



INFLUENCE OF SOIL PROPERTIES ON COPPER SORPTION AND  
DISTRIBUTION FROM SEWAGE SLUDGE LEACHATE IN SOILS

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

อิทธิพลของคุณสมบัติดินต่อการจับและการกระจายตัวของทองแดง  
จากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียชุมชนในดิน

INFLUENCE OF SOIL PROPERTIES ON COPPER SORPTION AND DISTRIBUTION  
FROM SEWAGE SLUDGE LEACHATE IN SOILS

ศุภเกียรติ ศรีพนมณานกร และ อุดุลย์เดช ปัดภัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

โทรศัพท์ : 0-2988-3655 E-mail: suppakiet@gmail.com

บทคัดย่อ

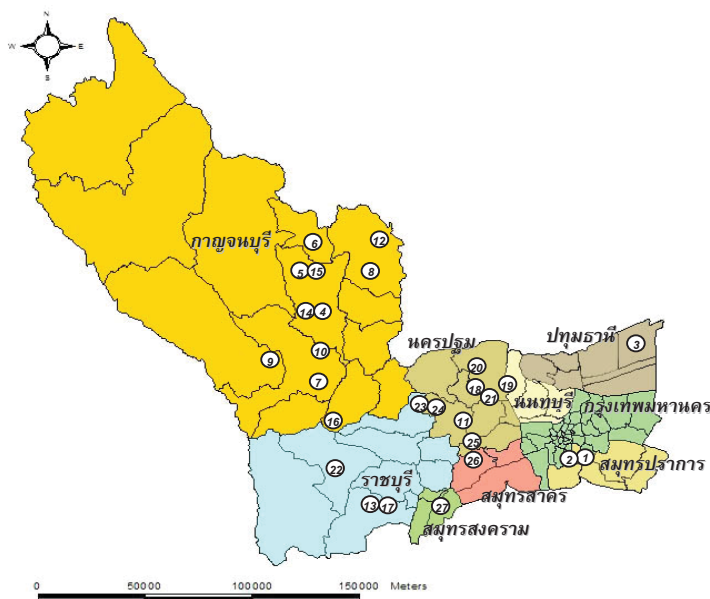
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของคุณสมบัติดินต่อการจับและการกระจายตัวของทองแดงจากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียชุมชนในดินจากพื้นที่กรุงเทพฯและจังหวัดใกล้เคียง ผลการศึกษาพบว่าไอโซเทอร์มของฟรอนดลิชและแลงเมียร์อธิบายกลไกของการจับทองแดงในดินได้ดี โดยมีค่า  $R^2$  อยู่ระหว่าง 0.972-0.999 และ 0.916-0.996 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์จากการจับจากไอโซเทอร์มฟรอนดลิชมีค่าในช่วง 24.47-67.97 (มก./กก.)(ล./มก.)<sup>1/n</sup> และมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับปริมาณเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต สารอินทรีย์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และอนุภาคดินเหนียวในดิน ขณะที่ค่าความสามารถในการจับทองแดงสูงสุดจากไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าในช่วง 54.05-217.39 มก./กก. องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของทองแดงในดินหลังจากการจับส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ และออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับสัดส่วนรูปแบบของทองแดงแสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและปริมาณอนุภาคดินเหนียวถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของทองแดงในดิน

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the influence of soil properties on Cu sorption and distribution from sewage sludge leachate in soils from areas within Bangkok and nearby provinces. The results showed that both the Freundlich and Langmuir isotherm can be well described the sorption phenomena of Cu in all soil types with the  $R^2$  of 0.972 to 0.999 and 0.916 to 0.996, respectively. The sorption coefficient from the Freundlich isotherm ranged from 24.47 to 67.97 (mg/kg)(L/mg)<sup>1/n</sup> and highly correlated with Fe-Mn-oxide, CaCO<sub>3</sub>, organic matter, CEC and clay content in soils. The maximum Cu sorption capacity from the Langmuir isotherm varied from 54.05 to 217.39 mg/kg. Results from the sequential extraction of the sorbed Cu in soils indicated that the predominance of Cu associated with the organically bound and Fe-Mn oxide bound fractions. Correlation analysis between soil properties and different Cu fractions indicated that cation exchange capacity and clay content were the most important soil properties contributing the relative distribution of Cu to different fractions.

