 mg Zn/kg (95,8%), 486 mg Ni/kg (97,2%), 481 mg Pb/kg (96,2%). Selanjutnya sebanyak 51.9-79.8% Cd, 58.2-83.7% Ni, 8.2-34.3% Pb dan 56.4-81.1% Zn tersisihkan dari kaolin dengan waktu remediasi 5 hari²⁷. Suzuki et al. (2013), mencampurkan kaolin dengan As sebanyak 50 mg/L dalam 90 g kaolinit selama 24 jam menghasilkan konsentrasi As pada kaolin sebesar 97 mg As/kg kaolinit basah (50 wt.%). Sebanyak 4.1% As ditemukan di larutan perantara, dan lainnya teradsorpsi pada kaolin serta mengendap sebagai garam. Sedangkan untuk penyisihannya dibawah 60% dengan waktu remediasi 65-198 hari²⁸.

Pada penelitian-penelitian terdahulu bentonit selain digunakan sebagai media tanah terkontaminasi, juga digunakan sebagai material pengadsorpsi logam berat pada tanah terkontaminasi. Sedangkan kaolin lebih banyak digunakan sebagai material tanah terkontaminasi yang disisihkan kandungan logam beratnya. Hal tersebut ditunjukkan oleh perbandingan kapasitas adsorpsi bentonit dan kaolin pada penelitian sebelumnya yang telah dirangkum dalam Mu'azu

(2018), bahwa bentonit memiliki *equilibrium adsorption capacity* antara 5.75-68.49 mg/g terhadap Zn dan 17.8-51.19 mg/g terhadap Pb, sedangkan kaolin memiliki *equilibrium adsorption capacity* 9.3 mg/g terhadap Pb⁵⁶.

EOF pada Kaolin dan Bentonit

Bentonit dapat menyerap lebih banyak elektrolit dari kaolin, sehingga elektroosmosis flow kaolin lebih cepat dari bentonit. Semakin banyaknya rasio bentonit dalam campuran tanah menyebabkan makin tingginya kadar air, karena lebih banyak fluida (elektrolit) yang terserap dan tersimpan (retensi) dalam bentonit. Arah aliran EOF pada bentonit searah dengan katoda⁹. Begitu pula halnya dengan kaolin yang termasuk lempung, muatan permukaan tanahnya negatif, sehingga arah aliran EOF cenderung menuju katoda^{13,14,15,19,20}. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa arah EOF menuju anoda dikarenakan zeta potensial pada permukaan kaolin positif yang disebabkan oleh adsorpsi logam berat³⁰. Penambahan NaCl juga dapat menyebabkan aliran EOF menuju anoda¹³.

Konsumsi Energi pada Kaolin dan Bentonit

Sebagai media tanah tercemar, konsumsi energi EKR bentonit antara 91.67-2441.67 kWh/m³ dengan running time selama 3 minggu. Penambahan rasio bentonit pada campuran tanah menurunkan efisiensi removal logam berat dan tidak memiliki efek yang signifikan terhadap konsumsi energi⁹. Sedangkan pada penelitian Usman et al. (2020), untuk menyisihkan Cu dan Pb dalam bentonit, diperlukan konsumsi energi sebesar 146.65 kWh/m³ dan 1151.58 kWh/m³ selama 3 minggu perlakuan. Penambahan rasio bentonit menyebabkan peningkatan pada konsumsi energi¹². Sedangkan bentonit sebagai adsorban dalam remediasi elektrokinetik dapat mengurangi konsumsi energi hingga 11.02% serta meningkatkan efisiensi remediasi elektrokinetik¹¹.

