

## อิทธิพลของสมบัติดินต่อการดูดซับสังกะสี จากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียชุมชนในดิน

# Influence of Soil Properties on Zinc Adsorption from Sewage Sludge Leachate in Soils

ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

E-mail: suppakiet@gmail.com

Manuscript received October 17, 2016,

Revised November 17, 2016.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาถึงอิทธิพลของสมบัติดินต่อการดูดซับสังกะสีจากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียชุมชนในดิน ตัวอย่างดินทั้ง 27 ชนิดเก็บจากพื้นที่เกษตรกรรมในเขตพื้นที่ของกรุงเทพฯ และจังหวัดใกล้เคียง ตัวอย่างสลัดจ์น้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำส่วนกลางหนองแขม กรุงเทพฯ ดำเนินการทดลองการดูดซับน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียที่สภาวะอุณหภูมิ  $25 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส ตลอดช่วงระยะเวลา 6 วัน ผลการศึกษาพบว่าไอโซเทอร์มฟรุนดลิช สามารถใช้อธิบายการดูดซับสังกะสีจากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียในดินจากชนิดดินทั้งหมดได้ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ ( $r^2$ ) อยู่ระหว่าง 0.958-0.995 ( $P$ -value  $< 0.01$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $K_p$ ) อยู่ในช่วง 11.687-101.414 (มก./กก.)(ล./มก.)<sup>1/n</sup> และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าพีเอช เหล็กออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แมงกานีสออกไซด์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก อนุภาคดินเหนียว และสารอินทรีย์ในดิน องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของสังกะสีในดินหลังจากการดูดซับส่วนใหญ่อยู่ในรูปคาร์บอเนต และรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับสัดส่วนรูปแบบของสังกะสีในดินแสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดที่อิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายของสังกะสีในดิน

คำสำคัญ: การดูดซับ, สังกะสี, น้ำชะละลาย, สลัดจ์น้ำเสียชุมชน

### ABSTRACT

*This research studied the influence of soil properties on Zn adsorption from sewage sludge leachate in soils. Twenty-seven soil types were selected as the soil samples from agricultural areas within Bangkok and nearby provinces. A sewage sludge sample was collected from the Nongkhaem Central Sewage Sludge Treatment Plant, Bangkok. The adsorption experiments were carried out with the sewage sludge leachate at  $25 \pm 0.5$  °C over a period of 6 days. The results showed that the Freundlich isotherm effectively described the adsorption phenomena of the Zn in all soil types with the coefficients of determination ( $r^2$ ) of 0.958-0.995 ( $P$ -value  $< 0.01$ ). The sorption coefficient ( $K_p$ ) ranged from 11.687 to 101.414 (mg/kg)(L/mg)<sup>1/n</sup> and positively correlated with pH, Fe-oxide, CaCO<sub>3</sub>, Mn-oxide, CEC, clay and organic matter content in soils. Results from the sequential extraction of the sorbed Zn in soils indicated that the predominance of Zn associated with the carbonated bound and Fe-Mn oxide bound fractions. Correlation analysis between soil properties and different Zn fractions indicated that soil CEC was the most important soil properties that affect the mobility of Zn retained in the soils.*