## 1. บทนำ

การนำสลัดจ์น้ำเสียมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตร เป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการจัดการสลัดจ์ที่มีความเหมาะสม และลดค่าใช้จ่ายจากการนำสลัดจ์ไปกำจัด แต่การนำไปใช้ควรต้องคำนึงถึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับสลัดจ์น้ำเสีย โดยเฉพาะทองแดงที่มักพบได้ในปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหนักอื่นๆ การนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรโดยที่ไม่มีการควบคุมปริมาณ อาจก่อให้เกิดการสะสมในดินจนอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพดินและมีความเป็นพิษต่อพืชและจุลินทรีย์ในดินได้ [1-2] ทองแดงเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยาแร่และอินทรีย์สารในดินได้ง่าย ส่วนใหญ่มักถูกชะที่ผิวคอลลอยด์ดิน และเกิดคีเลชันกับสารอินทรีย์อยู่ในรูปแบบที่ค่อนข้างไม่เคลื่อนย้ายในดิน โดยปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการชะตลอดจนปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักบนผิวอนุภาคดินก็คือลักษณะสมบัติของดินที่เป็นตัวดูดซับเอง ดังนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลของคุณสมบัติของดินจากชุดดินที่เป็นตัวแทนจากพื้นที่ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพในการนำสลัดจ์น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพฯ ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร [3] ต่อความสามารถในการชะและรูปแบบการกระจายตัวของทองแดงที่มีผลโดยตรงต่อความเป็นพิษของทองแดงจากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียชุมชนในดินก็สามารถทำให้เข้าใจถึงอิทธิพลและความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติดินต่อกิจกรรมการชะรวมถึงรูปแบบทางเคมีของทองแดงในชุดดินดังกล่าวเพื่อใช้เป็นข้อมูลพิจารณาใช้สลัดจ์น้ำเสียเป็นวัสดุปรับปรุงดินในทางการเกษตรได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัยต่อไป



รายชื่อของชุดดิน:

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

รูปที่ 1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินจากชุดดินที่ใช้ศึกษาระบบแผนที่

## 2. วิธีการศึกษา

ตัวอย่างดินเก็บที่ความลึก 0-20 ซม.จากพื้นที่ครอบคลุม 9 จังหวัด ดังแสดงตำแหน่งระบบแผนที่ในรูปที่ 1 ส่วนตัวอย่างสลัดจ์น้ำเสียนำมาจากโรงบำบัดคุณภาพน้ำส่วนกลางหนองแขม กรุงเทพฯ ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นได้แก่ค่า pH [4] ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก [4] แคลเซียมและแมกนีเซียมที่ใช้ได้ [4] อินทรีย์วัตถุ [5] ร้อยละอนุภาคดินเหนียว [6] คาร์บอนเนต [7] เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ [8] การเตรียมน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียอ้างอิงตามวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure ของ US. EPA [9] โดยใช้สลัดจ์และสารละลายสังเคราะห์ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5.0 ด้วยสาร  $H_2SO_4$ :  $HNO_3$  (60:40) ในอัตราส่วน 1:20 เขย่า 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 0.5$  °C กรองและนำน้ำชะละลายส่วน

หนึ่งโพลดปริมาตรให้เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 75, 50, 25 และ 15 ด้วยอ่างระเหยที่อุณหภูมิ 60<sup>o</sup>ซ ปรับค่า pH ที่ระดับ 7.10 ± 0.01 ซึ่งได้ค่าความเข้มข้นของ Cu ในช่วง 0.694–6.276 มก./ล. ทดลองโดยใช้ดิน 1 กรัม และน้ำชะละลาย 20 มล. เขย่าเป็นเวลา 6 วัน (ได้จากการทดลองขั้นต้นเพื่อหาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเป็นระยะเวลา 14 วัน) ที่อุณหภูมิ 25±0.5<sup>o</sup>ซ ปั่นให้ตกตะกอนแล้วกรองวิเคราะห์ปริมาณ Cu ในน้ำ ส่วนดินนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu โดยวิธีสกัดตามลำดับของ Tessier et al. [10] ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable, EXCH) รูปคาร์บอเนต (Carbonate Bound, CARB) รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn Oxide Bound, Fe-Mn OXB) รูปสารอินทรีย์ (Organically Bound, ORGB) และรูปที่คงเหลือ (Residual, RESD) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ผลโดยใช้สมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) และไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ดังสมการ (1-2) ตามลำดับ วิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS

$$q_e = KC_e^n \quad (1)$$

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

โดยที่  $q_e$  คือปริมาณ Cu ที่ถูกจับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มก./กก.);  $C_e$  คือความเข้มข้น Cu ที่คงเหลือ (มก./ล.); K และ n คือค่าสัมประสิทธิ์สมการฟรุนดลิช; a และ b คือค่าสัมประสิทธิ์สมการแลงเมียร์

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติดินดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าตัวอย่างดินมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทรายจนถึงดินเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียวร้อยละ 7–67 โดยมีค่ามากที่สุดและน้อยสุดในชุดดินรังสิต (Rs) ค่า pH ในช่วง 3.46–8.07 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในช่วงร้อยละ 0.49–4.07 ค่า CEC ในช่วง 1–31 เซนติโมล/กก. โดยมีค่ามากที่สุดและน้อยสุดในชุดดินดำนินสะตก (Ds) ปริมาณ CaCO<sub>3</sub> ในช่วงร้อยละ 0.6–1.5 ปริมาณ Ca และ Mg ที่ใช้ได้ในช่วง 595–7,625 มก./กก. และ 133–2,585 มก./กก. ตามลำดับ ปริมาณออกไซด์ของ Fe และ Mn ในช่วง 22–411 มก./กก. และ 2–78 มก./กก. ตามลำดับ และมีปริมาณ Cu ทั้งหมดในดินอยู่ในช่วง 1.0–57.3 มก./กก. ส่วนตัวอย่างสลัดจ์น้ำเสียที่นำมาศึกษามีค่า pH เท่ากับ 6.28 ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ร้อยละ 28.68 และปริมาณ Cu ทั้งหมดเท่ากับ 3,775 มก./กก. Zn ทั้งหมดเท่ากับ 2,127 มก./กก. และ Ni ทั้งหมดเท่ากับ 380 มก./กก.

#### 3.2 ลักษณะการขับทองแดงในดิน

ผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอร์มดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าทั้งสมการของฟรุนดลิช และสมการของแลงเมียร์สามารถใช้อธิบายผลการขับทองแดงในดินจากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียได้อย่างดีโดยมีค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.972–0.999 และ 0.916–0.996 ตามลำดับ (P-value <0.01) มีค่า K และ n ของสมการฟรุนดลิชในช่วง 24.474–67.967 (มก./กก.) (ล./มก.)<sup>1/n</sup> และ 1.232–2.182 ตามลำดับ ส่วนค่า a และ b ของสมการแลงเมียร์มีค่าในช่วง 54.054–217.391 มก./กก. และ 0.324–2.383 ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่า r ระหว่างคุณสมบัติของดินกับค่า K ที่แสดงถึงศักยภาพในการขับทองแดงของดินมีค่าในช่วง 0.442–0.880 โดยให้ความสัมพันธ์เชิงบวกกับคุณสมบัติดินที่มีค่า r เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ Fe-oxides > CaCO<sub>3</sub> > Mn-oxides > OM > CEC > Clay > pH > Total Cu > Aval. Ca > Aval. Mg สำหรับค่า r ระหว่างคุณสมบัติของดินกับค่า n มีค่าในช่วง (–) 0.418–0.090 โดยมีความสัมพันธ์ในเชิงลบสูงที่สุดกับค่า pH ของดิน ในส่วนของสมการแลงเมียร์ ค่า r ระหว่างคุณสมบัติของดินกับค่า a ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสูงสุดพบว่ามีค่าใน

