



สภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มค่าความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุบวกของการปรับสภาพเถ้าลอยถ่านหิน โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง Optimization of High Cation Exchange Capacity Modified Coal Fly Ash Using Response Surface Methodology

Pathanin Sangaroon* Thares Srisatit** and Pongsert Sriprom***

ปธานิน แสงอรุณ* ธเรศ ศรีสถิตย์** และ พงษ์เสรีฐ ศรีพรหม***

* สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

**ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

***สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*E-mail : Talktopathanin@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการปรับสภาพเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้เถ้าลอยถ่านหินก่อนปรับสภาพมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 61.28 มิลลิอิกวาเลนตต่อ 100 กรัม และทำการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ระยะเวลา (12-36 ชั่วโมง) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (2-4 โมลต่อลิตร) และอุณหภูมิ (80-100 องศาเซลเซียส) พบว่า ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่ปัจจัยร่วมซึ่งได้แก่ ระยะเวลา กับ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับอุณหภูมิ มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($P<0.05$) ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุดคือ ที่ระยะเวลา 34 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด เท่ากับ 272.12 มิลลิอิกวาเลนตต่อ 100 กรัม และทำการยืนยันผลของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว 3 ซ้ำ พบว่าให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายคือ 269.50 ± 2 มิลลิอิกวาเลนตต่อ 100 กรัม

คำสำคัญ : เถ้าลอยถ่านหิน; ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก; วิธีพื้นผิวตอบสนอง;

การทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

Abstract

The optimization of high Cation Exchange Capacity (CEC) of the modified coal fly ash was studied. CEC of the coal fly ash before modification was 61.28 meq/100 g. The experimental condition was designed by Box-Benken design. The independent variables are retention time (12-36 hr), NaOH concentration (2-4 M) and temperature (80-100 C°). The result showed that the independent variables had no significant effect to CEC at 95% confidence level ($P>0.05$). However, The interaction effect between retention time with temperature and NaOH concentration with temperature have significant effect to CEC at 95% confidence level ($P<0.05$) Thus, the optimum condition of high CEC (272.12 meq/100 g) was 34 hr of retention time, 4M of NaOH concentration and 80 C° of temperature. The optimum condition was validated by experimental with 3 times. The results found that CEC of the validated optimum was 269.50 ± 2 meq/100 g which was closely the predicted value.

Keywords : Coal fly ash; Cation exchange capacity; Response surface methodology; Box-Benken design

บทนำ

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อให้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินทำให้เกิดเถ้าลอยถ่านหิน และมีเถ้าลอยถ่านหินเกิดขึ้นทั่วโลกประมาณ 500 ล้านตันต่อปี และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [1] มีนักวิจัยสนใจนำเถ้าลอยถ่านหินไปใช้ประโยชน์ เช่น ทำปุ๋ยโพแทสเซียม นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างใช้เป็นคันทาง เป็นวัสดุถม และเป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐ นอกจากนี้ยังนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อใช้ในการดูดซับ [2-5] เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินมีสารซิลิกาและอลูมินาที่สูง [6] เถ้าลอยถ่านหินมีการนำปรับสภาพเป็นวิธีการที่สำคัญวิธีการหนึ่งในการจัดการของเสีย ซึ่งเถ้าลอยถ่านหินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง [3] และคุณสมบัติ เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ [4]

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity : CEC) คือความสามารถของสารในการดูดซับและแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยหลักการหาค่า CEC คือ ใช้ประจุบวก เช่น NH_4^+ เข้าไปไล่ที่ประจุบวกอื่นๆ ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคของสาร NH_4^+ แล้วแทนที่ด้วย Na^+ จาก NaCl อีกครั้งหนึ่ง NH_4^+ ที่ถูกแทนที่จะกลับมามีอยู่ในสารละลาย ซึ่งสามารถแยกออกมาได้ แล้วหาปริมาณ NH_4^+ อีกครั้งหนึ่งก็จะหาค่า CEC ได้ [5]