Keywords: Adsorption, Zinc, Leachate, Sewage sludge

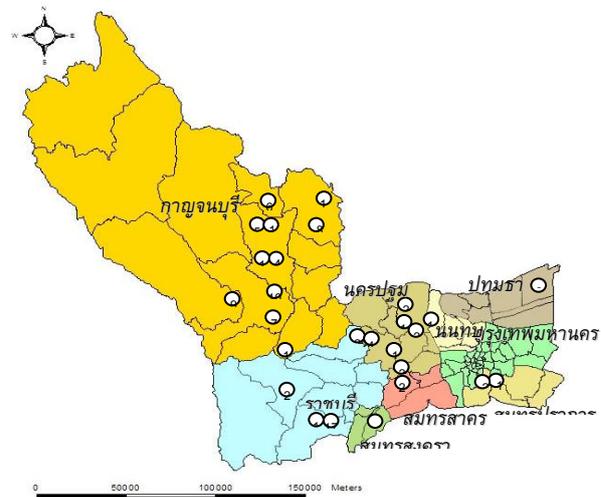
## 1. บทนำ

การจัดการสลัดจ์น้ำเสียชุมชนด้วยการนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรนับเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งนอกจากเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์แล้วยังเป็นการเพิ่มคุณค่าโดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชและการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน [1] แต่ในขณะเดียวกันนั้นในสลัดจ์น้ำเสียยังมีส่วนประกอบของโลหะหนักต่าง ๆ ปนเปื้อนรวมอยู่ การนำไปใช้โดยที่ไม่มีการควบคุมปริมาณอาจก่อให้เกิดการสะสมในดินจนอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพดินและมีความเป็นพิษต่อพืชและจุลินทรีย์ในดินได้ [2] - [3] สังกะสี (Zn) เป็นประเภทของโลหะหนักที่พบในปริมาณสูงในสลัดจ์น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนจากกรุงเทพฯ [4] มีความสามารถในการเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้สูงและพบการสะสมได้มากในดินชั้นบนจนมีความเป็นพิษต่อพืช โดยปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับตลอดจนปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักบนผิวอนุภาคดินก็คือสมบัติของดินที่เป็นตัวดูดซับเอง ดังนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลของสมบัติของดินจากชุดดินที่เป็นตัวแทนจากพื้นที่ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพในการนำสลัดจ์น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนของกรุงเทพฯ ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร [4] ต่อความสามารถในการดูดซับและรูปแบบการกระจายตัวของ Zn จากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียชุมชนที่มีผลโดยตรงต่อความเป็นพิษต่อพืชในดินก็สามารถทำให้เข้าใจถึงอิทธิพลและความสัมพันธ์ของสมบัติดินต่อกลไกในการดูดซับรวมถึงรูปแบบทางเคมีของ Zn ในชุดดินดังกล่าวเพื่อใช้เป็นข้อมูลพิจารณาใช้สลัดจ์น้ำเสียเป็นวัสดุปรับปรุงดินได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

## 2. วิธีการศึกษา

ตัวอย่างดินจากชุดดินต่างๆที่มีความลึก 0-20 ซม. ครอบคลุมพื้นที่ 9 จังหวัด ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวอย่างสลัดจ์น้ำเสียชุมชนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนน้ำส่วนกลางหนองแขม กรุงเทพฯ วิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นได้แก่ ค่า pH [5] ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก [5] อินทรีย์วัตถุ [6] ร้อยละอนุภาคดินเหนียว [7] คาร์บอนเนต [8] เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ [9] เตรียมน้ำชะละลายโดยใช้สลัดจ์และน้ำที่ปรับ pH = 5.0±0.01 ด้วยสาร H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: HNO<sub>3</sub> (60:40 โดยน้ำหนักกรดเข้มข้น) ในอัตราส่วน 1:20 เขย่า 18 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 23±0.5 °C [10] กรองและนำส่วนหนึ่งไปลด

ปริมาณให้เหลืออยู่ร้อยละ 75, 50, 25 และ 15 ด้วยอ่างระเหยที่อุณหภูมิ 60°C ปรับค่า pH = 7.10±0.01 ได้ค่าความเข้มข้น Zn ในช่วง 0.250-1.074 มก./ล. ทดลองโดยใช้ดิน 1 กรัม และน้ำชะละลาย 20 มล. เขย่าเป็นเวลา 6 วัน ที่อุณหภูมิ 25±0.5 °C บั่นให้ตกตะกอนแล้วกรอง วิเคราะห์ Zn ในน้ำ ส่วนดินนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบรูปแบบทางเคมี โดยวิธีสกัดตามลำดับของ Tessier et al. [11] ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable, EXCH) รูปคาร์บอเนต (Carbonate Bound, CARB) รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn Oxide Bound, Fe-Mn OXB) รูปสารอินทรีย์ (Organically Bound, ORGB) และรูปที่คงเหลือ (Residual, RESD)



สัญลักษณ์ชุดดิน

1. บางกอก (Bk)	10. โพนงาม (Png)	19. บางเขน (Bn)
2. ฉะเชิงเทรา (Cc)	11. นครปฐม (Np)	20. เสนา (Se)
3. รังสิต (Rs)	12. มโนรมย์ (Mn)	21. กำแพงแสน (Ks)
4. น้ำพอง (Ng)	13. ปากท่อ (Pth)	22. ท่ายาง (Ty)
5. โคราซ (Kt)	14. เรณู (Rn)	23. กำแพงเพชร (Kp)
6. แม่ริม (Mr)	15. หุบกะพง (Hg)	24. ราชบุรี (Rb)
7. ปากช่อง (Pc)	16. ยางตลาด (Yt)	25. บางเลน (Bl)
8. จตุรัส (Ct)	17. เดิมบาง (Db)	26. ดำเนินสะดวก (Ds)
9. หินซ้อ (Hs)	18. สระบุรี (Sb)	27. สมุทรสงคราม (Sso)

รูปที่ 1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินจากชุดดินระบุบนแผนที่

วิเคราะห์ผลโดยใช้ไอโซเทอร์มฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

$$q_e = K_d C_e \quad (3)$$

ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอร์มแบบ

เส้นตรง (Linear Isotherm) ดังสมการ (1) – (3) ตามลำดับ

$$q_e = K_f C_e^n \quad (1)$$

$$q_e = \frac{abC_e}{(1+bC_e)} \quad (2)$$

โดยที่  $q_e$  คือปริมาณโลหะหนักที่ถูกซับต่อน้ำหนักดิน (มก./กก.);