ช่วง 0.179-0.586 (ซึ่งต่ำกว่าค่า  $r$  ของค่า  $K$  จากสมการฟรุนดลิช) โดยให้ความสัมพันธ์เชิงบวกกับคุณสมบัติดินที่มีค่า  $r$  เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ  $\text{CaCO}_3 > \text{pH} > \text{CEC} > \text{Clay} > \text{Fe-oxides} > \text{Mn-oxides} > \text{Aval. Ca} > \text{OM} > \text{Aval. Mg} > \text{Total Cu}$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตัวอย่างดินจากชุดดินที่ใช้ในการศึกษา

ชุดดิน	การจำแนกดิน*	pH 1:1	OM %	Clay %	CEC cmol/kg	$\text{CaCO}_3$ %	Avail. Ca mg/kg	Avail. Mg mg/kg	Fe oxides mg/kg	Mn oxides mg/kg	Total Cu mg/kg
1. Bk	Vertic Endoaquepts	6.81	2.48	64	28	1.4	3,120	2,201	411	78	32.2
2. Cc	Vertic Endoaquepts	6.64	0.91	58	18	1.0	1,615	2,585	376	30	24.8
3. Rs	Sulfic Endoaquepts	4.14	1.89	67	20	1.0	1,805	1,331	183	23	25.9
4. Ng	Grossarenic Haplustalfs	6.33	0.88	8	3	0.8	1,030	133	205	49	11.4
5. Kt	Typic (Oxyaquic) Kandistults	5.36	0.82	13	3	0.6	865	393	103	8	3.6
6. Mr	Typic (Kandic) Paleustults	4.52	0.92	10	4	0.8	2005	295	81	11	5.6
7. Pc	Rhodic Kandistox.	8.07	2.94	57	18	1.5	4,420	788	381	56	17.8
8. Ct	Typic Haplustalfs	7.76	1.90	23	12	0.9	5,380	1,327	138	29	9.8
9. Hs	Lithic Haplustalfs	7.00	3.83	57	30	1.3	6,390	1,828	315	35	17.6
10. Png	Typic Haplustults	4.76	0.72	10	1	0.7	1,025	236	55	27	8.4
11. Np	Aeric Endoaqualfs	5.88	2.82	41	14	0.8	4,720	1,017	379	42	20.5
12. Mn	Aeric (Plinthic) Endoaqualfs.	6.32	0.49	43	16	1.0	4,640	401	66	13	3.6
13. Pth	(Aeric) Plinthic Palequults	6.86	0.64	19	5	0.9	845	311	90	27	1.0
14. Rn	(Aeric) Plinthic Palequults	7.13	1.18	12	6	0.9	2,660	170	238	61	11.8
15. Hg	Typic Haplustalfs	4.77	0.49	8	2	0.8	1,840	206	22	12	2.4
16. Yt	Oxyaquic (Ultic) Haplustalfs	6.42	1.44	7	4	0.8	1,855	345	209	18	6.8
17. Db	Aeric (Plinthic) Endoaqualfs	6.83	1.41	24	3	0.7	595	193	156	6	7.0
18. Sb	Vertic (Aeric) Endoaquepts	7.14	2.47	52	26	1.2	4,428	1203	369	28	19.1
19. Bn	Vertic Endoaquepts	3.53	1.34	33	18	0.9	4,515	1665	137	9	20.2
20. Se	Sulfic Endoaquepts	3.46	1.68	31	13	0.8	4,395	945	114	2	25.6
21. Ks	Typic Haplustalfs	7.23	1.20	25	12	1.2	2,925	435	301	35	11.9
22. Ty	Kanhaplic Haplustults	6.75	0.60	13	8	0.9	860	216	62	4	1.0
23. Kp	Oxyaquic (Ultic) Haplustalfs	6.85	4.07	41	26	1.1	2,010	1,022	380	63	57.3
24. Rb	Vertic (Aeric) Endoaquepts	6.69	2.60	55	21	1.2	7,625	445	323	54	23.4
25. Bl	Vertic Endoaquolls	6.55	2.11	42	30	1.1	6,715	1,303	289	39	14.9
26. Ds	Typic Haplaquolls	6.16	1.80	54	31	1.1	4,405	1,787	256	24	20.2
27. Sso	Aeric Tropaquepts	7.83	1.61	38	24	1.1	4,510	1,061	190	29	6.6
Max.		8.07	4.07	67	31	1.5	7,625	2,585	411	78	57.3
Min.		3.46	0.49	7	1	0.6	595	133	22	2	1.0