Konsumsi energi pada remediasi elektrokinetik kaolin yang terkontaminasi logam berat cenderung lebih rendah dari bentonit. Penelitian remediasi elektrokinetik yang dilakukan oleh Behrouzina et al. (2022) memerlukan total konsumsi energi antara 6.1-7.8 kWh/m³¹⁴. Pada penelitian Li et al. (2019), untuk penyisihan logam berat Pb dari kaolin menggunakan EKR membutuhkan konsumsi energi 33.3-187.8 kWh/m³²¹. Nasiri et al. (2020) memerlukan konsumsi energi antara 0.04-0.12 kWh selama 120 jam untuk menyisihkan logam berat Cr pada kaolin²⁴. Yuan et al. (2016) hanya memerlukan konsumsi energi antara 8.812-19.33 kWh/m³ untuk penyisihan logam berat Cd, Cu, Ni, Pb, dan Zn pada kaolin³⁵.

DISKUSI

Publikasi Remediasi Elektrokinetik Logam Berat dengan Kaolin dan Bentonit

Pada beberapa penelitian, penggunaan bentonit atau montmorillonite dalam EKR sebagai *permeable*

reactive barrier dikarenakan jenis tanah ini memiliki densitas muatan yang tinggi sehingga diharapkan memiliki efisiensi penyisihan terbaik¹². Selain itu, mineral lempung alam efektif dalam melakukan penyerapan terhadap logam berat¹⁰. Bentonit digunakan sebagai sampel tanah terkontaminasi dalam EKR, dikarenakan efisiensi removal pada montmorillonite (bentonite) lebih rendah dari pasir dan kaolinite. Semakin tinggi pH tanah menyebabkan rendahnya adsorpsi di permukaan tanah yang menguntungkan penyisihan logam, namun Na-montmorillonite memiliki efisiensi penyisihan yang lebih rendah dari kaolin dan sedimen yang diendapkan oleh gletser (glacial till). Komposisi mineralogi montmorillonite yang memengaruhi zeta potensial pada permukaan tanah juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap EKR⁹.

Ammami, et al., (2014) menggunakan campuran kaolin dengan lanau dan pasir sebagai sampel tanah terkontaminasi untuk menghasilkan sampel tanah yang mirip dengan sedimen di Normandy, France. Pembuatan model tanah tersebut dikarenakan metode EKR yang dilakukan terhadap tanah terkontaminasi baru dengan tanah alami yang terkontaminasi maupun tanah yang telah lama terkontaminasi memiliki hasil yang berbeda. Hal tersebut disebabkan oleh lebih kuatnya kontaminan yang terserap dalam mineral dan fraksi organik tanah alami yang terkontaminasi maupun tanah yang telah lama terkontaminasi¹³. Kaolin memiliki kapasitas penyangga¹⁵ dan kapasitas tukar kation yang lebih rendah dari mineral lainnya^{17,15,21,23,24}. Kapasitas tukar kationnya yang rendah memfasilitasi karakterisasi remediasi elektrokinetik pada konsentrasi kontaminan dengan laju pertukaran ion yang cepat¹⁹. Penggunaan kaolin dengan ukuran partikel yang kecil dapat mensimulasikan sifat permeabilitas rendah yang dimiliki tanah lempung^{15,21}. Kaolinite memiliki plastisitas yang rendah dan lebih efektif untuk remediasi elektrokinetik^{19,20}. Selain itu, kaolinite memiliki afinitas yang tinggi terhadap logam berat dan tetap stabil sebagai lempung tak aktif²⁴ walaupun berada dalam kadar air yang berubah-ubah¹⁹. Kaolinite memiliki kapasitas tukar kation yang relatif rendah dan memiliki laju reaksi pertukaran ion yang cepat sehingga mudah untuk mengetahui karakteristik EKR logam berat yang mengkontaminasi²⁰. Kaolin mengandung sedikit sekali zat organik, sehingga dapat mencegah potensi kompleksasi antara agen biodegradable dan bahan organik tanah³⁰. Selain itu, kaolin merupakan jenis tanah artifisial yang banyak dijual⁴¹.