$C_e$  คือความเข้มข้นโลหะหนักคงเหลือ (มก./ล.);  $K_f$  และ  $n$  คือค่าสัมประสิทธิ์สมการฟรอนด์ลิช;  $a$  และ  $b$  คือค่าสัมประสิทธิ์สมการแลงเมียร์  $K_d$  = ค่าสัมประสิทธิ์สมการเส้นตรง วิเคราะห์ผลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS จากข้อมูลผลการศึกษากลุ่มตัวอย่างจำนวน 27 ชุดดินและดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 1 สมบัติของตัวอย่างดิน

ชุดดิน	การจำแนกดิน* [12]	pH 1:1	OM %	Clay %	CEC cmol/kg	CaCO <sub>3</sub> %	Fe oxides mg/kg	Mn oxides mg/kg	Total Zn mg/kg
1. Bk	Vertic Endoaquepts	6.81	2.48	64	28	1.4	411	78	158
2. Cc	Vertic Endoaquepts	6.64	0.91	58	18	1.0	376	30	79
3. Rs	Sulfic Endoaquepts	4.14	1.89	67	20	1.0	183	23	31
4. Ng	Grossarenic Haplustalfs	6.33	0.88	8	3	0.8	205	49	10
5. Kt	Typic (Oxyaquic) Kandistults	5.36	0.82	13	3	0.6	103	8	0.3
6. Mr	Typic (Kandic) Paleustults	4.52	0.92	10	4	0.8	81	11	4
7. Pc	Rhodic Kandistox.	8.07	2.94	57	18	1.5	381	56	36
8. Ct	Typic Haplustalfs	7.76	1.90	23	12	0.9	138	29	7
9. Hs	Lithic Haplustalfs	7.00	3.83	57	30	1.3	315	35	48
10. Png	Typic Haplustults	4.76	0.72	10	1	0.7	55	27	46
11. Np	Aeric Endoaqualfs	5.88	2.82	41	14	0.8	379	42	58
12. Mn	Aeric (Plinthic) Endoaqualfs.	6.32	0.49	43	16	1.0	66	13	4
13. Pth	(Aeric) Plinthic Palequults	6.86	0.64	19	5	0.9	90	27	13
14. Rn	(Aeric) Plinthic Paleaquults	7.13	1.18	12	6	0.9	238	61	72
15. Hg	Typic Haplustalfs	4.77	0.49	8	2	0.8	22	12	10
16. Yt	Oxyaquic (Ultic) Haplustalfs	6.42	1.44	7	4	0.8	209	18	16
17. Db	Aeric (Plinthic) Endoaqualfs	6.83	1.41	24	3	0.7	156	6	11
18. Sb	Vertic (Aeric) Endoaquepts	7.14	2.47	52	26	1.2	369	28	69
19. Bn	Vertic Endoaquepts	3.53	1.34	33	18	0.9	137	9	56
20. Se	Sulfic Endoaquepts	3.46	1.68	31	13	0.8	114	2	113
21. Ks	Typic Haplustalfs	7.23	1.20	25	12	1.2	301	35	44
22. Ty	Kanhaplic Haplustults	6.75	0.60	13	8	0.9	62	4	3
23. Kp	Oxyaquic (Ultic) Haplustalfs	6.85	4.07	41	26	1.1	380	63	256
24. Rb	Vertic (Aeric) Endoaquepts	6.69	2.60	55	21	1.2	323	54	85
25. Bl	Vertic Endoaquolls	6.55	2.11	42	30	1.1	289	39	32
26. Ds	Typic Haplaquolls	6.16	1.80	54	31	1.1	256	24	63
27. Sso	Aeric Trophaquepts	7.83	1.61	38	24	1.1	190	29	89
Max.		8.07	4.07	67	31	1.5	411	78	256
Min.		3.46	0.49	7	1	0.6	22	2	0.3

### 3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ตัวอย่างดินและสลัดจ์น้ำเสีย

ผลการวิเคราะห์สมบัติดินดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าตัวอย่างดินมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทรายถึงดินเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียวร้อยละ 7-67 โดยมีค่ามากที่สุดในชุดดินรังสิต (Rs) ค่า pH ในช่วง 3.46-8.07 อินทรีย์วัตถุในช่วงร้อยละ 0.49-4.07 ค่า CEC ในช่วง 1-31 เซนติโมล/กก.  $\text{CaCO}_3$  ในช่วงร้อยละ 0.6-1.5 ออกไซด์ของ Fe และ Mn ในช่วง 22-411 มก./กก. และ 2-78 มก./กก. ตามลำดับ และมี Zn ทั้งหมดในช่วง 0.3-256 มก./กก. ส่วนตัวอย่างสลัดจ์น้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 6.28 อินทรีย์วัตถุร้อยละ 28.68 และ Zn ทั้งหมดเท่ากับ 2,127 มก./กก.