\* กรมพัฒนาที่ดิน [11]

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอร์ม

ชุดดิน	Freundlich			Langmuir			ชุดดิน	Freundlich			Langmuir		
	K	n	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>		K	n	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
1. Bk	65.449	1.701	0.995*	125.000	1.356	0.932*	16. Yt	41.429	2.042	0.982*	87.719	1.226	0.923*
2. Cc	50.385	1.577	0.988*	116.279	0.925	0.975*	17. Db	40.077	1.808	0.984*	90.909	1.019	0.916*
3. Rs	47.174	1.709	0.982*	108.696	0.968	0.937*	18. Sb	61.433	1.738	0.993*	119.048	1.355	0.938*
4. Ng	51.428	1.455	0.972*	142.859	0.654	0.937*	19. Bn	30.262	1.539	0.988*	97.087	0.534	0.959*
5. Kt	27.021	2.056	0.994*	60.241	1.071	0.986*	20. Se	27.391	1.878	0.987*	72.464	0.754	0.946*
6. Mr	24.969	2.182	0.988*	54.054	1.149	0.989*	21. Ks	49.568	1.648	0.989*	112.360	0.978	0.961*
7. Pc	67.967	1.473	0.992*	147.059	0.958	0.961*	22. Ty	34.570	1.627	0.989*	95.238	0.695	0.955*
8. Ct	42.082	1.836	0.991*	91.743	1.112	0.939*	23. Kp	67.702	1.748	0.989*	114.943	1.740	0.982*
9. Hs	66.742	1.687	0.999*	121.951	1.464	0.953*	24. Rb	61.546	1.845	0.992*	107.527	1.755	0.954*
10. Png	28.432	1.923	0.992*	69.444	0.883	0.952*	25. Bl	57.836	1.757	0.992*	114.943	1.299	0.946*
11. Np	55.603	2.055	0.976*	89.286	2.383	0.996*	26. Ds	58.492	1.664	0.990*	117.647	1.214	0.970*
12. Mn	43.752	1.352	0.979*	147.059	0.472	0.922*	27. Sso	48.395	1.232	0.988*	217.391	0.324	0.953*
13. Pth	43.411	1.268	0.976*	62.112	0.425	0.938*	Max.	67.967	2.182	0.999	217.931	2.383	0.996
14. Rn	50.234	1.564	0.989*	119.048	0.875	0.969*	Min.	24.474	1.232	0.972	54.054	0.324	0.916
15. Hg	24.474	1.941	0.982*	62.112	0.805	0.926*	Avg.	46.906	1.725	0.987	106.082	1.052	0.952

\*\* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (2-tailed)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)

พารามิเตอร์	Freundlich		Langmuir	
	K	n	a	b
pH	0.660*	-0.418	0.552*	0.119
OM	0.764*	0.090	0.284	0.698*
Clay	0.707*	-0.256	0.466	0.336
CEC	0.736*	-0.263	0.544*	0.340
CaCO <sub>3</sub>	0.819*	-0.407	0.586*	0.211
Aval. Ca	0.470*	-0.063	0.359	0.350
Aval. Mg	0.442	-0.138	0.283	0.223
Fe-oxides	0.880*	-0.073	0.429	0.613*
Mn-oxides	0.786*	-0.212	0.422	0.424
Total Cu	0.568*	0.044	0.179	0.513*

\* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (2-tailed)

สำหรับค่า  $r$  ระหว่างคุณสมบัติของดินกับค่า  $b$  มีค่าในช่วง 0.119-0.698 เมื่อพิจารณาถึงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับค่า  $K$  และ  $a$  ที่แสดงถึงศักยภาพการจับทองแดงในดินที่มีค่า  $r > 0.7$  คุณสมบัติของดินที่ถือว่ามีส่วนสัมพันธ์กับความสามารถในการจับทองแดงในได้แก่ Fe-oxides, CaCO<sub>3</sub>, Mn-oxides, OM, CEC และ Clay ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมารายงานเกี่ยวกับคุณสมบัติของดินที่มีต่อการจับทองแดงในดินที่พบว่าเหล็กออกไซด์มีผลต่อการจับ