Kapasitas Adsorpsi dan Efisiensi Penyisihan Logam Berat pada Bentonit dan Kaolin

Semakin tingginya kandungan zat organik pada bentonit menyebabkan semakin tingginya kapasitas sangga dan mengurangi kemampuan reduksi logam berat. Sedangkan Kandungan 39% kalsit dapat meningkatkan pH dan menyebabkan presipitasi dan

adsorpsi logam berat (Pb)¹². Mineral lempung sangat berpotensi menjadi adsorban dikarenakan kesediannya yang cukup banyak, cukup stabil secara kimia dan mekanik, luas permukaannya dan sifat strukturnya⁵⁷. Oleh karenanya, waktu remediasi yang dibutuhkan oleh jenis tanah lempung lebih lama dari jenis tanah lanau atau pasir¹². Menurut Chen et al., (2011) bentonit merupakan lempung yang paling dipilih untuk dekontaminasi dan pengolahan logam berat serta untuk material penimbunan limbah nuklir. Pengendali utama kapasitas adsorpsi adalah kapasitas tukar kation (CEC) dan luas permukaan spesifik (SSA). Kecepatan kesetimbangan reaksi adsorpsi dipengaruhi oleh pH dan kekuatan ion⁵⁷.

Penyisihan logam berat dalam tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah morfologi tanah. Elektromigrasi yang merupakan salah satu mekanisme dalam remediasi elektrokinetik untuk penyisihan logam pada media berpori yang dipengaruhi oleh volume pori, geometri dan kadar air¹. Berdasarkan penelitian terdahulu, penyisihan kandungan logam berat pada kaolin lebih mudah dari bentonit dilihat dari waktu remediasi kaolin yang cenderung lebih singkat dari bentonit serta efisiensi penyisihan logam berat pada kaolin lebih tinggi dari bentonit.

EOF pada Kaolin dan Bentonit

Electro-osmosis flow (EOF) merupakan salah satu mekanisme lainnya yang terjadi pada remediasi elektrokinetik. Mekanisme yang dimaksud adalah adanya pergerakan molekul air yang terbawa oleh kation dan anion menuju ke elektroda yang memiliki muatan berlawanan¹. Prinsip penyisihan logam berat di tanah dengan metode EKR didasarkan pada solubilitas dan mobilitas logam berat dalam fluida perantara, yaitu dengan elektromigrasi untuk logam bermuatan dan elektroosmosis untuk logam netral¹⁵. Permukaan partikel lempung bermuatan negatif, untuk mengimbangi muatan tersebut, permukaan lempung menarik kation dari air pori. Kation yang lebih banyak dari anion menyebabkan aliran fluida menuju katoda⁵⁸. Namun, ketika pH tanah < 6.8 muatan permukaannya menjadi positif dan menyebabkan reverse osmosis²⁴.

Chelating agent mempengaruhi mekanisme EOF dengan meningkatkan muatan negatif partikel tanah dan menggantikan multivalen ion dengan univalen ion yang kurang efektif pada kompresi lapisan difusi²⁵. EOF sangat dipengaruhi oleh potensial tanah dan zeta potensial tanah⁴⁷. Asidifikasi pada kaolin menyebabkan muatan partikelnya menjadi lebih positif sehingga dapat menurunkan zeta potensial dan menurunkan volume aliran EOF⁴⁰.

Konsumsi Energi pada Kaolin dan Bentonit

Konsumsi energi pada remediasi elektrokinetik dipengaruhi oleh besarnya arus listrik. Semakin besar arus listrik, semakin banyaknya mobilitas ion dan