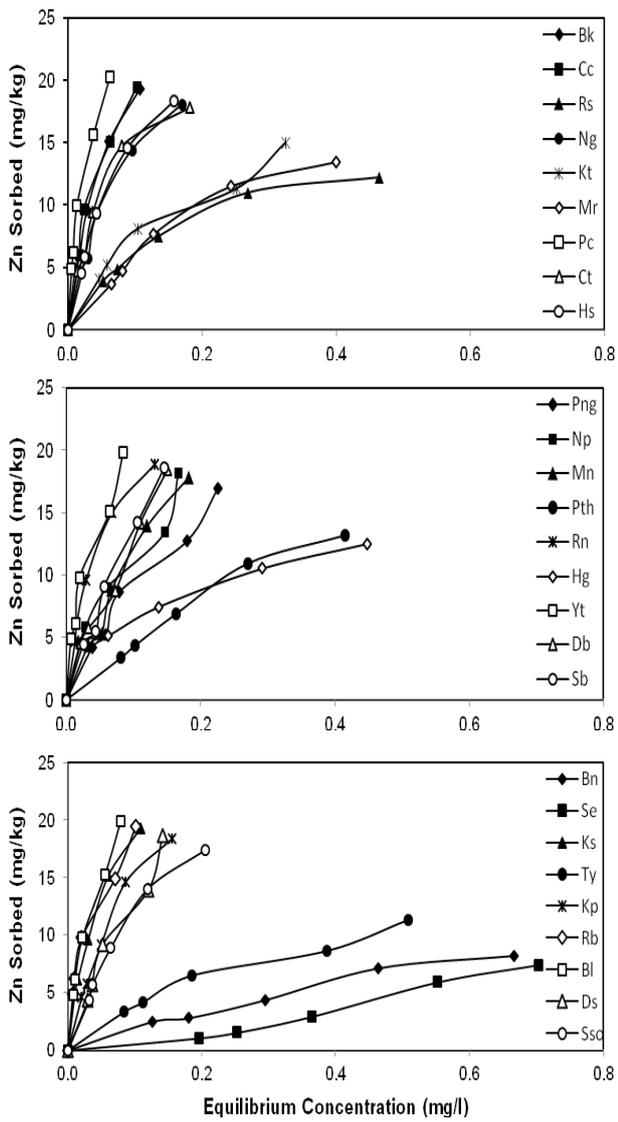
#### 3.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Zn

รูปที่ 2 แสดงลักษณะการดูดซับ Zn ที่เกิดขึ้นในชุดดินต่าง ๆ โดยรวมแล้วในช่วงที่มีความเข้มข้น Zn ต่ำ ๆ ดินจะมีศักยภาพการดูดซับ Zn ได้ที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นชุดดินเสนาและชุดดินบางเขนที่แสดงศักยภาพที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากดินดังกล่าวมีความเป็นกรดจัดซึ่งเป็นผลต่อการดูดซับโดยดินมีค่า pH เท่ากับ 3.46 และ 3.53 ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้น Zn เพิ่มสูงขึ้นความสามารถการดูดซับ Zn ที่เกิดขึ้นของแต่ละชุดดินจะมีความแตกต่างชัดเจนยิ่งขึ้น โดยชุดดินปากช่องสามารถดูดซับ Zn ได้สูงที่สุดขณะที่ชุดดินเสนาสามารถดูดซับ Zn ได้ต่ำสุด ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงในตารางที่ 2 โดยไอโซเทอร์มฟรุนดลิช ให้ค่า  $R^2$  สูงสุดระหว่าง 0.958 ถึง 0.995 มีค่า  $K_f$  และ  $n$  ในช่วง 11.687-101.414 (มก./กก.)(ล./มก.)<sup>1/n</sup> และ 0.632-2.753 ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอร์มแลงเมียร์ มีค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.348 ถึง 0.994 มีค่า  $a$  และ  $b$  ในช่วง 11.628-81.301 มก./กก. และ 0.538-39.556 และไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง มีค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.850 ถึง 0.988 มีค่า  $K_d$  และ  $b$  ในช่วง 11.351-259.260 ล./กก. และ 0.420-5.373 ตามลำดับ ทั้งนี้โดยทั่วไปไอโซเทอร์มฟรุนดลิชมักใช้ดีในการอธิบายการดูดซับโดยของแข็งที่มีสภาพพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมักพบว่าสามารถอธิบายการดูดซับในดินไม่ว่าจะเป็นไอออนบวกหรือไอออนลบได้ดีกว่าไอโซเทอร์มแลงเมียร์ [13] – [15]