ทองแดงในดินสูงที่สุดรองลงมาคือปริมาณอินทรีย์วัตถุ และการจับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของทองแดง [12] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต [13] และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน [14] มีอิทธิพลอย่างสูงต่อการจับทองแดงในดิน ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยโปรแกรม SPSS ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบขั้นตอนเพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สุด ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์  $K$  และ  $a$  ดังแสดงในสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยพบว่าตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสมการทำนายค่า  $K$  ของสมการฟรอนดลิช ได้แก่ ปริมาณ Fe-oxides, pH, CEC, Mn-oxides, Aval. Mg และ Clay โดยมีค่า  $R^2 = 0.954$  ขณะที่สมการทำนายค่า  $a$  ของสมการแลงเมียร์ให้ค่า  $R^2$  ที่น้อยกว่า = 0.685 โดยมีปริมาณ OM,  $\text{CaCO}_3$  และ Fe-oxides เป็นตัวแปรอิสระ

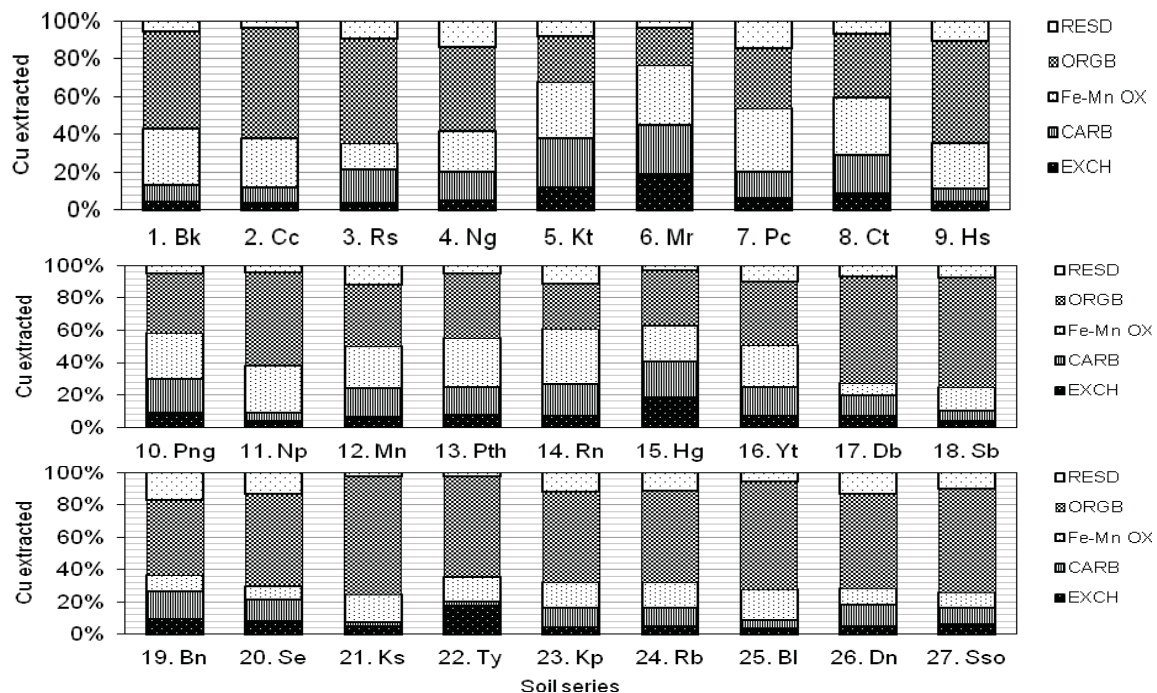
$$K = 8.085 + 0.038(\text{Fe-oxides}) + 2.844(\text{pH}) + 0.482(\text{CEC}) + 0.168(\text{Mn-oxides}) - 0.005(\text{Aval.Mg}) + 0.157(\text{Clay})$$

$$R^2 = 0.954 \quad (3)$$

$$a = 1.321 + 0.290(\text{OM}) - 1.252(\text{CaCO}_3) + 0.002 (\text{Fe-oxides}) \quad R^2 = 0.685 \quad (4)$$

### 3.3 องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของทองแดงในดินหลังจากการจับ

สัดส่วนองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu ในดินหลังทดลองการจับแล้วแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu ในดิน



พบว่ามีส่วนหลักในรูป ORGB เช่นเดียวกับผลการศึกษาอื่น ๆ ที่พบว่า Cu นั้นมีความชอบที่จะรวมตัวอยู่กับสารอินทรีย์ในดิน [15-16] สัดส่วนของ Cu โดยรวมเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ (ORGB) > (Fe-Mn OX) > (CARB) > (RESD) > (EXCH) ประกอบด้วย Cu ในรูป ORGB ในอัตราร้อยละ 49.2±14.5 (ช่วง 12.1-120 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินแมร์ริ(Mr) และค่าสูงสุดในชุดดินสระบุรี (Sb) รองลงมาคือ รูป Fe-Mn OX ในอัตราร้อยละ 21.5±8.5 (ช่วง 9.2-45.8 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินเดิมบาง (Db) และค่าสูงสุดในชุดดินปากช่อง (Pc) รูป CARB ในอัตราร้อยละ 13.4±6.8 (ช่วง 5.8-21.5 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินนครปฐม (Np) และค่าสูงสุดในชุดดินรังสิต (Rs) รูป RESD ในอัตราร้อยละ 8.7±4.4 (ช่วง 1.6-27.6 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินท่าทราย (Ty) และค่าสูงสุดในชุดดินดำเนินสะดวก (Ds) และรูป EXCH ในอัตราร้อยละ 7.1±4.3 (ช่วง 4.2-11.8 มก./กก.) มีค่าต่ำสุดในชุดดินรังสิต (Rs) และค่าสูงสุดในชุดดินบางเขน (Bn) ตามลำดับ ทั้งนี้ผลรวมค่าเฉลี่ยของ Cu ที่อยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (EXCH + CARB + Fe - Mn OX) คิดเป็นร้อยละ 42 เทียบกับร้อยละ 58 ของผลรวมค่าเฉลี่ยของ Cu ที่อยู่ในรูปที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (ORGB + RESD)

พิจารณาจากตารางที่ 4 แสดงค่า  $r$  ระหว่างคุณสมบัติของดินและองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu ในดินพบว่าสัดส่วนของ Cu เฉพาะในรูป EXCH รูป CARB และ รูป ORGB มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของดินอย่างมีนัยสำคัญ ( $P$ -value < 0.01) โดยสัดส่วน Cu ในรูป EXCH และรูป CARB มีความสัมพันธ์ในเชิงลบสูงสุดกับ Fe-oxides ในดินโดยมีค่า  $r = -0.723^*$  และ  $-0.728^*$  ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์ในเชิงลบเช่นกัน ได้แก่ Clay, CEC, Mn- oxides,  $\text{CaCO}_3$ , OM และ Total Cu ในส่วนสัดส่วน Cu ในรูป ORGB ที่เป็นรูปแบบที่พบในปริมาณมากที่สุดในดินนั้น พบว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่า CEC และปริมาณอนุภาคดินเหนียวโดยมีค่า  $r = -0.589^*$  และ  $-0.510^*$  ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่า CEC และปริมาณอนุภาคดินเหนียวแสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทั้ง 3 องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu ส่วนใหญ่ในดินซึ่งอาจถือเป็นคุณสมบัติของดินที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของ Cu ในดิน

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) ระหว่างคุณสมบัติของดินและองค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu

พารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ )				
	EXCH	CARB	Fe-Mn OX	ORGB	RESD
pH	-0.415	-0.205	0.189	0.144	-0.133
OM	-0.529*	-0.622*	-0.076	0.387	0.317
Clay	-0.659*	-0.625*	-0.198	0.510*	0.257
CEC	-0.603*	-0.710*	-0.320	0.589*	0.304
$\text{CaCO}_3$	-0.533*	-0.529*	0.003	0.340	0.185
Aval. Ca	-0.369	-0.494*	-0.128	0.304	0.333
Aval. Mg	-0.480	-0.551*	-0.114	0.404	0.153
Fe-oxides	-0.723*	-0.728*	0.047	0.476	0.127
Mn- oxides	-0.551*	-0.356	0.353	0.082	0.127
Total Cu	-0.519*	-0.643*	-0.193	0.444	0.362

\* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (2-tailed)

#### 4. สรุปผลการศึกษา

1. สามารถใช้ทั้งไอโซเทอร์มฟรุนดลิช และแลงเมียร์ อธิบายการจับ Cu จากน้ำชะละลายสลัดจ์น้ำเสียในดินได้ดีโดยมีค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.972 - 0.999 และ 0.916 - 0.996 ตามลำดับ

2. ค่า K จากไอโซเทอร์มฟรุนดลิช มีค่าในช่วง 24.47-67.97 (มก./กก.)(ล./มก.)<sup>1/n</sup> และมีความสัมพันธ์อย่างสูง

ในเชิงบวกกับ Fe-oxides,  $\text{CaCO}_3$ , Mn-oxides, OM, CEC และ Clay ขณะที่ค่า  $a$  จากไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าในช่วง 54.05-217.39 มก./กก.

3. องค์ประกอบรูปแบบทางเคมีของ Cu ในดินหลังการจับส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ และรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส โดยผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับสัดส่วนรูปแบบของ Cu แสดงให้เห็นว่าค่า CEC และปริมาณดินเหนียวถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของทองแดงในดิน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] McBride, M. B. (2002). Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks?. *Advances in Environmental Research*. No.8 (1), 5-19.
- [2] Alloway, B.J. Heavy Metal in Soil. 2<sup>nd</sup> Ed. Blackie Academic and Professional, UK, 1995.
- [3] Bangkok Metropolitan Administration. Feasibility Study on Agricultural Use and Land Application of Sewage and Night Soil Sludge for Bangkok Metropolitan, Bangkok, Thailand, 1998.
- [4] Soil and Plant Analysis Coil, Inc. Soil Analysis: Handbook of Reference Method, CRC Press, 1999.
- [5] Nelson, D.W. and Sommers L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A.L. Page et al. Ed, Method of Soils Analysis, part 2, 2nd, Agronomy, 1982, pp. 539-579.
- [6] Anderson, J. M. and Ingram, J. S. I. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Method, 2nd Ed, CAB International, UK, 1993.
- [7] Rowell, D.L. Soil Science: Methods and Applications. Longman Singapore Publishers, 1996, pp. 32-35.
- [8] Carter, M.R. and E.G. Gregorich. Fe and Mn Oxide Analysis. In: Soil Sampling and Methods of Analysis, 2nd Ed, Canadian Society of Soil Science, 2007, pp. 311-312.
- [9] U.S. EPA. Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure. U.S. EPA: Washington, D.C, 1994.
- [10] Tessier, A., Cambell, P. G. C. and Bission, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metal. *Analytical Chemistry*. No.51, 844-851.
- [11] กรมพัฒนาที่ดิน 2548. “ลักษณะและสมบัติของชุดดินในภาคกลางของประเทศไทย” เอกสารวิชาการฉบับที่ 54, สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน, กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.
- [12] Bradl, H.B. (2004). Adsorption of heavy metals ions on soils and soils constituents. *J. Colloid Interf. Sci.* No.277, 1-18.
- [13] Natalya Irhaa, Eiliv Steinnesb, Uuve Kirsoa, and Valter Petersell. (2009). Mobility of Cd, Pb, Cu, and Cr in some Estonian soil types. *Estonian J. Earth Sciences*. No.58 (3), 209-214.
- [14] Buchter, B. et al. (1989). Correlation of freundlich  $k_d$  and  $n$  retention parameters with soils and elements. *Soil Sci.* No.148 (5), 370-379.
- [15] Rosazlin, A., I. Che Fauziah, A.B. Rosenani and S. Zauyah. (2007). 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, 81-97.
- [16] ศุภเกียรติ ศรีพนมณกร และเกรียงศักดิ์จินตัง. (2550). การดูดซับและการกระจายตัวของสังกะสี ทองแดง และนิกเกิล ในดินจากแถบภาคกลางของประเทศไทย. *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*. 21 (1), 43-53.