menyebabkan tingginya konsumsi energi¹⁴. Penurunan arus listrik disebabkan oleh perubahan pH yang dapat menetralkan pergerakan kation dan anion, sehingga terjadi pengendapan dan penurunan pergerakan ion¹³. Sedangkan gradient voltasi dapat meningkatkan besarnya arus listrik, sehingga meningkatkan elektrolisis dan mobilitas ion pada tanah.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil sistematik *review* penelitian-penelitian sebelumnya mengenai remediasi elektrokinetik tanah tercemar logam berat dengan kaolin dan bentonit, diperoleh bahwa 92% merupakan publikasi remediasi elektrokinetik kaolin dan 8% lainnya merupakan remediasi elektrokinetik bentonit. Perbedaan karakteristik kaolin dan bentonit menyebabkan terjadinya perbedaan mekanisme pada remediasi elektrokinetik. Karakteristik kaolin maupun komposit kaolin cocok digunakan merepresentasikan tanah tercemar asli yang diteliti. Sedangkan, bentonit dalam penelitian remediasi elektrokinetik seringkali digunakan sebagai *permeable reactive barrier* (adsorban) karena memiliki daya serap yang tinggi terhadap logam berat. Karenanya efisiensi penyisihan logam berat pada bentonit lebih rendah dari kaolin. Kaolin dan bentonit memiliki muatan permukaan yang negatif, sehingga pada umumnya EOF mengalir dari anoda menuju katoda. Namun dapat arah aliran EOF menjadi sebaliknya jika muatan permukaannya positif. Remediasi elektrokinetik pada kaolin membutuhkan energi yang lebih rendah dari bentonit. Namun, bentonit sebagai adsorban dapat menurunkan penggunaan energi dan meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat pada tanah. Beberapa mekanisme remediasi elektrokinetik lainnya yaitu elektroforesis dan elektromigrasi pada kaolin dan bentonit belum dikaji pada *review* jurnal ini. Diharapkan untuk analisis dan kajian selanjutnya dapat mengkaji mekanisme-mekanisme tersebut beserta pengaruh lain bentonit dan kaolin dalam remediasi elektrokinetik logam berat, misalnya pH dan kadar air.

DAFTAR PUSTAKA

1. Jafariesfad N, Geiker MR, Sangesland S. Electrokinetics application in concrete and well construction. Proceedings of the ASME 2020 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2020-18275. 2020 Aug 3-7;1-12
2. Wen D, Guo X, Fu R. Inhibition characteristics of the electrokinetic removal of inorganic contaminants from soil due to evolution of the acidic and alkaline fronts. Process Saf Environ Prot. 2021;155:343-5. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.030>
3. Hoor YQ, Au PI, Mubarak NM, Khalid M, Jagadish P, Walvekar R, et al. Surface force arising from adsorbed graphene oxide in