#### 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติดินและค่าสัมประสิทธิ์

เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากไอโซเทอร์มฟรุนดลิชวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางสถิติเนื่องจากสามารถใช้อธิบายผลการดูดซับ Zn ได้ดีที่สุด โดยค่า  $K_f$  แสดงถึงศักยภาพหรือความสามารถในการดูดซับ และ  $n$  ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงและอัตราของการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมีผลแสดงในตารางที่ 3 โดยค่า  $r$  ระหว่างสมบัติของดินกับค่า  $K_f$  มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ ( $P$ -value < 0.01) จากมากไปน้อยคือ pH (0.697) > Fe-oxides (0.693) >  $\text{CaCO}_3$  (0.612) > Mn-oxides (0.552) > CEC (0.525) > Clay (0.489) ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยการดูดซับ Zn ในดินกรดของ Arias et. al. [16] พบว่าค่า  $r$  ที่มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ ( $P$ -value < 0.05) กับค่า CEC (0.839) และค่า pH (0.755) ตามลำดับ ส่วนค่า  $r$  ระหว่างสมบัติของดินกับค่า  $n$  มีค่า  $r$  อยู่ในช่วง -0.028 ถึง 0.328 โดยมีค่า  $r$  สูงที่สุดกับ Mn-oxides ( $r$  = 0.328)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมบัติดินกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับจากชุดดินที่ใช้ศึกษา แสดงผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยการดูดซับ Zn ในดินต่างๆที่ผ่านมา เช่น Cavallaro และ Mcbride [17] ที่ศึกษาการดูดซับ Zn ในดินเหนียวที่มีสภาพเป็นกรด โดยพบว่าดินที่มีค่า pH และ Fe-oxides สูง สามารถดูดซับ Zn ได้ดี เช่นเดียวกับ Imtiaz et al. [18] ที่พบว่า Zn จะถูกดูดซับได้มากในดินที่มีค่า pH และ  $\text{CaCO}_3$  อยู่ในช่วงที่สูงและสอดคล้องกับการศึกษาของ Toribio และ Romanya [19] ที่พบว่า  $\text{CaCO}_3$  มีผลอย่างมากต่อการดูดซับ Zn ในดิน นอกจากนี้ Bradl [20] ยังพบว่านอกจาก  $\text{CaCO}_3$  แล้วอนุภาคของ Clay ก็มีผลอย่างมากต่อการดูดซับ Zn ในดินเช่นกัน และความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Zn ที่เติมลงในดิน ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยโปรแกรม SPSS ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบขั้นตอนเพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สุด ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K_f$  แสดงในสมการที่ 4 โดยพบว่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสมการทำนายค่า  $K_f$  ของสมการฟรุนดลิช ได้แก่ ค่า pH และ ปริมาณ Fe-oxides โดยมีค่า  $R^2$  = 0.648



รูปที่ 2 การดูดซับ Zn ในดินจากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสีย

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ Zn

ชนิดดิน	Freundlich			Langmuir			Linear		
	$K_f$	$n$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$K_d$	$b$	$R^2$
1. Bk	81.733	1.602	0.986*	30.581	15.571	0.980*	149.570	4.202	0.954*
2. Cc	90.573	1.525	0.980*	31.546	15.095	0.961*	150.670	4.292	0.942*
3. Rs	35.416	1.300	0.977*	17.123	5.782	0.992*	20.148	3.913	0.886
4. Ng	60.131	1.572	0.969*	29.326	9.743	0.964*	88.095	4.149	0.932*
5. Kt	28.987	1.631	0.974*	22.936	4.844	0.935*	35.435	3.180	0.965*
6. Mr	29.194	1.390	0.958*	26.667	2.757	0.919*	28.878	2.919	0.914
7. Pc	101.414	1.757	0.983*	28.090	39.556	0.986*	259.260	4.788	0.961*
8. Ct	67.499	1.591	0.980*	24.450	15.731	0.979*	76.158	5.373	0.850
9. Hs	70.097	1.475	0.970*	31.949	8.943	0.976*	97.540	3.967	0.934*
10. Png	52.192	1.292	0.963*	42.017	2.7674	0.721	65.938	2.032	0.975*
11. Np	47.764	1.670	0.979*	25.974	9.625	0.887	80.610	3.365	0.954*
12. Mn	83.100	1.143	0.965*	78.740	1.671	0.381	93.388	1.542	0.968*
13. Pth	30.726	1.167	0.983*	45.872	1.038	0.794	30.012	1.558	0.958*
14. Rn	67.608	1.710	0.969*	27.027	17.619	0.994*	115.250	4.930	0.919
15. Hg	16.025	2.753	0.961*	14.684	10.164	0.966*	19.355	4.308	0.979*
16. Yt	72.979	1.824	0.966*	26.596	26.857	0.930*	177.820	4.364	0.964*
17. Db	64.536	1.421	0.973*	39.063	5.120	0.680	107.870	1.948	0.988*
18. Sb	96.405	1.166	0.965*	81.301	2.016	0.348	120.190	1.283	0.983*
19. Bn	11.687	1.368	0.977*	23.529	0.822	0.750	11.351	1.021	0.965*
20. Se	14.391	0.632	0.989*	11.628	0.538	0.619	13.204	0.420	0.982*
21. Ks	78.019	1.655	0.995*	29.155	18.053	0.992*	147.880	4.373	0.954*
22. Ty	17.187	1.549	0.979*	19.194	2.505	0.938*	17.449	2.319	0.969*
23. Kp	75.353	1.400	0.985*	35.714	7.179	0.973*	102.740	3.473	0.941*
24. Rb	58.210	2.055	0.981*	23.474	35.500	0.971*	142.590	5.072	0.967*
25. Bl	93.907	1.634	0.987*	30.030	22.200	0.972*	203.330	4.023	0.981*
26. Ds	92.491	1.188	0.959*	59.880	2.879	0.549	112.370	1.793	0.957*
27. Sso	60.898	1.368	0.972*	35.336	4.965	0.944*	74.042	3.296	0.940*
Max.	101.414	2.753	0.995	81.301	39.556	0.994	259.260	5.373	0.988
Min.	11.687	0.632	0.958	11.628	0.538	0.348	11.351	0.420	0.850

\* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 3 ค่า r ระหว่างสมบัติดินและค่าสัมประสิทธิ์ไอโซเทอร์ม

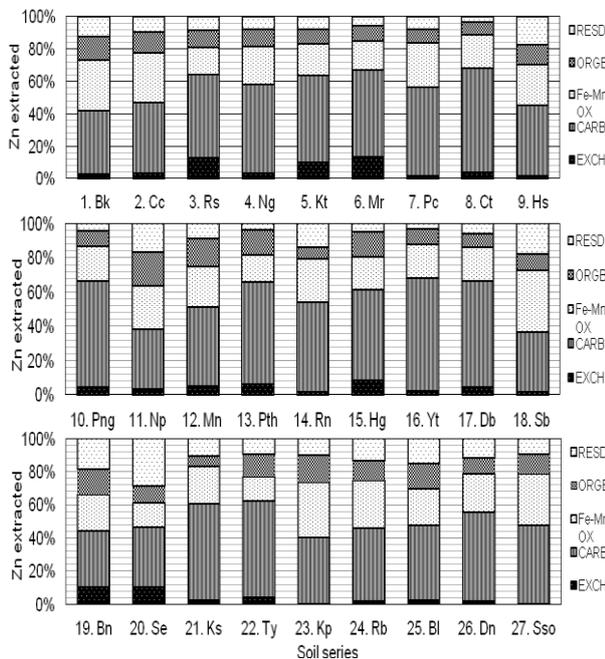
พารามิเตอร์	$K_f$	$n$
pH	0.697*	0.292
OM	0.413	0.131
Clay	0.489*	-0.046
CEC	0.525*	-0.028
CaCO <sub>3</sub>	0.612*	0.219
Fe-oxides	0.693*	0.317
Mn-oxides	0.552*	0.328
Total Zn	0.235	-0.123

\* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

$$K_f = -27.649 + 10.339 (\text{pH}) + 0.105 (\text{Fe-oxides}) \quad (4)$$

### 3.3 องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ในดิน

จากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงสัดส่วนร้อยละองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ในชุดดินต่าง ๆ จากการสกัดตามลำดับ พบว่ามีสัดส่วนรูปแบบทางเคมีของ Zn โดยรวมเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ (CARB) > (Fe-Mn OX) > (ORGB) > (RESD) > (EXCH)