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เป็นวิธีการที่รวบรวมเทคนิคทั้งทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ในการสร้างตัวแบบ และวิเคราะห์ปัญหาในกรณีที่ผลตอบสนองมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหรือตัวแปรอิสระหลายตัวเพื่อหาระดับของตัวแปรที่ให้ผลตอบสนองมีค่าดีที่สุด [6] และการออกแบบการทดลองมีหลายรูปแบบ เช่น fractional factorial design (FFD) central composite design (CCD) และแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน Box-Behnken design (BBD) ซึ่งข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน คือต้องการชุดการทดลองที่น้อยเมื่อเทียบกับ fractional factorial design (FFD) หรือ central composite design (CCD) กรณีจำนวนตัวแปรเท่ากัน นอกจากนั้น การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ยังสามารถมองได้ภาพกว้าง (Rotatable) เมื่อไม่สนใจจำนวนของตัวแปรภายใต้สภาวะที่ศึกษา [7]

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนำเถ้าลอยถ่านหินมาปรับสภาพด้วย NaOH เพื่อเพิ่มค่า CEC โดยหาสภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM)

อุปกรณ์และวิธีการ

นำเถ้าลอยถ่านหินที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยโเท็กซ์ไทมิลลส์จำกัด (มหาชน) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น

ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช และ 100 เมช ตามลำดับ แล้วนำไปวิเคราะห์ค่า CEC ก่อนเริ่มต้นก่อนการทดลอง โดยวิธีการทดสอบค่า CEC ตามการทดลองของ Chen et al. [3] และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเถ้าลอยถ่านหินโดยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB version 16.0 (Pennsylvania, USA) โดยศึกษาปัจจัยหลัก 3 ตัว คือ ระยะเวลา (X_1) ความเข้มข้นของ NaOH (X_2) และอุณหภูมิ (X_3) โดยสมการ Full quadratic regression model ดังนี้

$$Y = \beta_0 \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_i^2 X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j \neq i}^4 \beta_{ij} X_i X_j \pm \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ Y คือค่า Response (ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก; CEC) $\beta_0 \beta_i \beta_i^2 \beta_{ij}$ คือ ค่าปัจจัย $X_1 X_2 X_3$ ซึ่งระดับของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับคือระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (1) ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้น จึงมีจำนวนหน่วยการทดลองทั้งหมด 30 หน่วยการทดลอง ดังตารางที่ 2

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดสอบค่า CEC ก่อนปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 61.28 meq/100 g และผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของ NaOH และ อุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ CEC พบว่าค่า CEC มีค่าอยู่ระหว่าง 117.27 meq/100 g ถึง 268.17 meq/100 g และจากการออกแบบการทดลองสามารถสร้างสมการ Full quadratic regression model เพื่อใช้ในการทำนายค่า CEC ได้ ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$Y = 134.477 - 2.883X_1 + 0.115X_2 - 4.339X_3 - 17.697X_1^2 + 59.460X_2^2 + 34.318X_3^2 + 4.690X_1X_2 - 28.010X_1X_3 - 23.925X_2X_3 \quad (2)$$

เมื่อ Y คือ CEC (meq /100 g) X_1 คือ ระยะเวลา (ชั่วโมง) X_2 คือ ความเข้มข้นของ NaOH (โมลต่อลิตร) และ X_3 คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
X_1 :ระยะเวลา (ชั่วโมง)	12	24	36
X_2 :ความเข้มข้นของ NaOH (โมลต่อลิตร)	2	3	4
X_3 :อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	80	90	100

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ลำดับการทดลอง	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น NaOH (โมลต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	CEC (meq/100g)	Y predict (meq/100g)
1	24	2	100	266.25	250.7263
2	24	3	90	147.37	137.4767
3	24	3	90	145.61	137.4767
4	12	4	90	192.72	177.5475
5	36	4	90	160.39	181.1625
6	36	4	90	162.11	181.1625
7	36	3	100	117.27	118.8663
8	24	4	80	241.89	259.6338

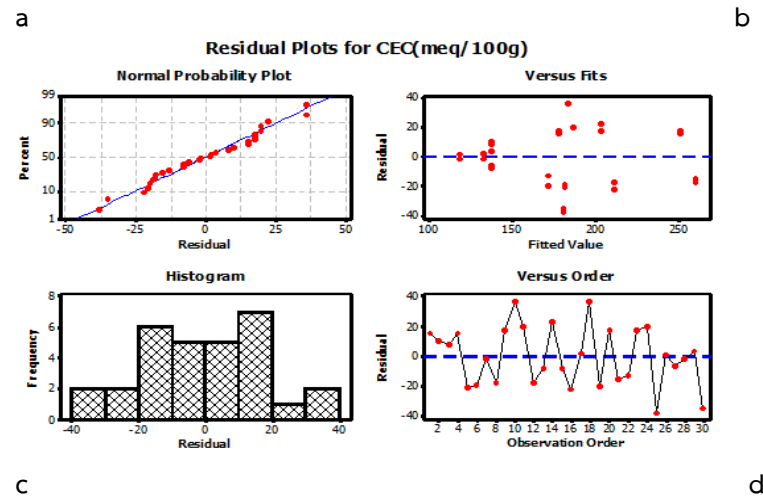
ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (ต่อ)

ลำดับ การทดลอง	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น NaOH (โมลต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	CEC (meq/100g)	Y predict (meq/100g)
9	24	2	100	268.17	250.7263
10	36	3	80	219.96	183.5638
11	12	2	90	206.61	186.6975
12	24	2	80	193.72	211.5538
13	24	3	90	129.67	137.4767
14	24	4	100	225.56	203.1063
15	24	3	90	129.67	137.4767
16	24	2	80	189.43	211.5538
17	12	3	80	135.31	133.3088
18	36	3	80	219.96	183.5638
19	36	2	90	151.94	171.5525
20	12	4	90	195.21	177.5475
21	24	4	80	244.41	259.6338
22	36	2	90	158.33	171.5525
23	24	4	100	220.61	203.1063
24	12	2	90	206.61	186.6975
25	12	3	100	142.84	180.6513
26	36	3	100	120.33	118.8663
27	24	3	90	131.43	137.4767
28	12	3	80	131.44	133.3088
29	24	3	90	141.11	137.4767
30	12	3	100	145.60	180.6500

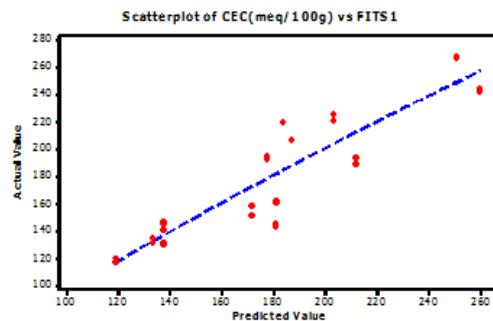
ความแม่นยำและความถูกต้องของสมการของการทำนายสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 1 พบว่า รูปที่ 1a โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Residual กับ Frequency พบว่า ผลข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีการกระจายลักษณะเป็นเส้นตรง รูปที่ 1b ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Fitted value กับ Residual พบว่าข้อมูลผลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะการกระจายของข้อมูล รูปที่ 1c กราฟฮิสโทแกรม พบว่า ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะเหมือนระฆังคว่ำซึ่งเป็นการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ รูปที่ 1d ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Observation order กับ Residual

พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล จากกราฟทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ว่า ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากการทดลองนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่า CEC ของเถ้าลอยถ่านหินได้ [8, 9]

จากการเปรียบเทียบค่า CEC ของเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากการทดลองในสภาวะต่างๆ กันกับค่าการทำนายค่า CEC ของเถ้าลอยถ่านหิน ตามสมการที่ (2) พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 81.5% ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 1 กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order



รูปที่ 2 แสดงค่า CEC ที่ได้จากการทำนายและค่า CEC ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 3 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ

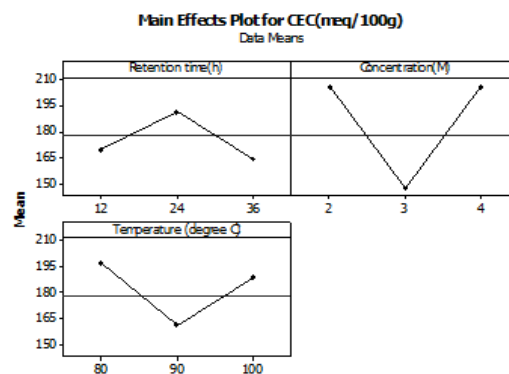
Term	coef	Ftest	P
constant	137.477	9.77	0.000
X ₁	-2.883	0.24	0.629
X ₂	0.115	0.00	0.985
X ₃	-4.339	0.55	0.469
X ₁ X ₁	-17.697	4.19	0.054
X ₂ X ₂	59.460	47.26	0.000
X ₃ X ₃	34.318	15.74	0.001
X ₁ X ₂	4.690	0.32	0.579
X ₁ X ₃	-28.010	11.36	0.003
X ₂ X ₃	-23.925	8.29	0.009
R ² =81.5%			

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการทำนาย (Analysis Of Varian; Anova) จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่าค่า R^2 เท่ากับ 81.5% นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 ตัวแปรได้แก่ ระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิ มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่ระยะเวลา ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิ มีผลทำให้ค่า CEC เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ต่างกัน และปัจจัยหลักทั้ง 3 ตัว นี้ไม่สามารถอธิบายผลจากปัจจัยอย่างใดอย่างหนึ่งได้ เนื่องจากว่าผลของปัจจัยทั้ง 3 มีผลร่วมกัน นั่นคือ ระยะเวลา กับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของ NaOH กับอุณหภูมิ มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($P<0.05$)

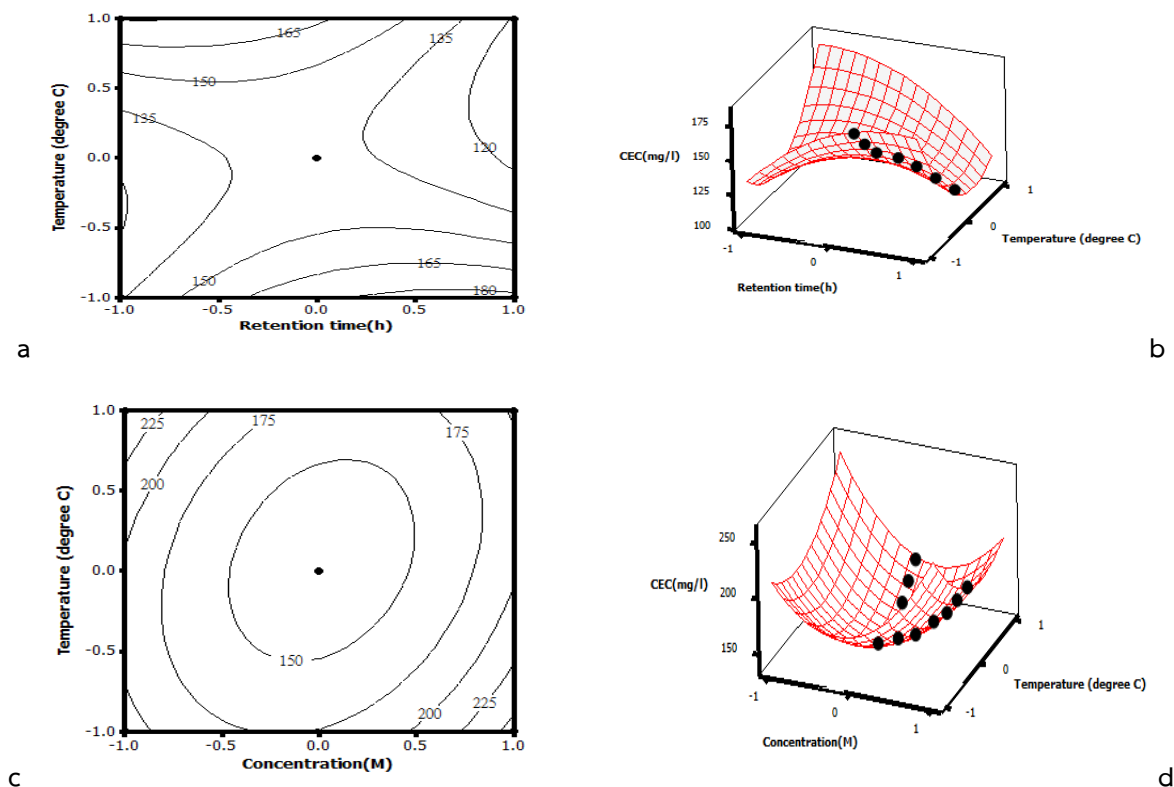
ผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า CEC แก่ล้อยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยสภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 3 นั้นพบว่าที่ปัจจัยด้านระยะเวลา ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จะให้ค่า CEC เพิ่มขึ้นแค่ช่วงเวลาหนึ่งและก็จะลดลงเช่นเดียวกับค่า CEC ของสารซีโอไลต์ชนิด Na-Y จะให้ค่า CEC ในระยะเวลาเริ่มการทำปฏิกิริยาเนื่องจากสารกำลังสร้างผลึก (crystallization) แต่ถ้าใช้ระยะเวลานานเกินกว่า 12 ชั่วโมง ค่า CEC Na-Y จะลดลง [10] ปัจจัยด้านความเข้มข้นของ NaOH ในแต่ละช่วงมีผลต่อการเกิดสารเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างของสารที่ปรับสภาพต่างกันเช่น ใช้ NaOH ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร และ 4 โมลต่อลิตร พบว่ามีค่า CEC ที่ใกล้เคียงกัน แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นของ NaOH มากกว่าจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า [10] และปัจจัยด้านอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียสมีค่า CEC สูง และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของผลึกที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นและทำให้ค่า CEC ลดลง [11]

ผลของปัจจัยร่วมที่ส่งผลกับค่า CEC แสดงในรูปที่ 4 พบว่า ระยะเวลา กับอุณหภูมิ ค่า CEC มีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น จะใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพแก่ล้อยถ่านหินลดน้อยลง (4a 4b) และที่ความสัมพันธ์ของปัจจัยร่วมของ ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิ (4c 4d) พบว่าค่า CEC ของแก่ล้อยถ่านหินจะมีค่าสูง เมื่อใช้ความเข้มข้นของ NaOH สูง และอุณหภูมิต่ำ ในการปรับสภาพแก่ล้อย และค่า CEC ของแก่ล้อยถ่านหินจะมีค่าสูงถ้าใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ และใช้อุณหภูมิสูง ในการปรับสภาพแก่ล้อยถ่านหิน ซึ่งผลของปัจจัยร่วมกันในด้านระยะเวลา ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิ ล้วนส่งผลร่วมกันต่อการเพิ่มสูงขึ้นของค่า CEC [12, 13]



รูปที่ 3 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแก่ล้อยถ่านหิน



รูปที่ 4 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเถ้าลอยถ่านหิน

จากการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่า CEC สูงสุดของเถ้าลอยถ่านหิน พบว่า ที่ระยะเวลา ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิ ที่ 34 ชั่วโมง 4 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เถ้าลอยถ่านหินให้ค่า CEC เท่ากับ 272.12 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม ดังนั้นจึงมีการยืนยันจากสภาวะที่เหมาะสมโดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ พบว่า CEC เท่ากับ 269.50 ± 2 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายของสมการ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการทำนายมีความถูกต้องแม่นยำในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มค่า CEC ที่สูงสุดของเถ้าลอยถ่านหิน

สรุป

เถ้าลอยถ่านหินก่อนปรับสภาพมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 61.28 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม และสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มค่า

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการปรับสภาพเถ้าลอยถ่านหินโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ที่ระยะเวลาในการสัมผัส 34 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ NaOH 4 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิตั้งที่ 80 องศาเซลเซียส ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 269.50 ± 2 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายของสมการที่มีค่าเท่ากับ 272.12 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ 100 กรัม และผลของระยะเวลากับอุณหภูมิ และความเข้มข้นกับอุณหภูมิมีผลทางนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเถ้าลอยถ่านหิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์และเทคโนโลยี สุขภาพ วิทยาลัยนครราชสีมา วิทยาการกรุงเทพฯ และ

ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kankyo Gijyutsu Kyokai and Nippon Fly Ash Kyokai., Eds. Coal Ash Handbook; Tokyo, 2000.
- [2] Kondru, A.K., Kumar, P., Teng, T.T., Chand, S. and Wasewar, KL. 2011. Synthesis and characterization of Na-Y zeolite from coal fly ash and its effectiveness in removal of dye from aqueous solution by wet peroxide oxidation. Arch Environ Sci. 5: 46-54.
- [3] Chen, J.G., Kong, H.N., Wu, D.Y., Hu, Z.B., Wang, Z.S. and Wang, Y.H. 2006. Removal of phosphate from aqueous solution by zeolite synthesized from fly ash, Journal of Colloid and Interface Science. 300: 491-497.
- [4] Al-Shawabkeh, A., Matsuda, H., Hasatani, M. 1995. Comparative reactivity of treated FBC- and PCC-fly ash for SO₂ removal. Can J. Chem. Eng. 73: 678-85.
- [5] Zhang, M., Zhang, H., Xu, D., Han, L., Niu, D., Tian, B., Zhang, J., Zhang, L. and Wu, W. 2011. Removal of ammonium from aqueous solutions using zeolite synthesized from fly ash by a fusion method Desalination. 271: 111-121.
- [6] Song, C., Y. Kitamura, and S. Li. 2014. Optimization of a novel cryogenic CO₂ capture process by response surface methodology (RSM). J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 45: 1666-1676.
- [7] Ray, S., Reaume, S.J. and Lalman, J.A. 2010. Developing a statistical model to predict hydrogen production by a mixed anaerobic mesophilic culture. International Journal of Hydrogen Energy 35: 5332-5342.
- [8] Tantriratna, P., Wirojanagud, W., Neramittagapong, S., Wantala, K. and Grisdanurak, N. 2011. Optimization for UV-photocatalytic degradation of paraquat over titanium dioxide supported on rice husk silica using Box-Behnken design, Indian J. Chem. Technol. 18: 363-371.
- [9] Wantala, K., Khongkasem, E., Khlongkarnpanich, N., Sthiannopkao, S. and Kim, K.-W. 2012. Optimization of As(V) adsorption on Fe-RH-MCM-41-immobilized GAC using Box-Behnken Design: Effects of pH, loadings, and initial concentrations, Appl. Geochem. 27: 1027-1034.
- [10] Wang, Y. and Lin, F. 2009. Synthesis of high capacity cation exchangers from a low-grade Chinese natural Zeolite. J. Hazard Mater. 166: 1014-1019.
- [11] Breck, D.W. 1974. Zeolite Molecular Sieves, John Wiley and Sons, New York.
- [12] Ojha, K., Pradhan, N.C. and Samanta, A.N. 2004. Zeolite from fly ash: synthesis and characterization, Bull. Mater. Sci. 27: 555-564.
- [13] Shigemoto, N., Hayashi, H. and Miyaura, K. 1993. Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction, J. Mater. Sci. 28: 4781-4786.