- kaolinite suspensions. *Colloids Surf A*. 2020;592:124592.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124592>
4. Mascia M, Vacca A, Palmas S. Effect of surface equilibria on the electrokinetic behaviour of Pb and Cd ions in kaolinite. *J Chem Technol Biotechnol*. 2015;90(7):1290–8.
<https://doi.org/10.1002/jctb.4435>
 5. Wang Y, Han Z, Li A, Cui C. Enhanced electrokinetic remediation of heavy metals contaminated soil by biodegradable complexing agents. *Environ Pollut*. 2021;283:117111.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117111>
 6. Raffa CM, Chiampo F. Remediation of metal/metalloid-polluted soils: a short review. *Appl Sci*. 2021;11: 4134.
<https://doi.org/10.3390/app11094134>
 7. Teng D, Mao K, Ali W, Xu G, Huang G, Niazi NK, et al. Describing the toxicity and sources and the remediation technologies for mercury-contaminated soil. *R. Soc. Chem. Adv*. 2020;10(39):23221–32.
<https://doi.org/10.1039/D0RA01507E>
 8. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Commun Assoc Inf Syst*. 2015;37(1):879–910.
<https://doi.org/10.17705/1CAIS.03743>
 9. Mu'azu ND, Usman A, Jarrah N, Alagha O. Pulsed electrokinetic removal of chromium, mercury and cadmium from contaminated mixed clay soils. *Soil Sediment Contam*. 2016;25(7):757–75.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2016.1213700>
 10. Mu'azu ND, Jarrah N. Influence of bentonite proportion in natural clay on Pb²⁺ ions sorption: response surface methodology, kinetics and equilibrium studies. *Soil Sediment Contam*. 2017;26(7–8):691–708.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2017.1405909>
 11. Wan Y, Zhai J, Wang A, Han H, Shen M, Wen X. Environmental research on remediation of Cd-contaminated soil by electrokinetic remediation. *Ekoloji*. 2019;28(107):873–81.
 12. Usman AK, Mu'azu ND, Lukman S, Essa MH, Bukhari AA, Al-Malack MH. Removal of lead and copper from contaminated mixed clay soils using pulsed electrokinetics. *Soil Sediment Contam*. 2020; 465-480.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1743969>
 13. Ammami MT, Benamar A, Wang H, Bailleul C, Legras M, Le Derf F, et al. Simultaneous electrokinetic removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and metals from a sediment using mixed enhancing agents. *Int J Environ Sci Technol*. 2014;11(7):1801–16.
<https://doi.org/10.1007/s13762-013-0395-9>
 14. Behrouzina S, Ahmadi H, Abbasi N, Javadi AA. Insights into enhanced electrokinetic remediation of copper-contaminated soil using a novel conductive membrane based on nanoparticles. *Environ Geochem Health*. 2022;44(3):1015–32.
<https://doi.org/10.1007/s10653-021-01006-w>
 15. Cameselle C, Gouveia S, Cabo A. Analysis and optimization of Mn removal from contaminated solid matrixes by electrokinetic remediation. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(6):1820.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17061820>
 16. Ghobadi R, Altaee A, Zhou JL, McLean P, Yadav S. Copper removal from contaminated soil through electrokinetic process with reactive filter media. *Chemosphere*. 2020;252:126607.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126607>
 17. Hassan I, Mohamedelhasan E. Efficacy of electrokinetics in remediating soft clay slurries contaminated with cadmium and copper. *Water Air Soil Pollut*. 2021;232(7):289.
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05250-9>
 18. Hassan I, Mohamedelhasan E, Yanful EK. Solar powered electrokinetic remediation of Cu polluted soil using a novel anode configuration. *Electrochim Acta*. 2015;181:58–67.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.02.216>
 19. Kim D, Han J. Remediation of multiply contaminated ground via permeable reactive barrier and electrokinetic using recyclable food scrap ash (FSA). *Appl Sci*. 2020;10(4):1194.
<https://doi.org/10.3390/app10041194>
 20. Lee S, Yun JM, Lee JY, Hong G, Kim JS, Kim D, et al. The remediation characteristics of heavy metals (copper and lead) on applying recycled food waste ash and electrokinetic remediation techniques. *Appl Sci*. 2021;11(16):7437.
<https://doi.org/10.3390/app11167437>
 21. Li C, Hou H, Yang J, Liang S, Shi Y, Guan R, et al. Comparison of electrokinetic remediation on lead-contaminated kaolinite and natural soils. *Clean - Soil, Air, Water*. 2019;47(4):1800337.
<https://doi.org/10.1002/clen.201800337>
 22. Li G, Liu J, Zhang J. Experimental study on electrokinetic remediation of Pb-contaminated kaolinite. *J IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2020;467(1):012181.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012181>
 23. Naidu R, Sreedaran BR, Smith E. Electroremediation of lead-contaminated kaolinite using cation selective membrane and different electrolyte solutions. *Water Air Soil Pollut*. 2013;224(12):1708.
<https://doi.org/10.1007/s11270-013-1708-9>
 24. Nasiri A, Jamshidi-Zanjani A, Khodadadi Darban A. Application of enhanced electrokinetic approach to remediate Cr-contaminated soil: effect of chelating agents and permeable reactive barrier. *Environ Pollut*. 2020;266:115197.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115197>
 25. Saeedi M, Li LY, Moradi Gharehtapeh A. Effect of alternative electrolytes on enhanced electrokinetic remediation of hexavalent

- chromium in clayey soil. *Int J Environ Res.* 2013;7(1):39–50.
26. Abou-Shady A, Eissa D, Abdelmottaleb O, Hegab R. New approaches to remediate heavy metals containing polluted soil via improved PCPSS. *J Environ Chem Eng.* 2018;6(1):1322–32. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.066>
 27. Kim SO, Jeong JY, Lee WC, Yun ST, Jo HY. Electrokinetic remediation of heavy metal-contaminated soils: performance comparison between one- and two-dimensional electrode configurations. *J Soils Sediments.* 2021;21(8):2755–69. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02803-z>
 28. Suzuki T, Moribe M, Okabe Y, Niinae M. A mechanistic study of arsenate removal from artificially contaminated clay soils by electrokinetic remediation. *J Hazard Mater.* 2013;254–255(1):310–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.013>
 29. Suzuki T, Kawai K, Moribe M, Niinae M. Recovery of Cr as Cr(III) from Cr(VI)-contaminated kaolinite clay by electrokinetics coupled with a permeable reactive barrier. *J Hazard Mater.* 2014;278(3):297–303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.086>
 30. Wang Y, Li A, Ren B, Han Z, Lin J, Zhang Q, et al. Mechanistic insights into soil heavy metals desorption by biodegradable polyelectrolyte under electric field. *Environ Pollut.* 2022;292:118277. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118277>
 31. Wu J, Zhang J, Xiao C. Focus on factors affecting pH, flow of Cr and transformation between Cr(VI) and Cr(III) in the soil with different electrolytes. *Electrochim Acta.* 2016;211:652–62. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.048>
 32. Xu L, Yu C, Mao Y, Zong Y, Zhang B, Chu H, et al. Can flow-electrode capacitive deionization become a new in-situ soil remediation technology for heavy metal removal ?. *J Hazard Mater.* 2021;402:123568. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123568>
 33. Yuan L, Xu X, Li H, Wang N, Guo N, Yu H. Development of novel assisting agents for the electrokinetic remediation of heavy metal-contaminated kaolin. *Electrochim Acta.* 2016;218:140–8. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.121>
 34. Yuan L, Li H, Xu X, Zhang J, Wang N, Yu H. Electrokinetic remediation of heavy metals contaminated kaolin by a CNT-covered polyethylene terephthalate yarn cathode. *Electrochim Acta.* 2016;213:140–7. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.081>
 35. Zhang Y, Boparai HK, Wang J, Sleep BE. Effect of low permeability zone location on remediation of Cr(VI)-contaminated media by electrokinetics combined with a modified-zeolite barrier. *J Hazard Mater.* 2022;426:127785. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127785>
 36. Zhou H, Xu J, Lv S, Liu Z, Liu W. Removal of cadmium in contaminated kaolin by new-style electrokinetic remediation using array electrodes coupled with permeable reactive barrier. *Sep Purif Technol.* 2020;239(516):116544. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116544>
 37. Zhou H, Liu Z, Li X, Xu J. Remediation of lead (II)-contaminated soil using electrokinetics assisted by permeable reactive barrier with different filling materials. *J Hazard Mater.* 2021;408:124885. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124885>
 38. Azhar ATS, Nabila ATA, Nurshuhaila MS, Shaylinda MZN, Azim MAM. Electromigration of contaminated soil by electro-bioremediation technique. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2016;136(1):012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/136/1/012023>
 39. Cameselle C, Reddy KR. Effects of periodic electric potential and electrolyte recirculation on electrochemical remediation of contaminant mixtures in clayey soils. *Water Air Soil Pollut.* 2013;224(8):1636. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1636-8>
 40. Chakraborty R, Ghosh A, Adak A, Chatterjee A. Electrokinetic extraction of Cr(VI) from contaminated kaolin numerical and experimental studies. *Indian Chem Soc.* 2020;97(4):533–9.
 41. Chen F, Xing JH, Cao ZW. Study on the electrokinetic remediation technology of Cr(IV) polluted soil. *Water Air Soil Pollut.* 2013;726–731:1751–4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.1751>
 42. Fansheng M, Lingli L, Juling W, Yeyao W. Effect of pH control at the cathode for the electrokinetic remediation efficiency. *Proc 2013 3rd Int Conf Intell Syst Des Eng Appl ISDEA 2013.* 2013;646–50. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2012.155>
 43. Li D, Niu YY, Fan M, Xu DL, Xu P. Focusing phenomenon caused by soil conductance heterogeneity in the electrokinetic remediation of chromium (VI)-contaminated soil. *Sep Purif Technol.* 2013;120:52–8. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.09.018>
 44. Saberi N, Aghababaei M, Ostovar M, Mehrnahad H. Simultaneous removal of polycyclic aromatic hydrocarbon and heavy metals from an artificial clayey soil by enhanced electrokinetic method. *J Environ Manage.* 2018;217:897–905. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.125>
 45. Sun Z, Tan W, Yao K. Laboratory experiments on cyclic and progressive electrokinetic remediation and electroosmotic consolidation for Zn-contaminated soft clay. *Arab J Geosci.*

- 2021;14(20):2113.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-08520-2>
46. Wu J, Xiao C, Wu H. Exploring electrode capture potential in different Cr-contaminated soils with enhanced electrolytes based on chemical fractionation. *Sep Purif Technol.* 2018;197:54–62.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.12.047>
47. Ait Ahmed O. The removal efficiency of lead from contaminated soil: modeling of cations and anions migration during the electrokinetic treatment. *J Environ Sci Heal - Part A Toxic/Hazardous Subst Environ Eng.* 2020;55(10):1218–32.
<https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1785781>
48. Bhargavi VLN, Sudha PN. Removal of heavy metal ions from soil by electrokinetic assisted phytoremediation method. *Int J ChemTech Res.* 2015;8(5):192–202.
49. Jeon EK, Jung JM, Ryu SR, Baek K. In situ field application of electrokinetic remediation for an As-, Cu-, and Pb-contaminated rice paddy site using parallel electrode configuration. *Environ Sci Pollut Res.* 2015;22(20):15763–71.
<https://doi.org/10.1007/s11356-015-4765-3>
50. Putra RS, Amalia AI, Jannah NZ. Assessing the effect of weak and strong acids as electrolytes in the removal of cesium by soil electrokinetic remediation. *Indones J Chem.* 2021;21(1):118–27. <https://doi.org/10.22146/ijc.53283>
51. Liu SH, Paul Wang H. Electrochemical remediation of copper-contaminated soils enhanced by ethylenediaminetetraacetic acid: An in-situ X-ray absorption spectroscopic study. *Int J Electrochem Sci.* 2013;8(4):4807–17.
52. Betremieux M, Mamindy-Pajany Y. Investigation of a biosurfactant-enhanced electrokinetic method and its effect on the potentially toxic trace elements in waterways sediments. *Environ Technol.* 2021.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1936202>
53. Wu J, Li Q, Lv Z. Regulating and intervening act of Cr chemical speciation effect on the electrokinetic removal in Cr contaminated soil in arid area. *Sep Purif Technol.* 2020;250:117167.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117167>
54. Hu L, Zhang L, Wu H. Experimental study of the effects of soil pH and ionic species on the electro-osmotic consolidation of kaolin. *J Hazard Mater.* 2019;368:885–93.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.015>
55. Mu'azu ND. Evaluation of the influence of clay montmorillonite content on the aqueous uptake of lead and zinc. *Water Environ Res.* 2018;90(9):771–82.
<https://doi.org/10.2175/106143017X15131012153202>
56. Chen YG, Ye WM, Yang XM, Deng FY, He Y. Effect of contact time, pH, and ionic strength on Cd(II) adsorption from aqueous solution onto bentonite from Gaomiaozi, China. *Environ Earth Sci.* 2011;64(2):329–36.
<https://doi.org/10.1007/s12665-010-0850-6>
57. Daniel Tjandra, Paravita Sri Wulandari. Pengaruh elektrokinetik terhadap daya dukung pondasi tiang di lempung marina. *Civ Eng Dimens.* 2006;8(1):15–9.



©2022. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.