รูปที่ 3 องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ในดิน

ประกอบด้วย Zn ในรูป CARB ร้อยละ 34-66 (ช่วง 21.6-57 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินเสนา (Se) และค่าสูงสุดในชุดดินยางตลาด (Yt) รองลงมาคือ รูป Fe-Mn OX ร้อยละ 14-36 (ช่วง 5.5-40.6 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินท่ายาง (Ty) และค่าสูงสุดในชุดดินกำแพงเพชร (Kp) รูป ORGB ร้อยละ 6-20 (ช่วง 5.1-20.3 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินแม่ริม (Mr) และค่าสูงสุดในชุดดินกำแพงเพชร (Kp) รูป RESD ร้อยละ 3-29 (ช่วง 2.1-17.9 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินจตุรัส (Ct) และค่าสูงสุดในชุดดินสระบุรี (Sb) และรูป EXCH ร้อยละ 1-13 (ช่วง 1.1-17.5 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินกำแพงเพชร (Kp) และค่าสูงสุดในชุดดินแม่ริม (Mr) ตามลำดับ ทั้งนี้ผลรวมค่าเฉลี่ยของ Zn ที่อยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (EXCH + CARB + Fe-Mn OX) คิดเป็นร้อยละ 77 เทียบกับร้อยละ 23 ของผลรวมค่าเฉลี่ยของ Zn ที่อยู่ในรูปที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (ORGB + RESD) โดยสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ศุภเกียรติ และเกรียงศักดิ์ [21] ที่ศึกษาการดูดซับ Zn ในดิน จากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสีย และสารละลาย Zn ในรูป Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ซึ่งพบว่าองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ส่วนใหญ่อยู่ในรูป CARB และรูป Fe-Mn OX เช่นเดียวกับ Rosazlin et al. [22] ที่พบว่ารูปแบบทางเคมีของ Zn ในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป Fe-Mn OX เช่นกัน

พิจารณาจากตารางที่ 4 แสดงค่า r ระหว่างสมบัติของดินและองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ในดินพบว่าสัดส่วนของ Zn ในรูป EXCH รูป CARB และ Fe-Mn- OX แสดงความสัมพันธ์กับสมบัติของดินหลายพารามิเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ ( $P\text{-value} < 0.01$ ) โดยค่า pH มีความสัมพันธ์ในเชิงลบสูงสุด ( $r = -0.817$ ) กับรูป EXCH ส่วน Zn ในรูป CARB ที่พบในปริมาณมากที่สุดในดินหลังการทดลองดูดซับมีความสัมพันธ์ในเชิงลบสูงสุด ( $r = -0.605$ ) กับค่า CEC ขณะที่ Zn ในรูป Fe-Mn- OX มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกสูงสุดกับค่า Fe-oxides ( $r = 0.777$ ) และ Mn-oxides ( $r = 0.677$ ) ในดินตามลำดับ โดยไม่พบความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างสมบัติดินและ Zn ในรูป ORGB และรูป RESD และเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบรวม  $F_1 + F_2 + F_3$  ซึ่งเป็นรูปแบบทางเคมีของ Zn ที่เคลื่อนย้ายได้และมีเฉลี่ยในสัดส่วนใหญ่ (77%) ในดินหลังจากการดูดซับ พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญเชิงลบกับค่า CEC ( $r = -0.527$ ) ในดินแสดงให้เห็นว่าค่า CEC ถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่อิทธิพลต่อรูปแบบทางเคมีของ Zn ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ในดิน

ตารางที่ 4 ค่า  $r$  ระหว่างสมบัติของดินและองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ในดิน

คุณสมบัติดิน	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ )					
	EXCH ( $F_1$ )	CARB ( $F_2$ )	Fe-Mn OX ( $F_3$ )	ORGB ( $F_4$ )	RESD ( $F_5$ )	$F_1 + F_2 + F_3$
pH	-0.817*	0.223	0.513*	-0.109	-0.290	0.267
OM	-0.401	-0.473	0.562*	0.201	0.381	-0.397
Clay	-0.205	-0.568*	0.535*	0.260	0.384	-0.439
CEC	-0.372	-0.605*	0.574*	0.315	0.473	-0.527*
CaCO <sub>3</sub>	-0.494*	-0.314	0.616*	0.057	0.212	-0.205
Fe-oxides	-0.603*	-0.461	0.777*	0.116	0.316	-0.316
Mn-oxides	-0.578*	-0.228	0.677*	0.099	0.040	-0.087
Total Zn	-0.325	-0.586*	0.611*	0.275	0.396	-0.452
Max.	-0.325	0.223	0.777	0.315	0.473	0.267
Min.	-0.817	-0.605	0.513	-0.109	-0.290	-0.527

\* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

#### 4. สรุปผลการศึกษา

1. ไอโซเทอร์มฟรอนดิลิซสามารถใช้อธิบายการดูดซับ Zn จากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียในดินทั้ง 27 ชุดดินได้อย่างดีที่ค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.958-0.995 โดยมีค่า  $K_f$  และ  $n$  อยู่ในช่วง 11.687-101.414 (มก./กก.)(ล./มก.)<sup>1/n</sup> และ 0.632-2.753 ตามลำดับ

2. ค่า  $K_f$  มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับคุณสมบัติดินอย่างน้อยสำคัญโดยมีค่า  $r$  จากมากไปน้อยคือค่า pH (0.697) > Fe-oxides (0.693) > CaCO<sub>3</sub> (0.612) > Mn-oxides (0.552) > CEC (0.525) > Clay (0.489) ตามลำดับ

3. องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Zn ในดินหลังจากการทดลองดูดซับส่วนใหญ่อยู่ในรูป CARB และรูป Fe-Mn OX โดยผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินกับสัดส่วนรูปแบบทางเคมีของ Zn แสดงให้เห็นว่าค่า CEC ถือเป็นสมบัติของดินที่สำคัญที่สุดที่อิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายของสังกะสีในดิน

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] S.R. Smith, "Agricultural recycling of sewage sludge and the environment", United Kingdom, CAB International, 1996.
- [2] M. B. McBride, "Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks?", *Advances in Environmental Research*. no. 8 (1), pp.5-19, 2002.
- [3] B.J. Alloway, "Heavy Metal in Soil", 2<sup>nd</sup> Edition. Blackie Academic and Professional, UK, 1995.
- [4] Bangkok Metropolitan Administration. "Feasibility Study on Agricultural Use and Land Application of Sewage and Night Soil Sludge for Bangkok Metropolitan", Bangkok, Thailand, 1998.
- [5] Soil and Plant Analysis Coil, Inc. "Soil Analysis: Handbook of Reference Method", CRC Press, 1999.
- [6] D.W. Nelson and L.E. Sommers, "Total carbon, organic carbon, and organic matter", In: A.L. Page et al. Ed, *Method of Soils Analysis*, part 2, 2<sup>nd</sup>, Agronomy, pp. 539-579, 1982.
- [7] J. M. Anderson, and J. S. I. Ingram, "Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Method", 2<sup>nd</sup> Edition, CAB International, UK, 1993.
- [8] D.L. Rowell, "Soil Science: Methods and Applications", Longman Singapore Publishers, pp. 32-35. 1996.
- [9] M.R. Carter and E.G. Gregorich, "Fe and Mn Oxide Analysis". In: *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2<sup>nd</sup> Edition, Canadian Society of Soil Science, pp. 311-312, 2007.
- [10] U.S. EPA. Method 1312, "Synthetic Precipitation Leaching Procedure", U.S. EPA: Washington, D.C, 1994.
- [11] A. Tessier, P. G. C. Cambell and M. Bisson, "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metal". *Analytical Chemistry*. no.51, pp. 844 - 851, 1979.
- [12] กรมพัฒนาที่ดิน "ลักษณะและสมบัติของชุดดินในภาคกลางของประเทศไทย" เอกสารวิชาการฉบับที่ 54, สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน, กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ. 2548.
- [13] F. Kurdi and H.E. Doner "Zinc and copper sorption and interaction in soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, no 48, pp.1040 - 1044, 1983.
- [14] N.J. Barrow, "The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture" *Aust. J. Soil Res.*, no.37, pp. 787-829, 1999.
- [15] M. Arias, M. T. Barral, J.C. Mejuto. "Enhancement of copper and cadmium adsorption on kaolin by the presence of humic acids". *Chemosphere*, no. 48, pp. 1081 - 1088, 2002.
- [16] Arias, M., Pérez-Novo, C., Osorio, F., López, E. and Sato, B. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer

- of acid soils. *J. Colloid Interface Sci*, no.288, pp. 21 - 29, 2005.
- [17] N. Cavallaro and M. B. McBride. "Zinc and copper sorption and fixation by an acid soil clay: Effect of selective dissolutions". *Soil Sci. Soc. Am.* no.48, pp. 1050 - 1054, 1984.
- [18] M. Imtiaz, B. J. Alloway., M. Aslam., M. Y. Memon., P. Khan., S. H. Siddiqui and S. K. Hussain Shah. Zinc sorption in selected soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, no.37, pp. 1675 - 1688, 2006.
- [19] M. Toribio and J. Romana, "Leaching of heavy metals (Cu, Ni and Zn) and organic matter after sewage sludge application to Mediterranean forest soils". *Science of the Total Environment*, no. 363 (1-3), pp.11 - 21, 2006.
- [20] H.B. Bradl, "Adsorption of heavy metals ions on soils and soil constituents". *J. Colloid Interf. Sci.*, no.277, pp. 1 - 18, 2004.
- [21] ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร และเกรียงศักดิ์จินตัง "การดูดซับและการกระจายตัวของสังกะสี ทองแดง และนิกเกิล ในดินจากแถบภาคกลางของประเทศไทย" *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*. 21 (1), 43 - 53. 2550.
- [22] A. Rosazlin., I. Che Fauziah, A.B. Rosenani and S. Zaayah. "Domestic sewage sludge application to an acid tropical soil: Part III. Fractionation study of heavy metals in sewage sludge and soil applied with sewage sludge" *Malays. J. Soil Sci.*, no.11, pp.81 - 97, 2007.



ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโทในสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และจบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา Water and Wastewater Engineering จาก Asian Institute of Technology ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร