

บทที่ 3

ผลการทดลองและการอภิปราย

จากการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินที่จะนำมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของสารหนูจากดินสู่อากาศในรูปของฝุ่นละอองโดยอาศัยหลักการดูดซับและการตกตะกอนในชั้นของวัสดุคลุมดินเพื่อป้องกันไม่ให้สารหนูเคลื่อนที่มาอยู่ผิวดิน จึงได้ทดลองเพื่อหาชนิดของวัสดุคลุมดินและอัตราส่วนการผสมระหว่างวัสดุคลุมดินกับดินที่ปนเปื้อนสารหนูที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบกะและการทดลองแบบต่อเนื่อง ผลการทดลองเป็นดังนี้คือ

3.1 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

ได้เก็บตัวอย่างดินเหมืองแร่ที่มีการปนเปื้อนของสารหนูมาจากบริเวณโรงแต่งแร่เก่าตรงข้ามศาลเจ้า 108 อำเภออ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช วัสดุที่นำมาใช้คลุมดินคือ หินปูนฝุ่น ปูนขาว นำมาจากอำเภออ่อนพิบูลย์ และ ดินลูกรังจากบ่อกำนันขวด อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินแบบ composite samples จากผิวดินจนถึงที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร ส่วนถ้ำลอยเก็บมาจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ตและผลการศึกษาสมบัติของดินและวัสดุคลุมดิน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สมบัติของดินเหมืองแร่และวัสดุคลุมดิน

สมบัติที่วิเคราะห์	ดินเหมืองแร่	ดินลูกรัง	หินปูนฝุ่น	ปูนขาว	ถ้ำลอย
pH (Soil:H ₂ O=1:5)	7.6±0.03	5.02±0.06	8.98±0.02	12.58±0.02	12.1±0.02
Electric Conductivity (EC) (µs/cm) (Soil:H ₂ O=1:5)	74.23±3.26	19.87±0.53	156.47±0.49	9,850±179.69	38,366±880.66
Organic Matter (% by weight)	0.56±0.01	0.58±0.01	4.14±0.06	18.27±0.15	4.99±0.11
Total As (mg/kg)	78±0.23	21±0.07	13±0.03	17±0.04	13±0.12
Total Fe (mg/kg)	3,504±8.73	15,391±80.98	20±1.81	1±0.24	3,871±11.00
Total Ca (mg/kg)	278±2.47	52±0.62	101,135±79.60	112,542±79.05	75,804±73.00

หมายเหตุ ± คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 3-1 ตัวอย่างของดินเหมืองแร่ที่นำมาศึกษา มีปริมาณทั้งหมดของสารหนู และเหล็กสูงมาก เนื่องจากเป็นตัวอย่างดินเหมืองแร่ที่นำมาจากบริเวณ โรงแต่งแร่เก่าของบริษัทแห่งหนึ่ง ที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา โดยสารหนูที่พบอยู่เป็นผลจากการสลายตัวของแร่ อาร์เซนไพไรต์ ตัวอย่างดินนี้จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของดินเหมืองแร่ที่อาจมีสารหนูปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูงมากในอำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมาได้ และเป็นที่น่าสนใจว่าดินเหมืองแร่นี้มีค่าพีเอช เท่ากับ 7.60 ซึ่งไม่เป็นกรดตามที่คาดว่าจะพบอยู่ในดินเหมืองแร่ทั่วไปที่มีการปนเปื้อนของแร่ อาร์เซนไพไรต์ และการที่พีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากในภาคใต้มีอากาศร้อนชื้นและฝนตกชุก เมื่อดินเหมืองแร่ถูกน้ำฝนชะล้างเป็นระยะเวลาานหลายๆ ปี ไฮโดรเจนไอออน ที่อยู่ในดินเป็นจำนวนมากจะถูกชะล้างออกไปจากหน้าตัดดินทำให้พีเอชของดินสูงขึ้น นอกจากนี้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่เพิ่มเติม พบว่าดินปนเปื้อนสารหนูมีองค์ประกอบของแร่พวก Quartz (SiO_2) และ Ilmenite,syn (FeTiO_3) รวมถึงมีแร่ธาตุ Ti 24.67%, Fe 24.24%, Mn 5.98%, Si 4.49%, Al 1.54%, K 0.28%, Ca 0.26%, W 0.19%, Nb 0.17%, Sn 0.14%, Ta 0.14%, Y 0.14%, Zr 0.12%, Zn 0.10%, P 0.10% และธาตุปริมาณต่ำที่พบมี Na Mg S Cr Cu As Sb Ce Pb Th และ U

สำหรับดินลูกรังมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.02 โดยเมื่อใส่ลงในดินเหมืองแร่ จะทำให้ดินเหมืองแร่มีพีเอชลดลง ทำให้คุณสมบัติของดินมีความเหมาะสมสำหรับปลูกพืชคลุมดิน นอกจากนี้ดินลูกรังยังมีองค์ประกอบของแร่พวก Quartz (SiO_2) และKaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) รวมถึงมีแร่ธาตุ Si 23.21%, Fe 12.16%, Al 11.83%, K 1.24%, Ti 0.97%, Zr 0.09%, Sr 0.02%, และธาตุปริมาณต่ำที่พบมี Mg P Ca Cr Zn As Rb Nb และBa และจากการที่ดินลูกรังมีค่าการนำไฟฟ้า (EC) ต่ำ เมื่อใส่ลงไปดินดินเหมืองแร่จะไม่ไปเพิ่มความเค็มให้กับดิน นอกจากนั้นปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีอยู่มากในดินลูกรัง จะทำให้สามารถดูดซับสารหนูที่ปนเปื้อนในดินได้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ของสารหนูสู่ผิวดินได้

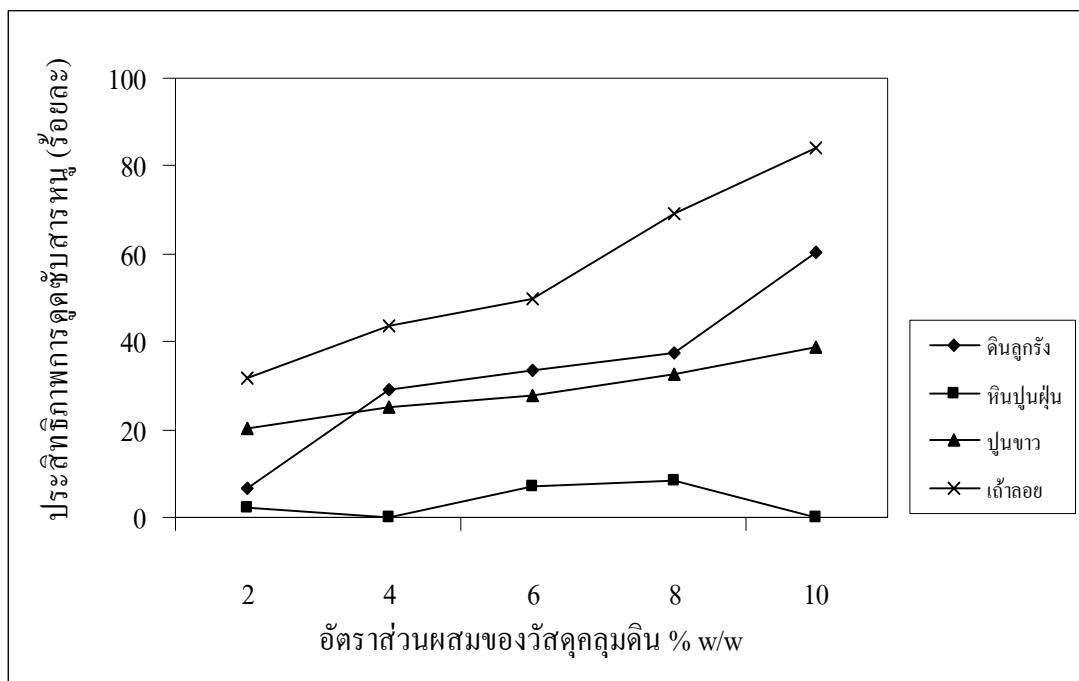
สำหรับหินปูนฝุ่น ปูนขาวและเถ้าลอย นอกจากจะมีปริมาณแคลเซียมอยู่สูงมาก ยังมีพีเอชและค่าความนำไฟฟ้าสูง เมื่อใส่ลงในดินเหมืองแร่จะมีผลทำให้ดินเหมืองแร่มีพีเอชสูงมาก และจะไปเพิ่มความเค็มให้แก่ดินเหมืองแร่ ซึ่งมีผลทำให้ดินมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการปลูกพืชคลุมดิน ซึ่งพืชคลุมดินจะช่วยป้องกันการฟุ้งกระจายของดินที่ปนเปื้อนสารหนูสู่อากาศ

3.2 การทดลองแบบกะ (batch adsorption test)

3.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยวัสดุคลุมดิน

ผลการศึกษาวัสดุคลุมดินต่อดินเหมืองแร่พบว่าประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินที่สามารถดูดซับสารหนูได้มากที่สุดที่ 10 % w/w จากมากไปน้อย ได้แก่ เถ้าลอย, ดินลูกรัง, ปูนขาว และ หินปูนฝุ่น โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนुर้อยละ 84, 60, 38 และ 1 ตามลำดับ

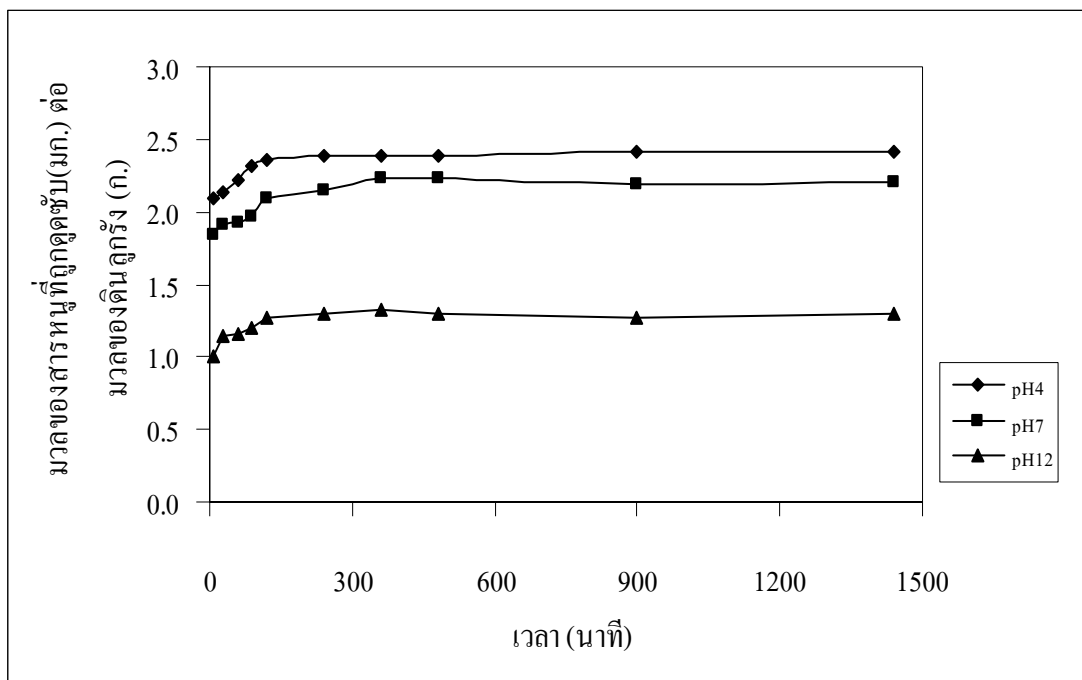
ดั่งภาพประกอบที่ 3-1 ซึ่งแสดงว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูสูงสุดและหินปูนฝุ่นมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูน้อยที่สุด (ตารางภาคผนวก ก-2 และ ก-3)



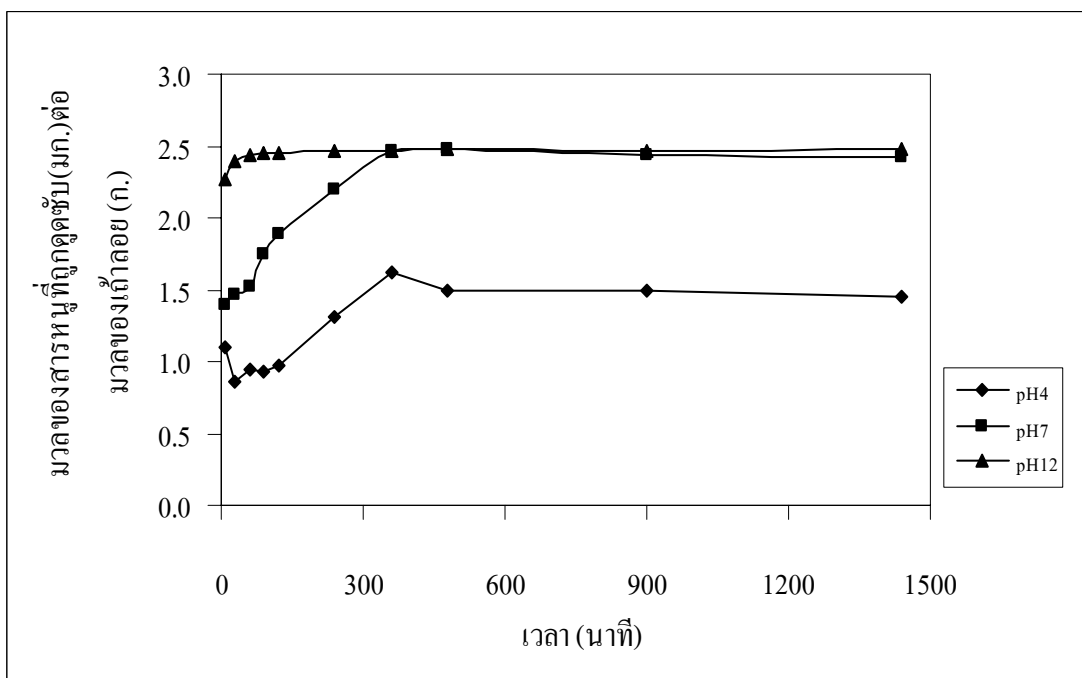
ภาพประกอบที่ 3-1 ประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูโดยวัสดุคลุมดินทั้ง 4 ชนิด

3.2.2 การศึกษาระยะเวลาสัมผัสเพื่อเข้าสู่สถานะสมดุลของการดูดซับสารหนู

ผลการทดลองได้แสดงไว้ในกราฟแสดงระยะเวลาที่เข้าสู่สถานะสมดุลของการดูดซับสารหนูที่ถูกดูดซับด้วยดินลูกรัง และเถ้าลอย (ภาพประกอบที่ 3-2 และ 3-3) โดยพบว่าที่พีเอช 4 ดินลูกรังจะเข้าสู่สถานะสมดุลภายในเวลาประมาณ 240 นาที และที่พีเอช 7 และ 12 จะใช้เวลาประมาณ 360 นาที ส่วนเถ้าลอยที่พีเอช 12 จะเริ่มเข้าสู่สถานะสมดุลภายในเวลาประมาณ 120 นาที และที่ พีเอช 4 และ 7 จะใช้เวลาประมาณ 360 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับของสารหนู โดยพบว่าที่พีเอชต่ำ ดินลูกรังจะสามารถดูดซับสารหนูได้ดีกว่าเถ้าลอย เนื่องจาก $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ในดินลูกรังจะทำปฏิกิริยาร่วมกันกับสารหนูที่อยู่ในรูป HAsO_4^{2-} และเกิดการตกตะกอนได้ $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (scorodite) (Wilson and Hawkins, 1987) แต่ที่พีเอชสูง เถ้าลอยจะสามารถดูดซับสารหนูได้ดีกว่าดินลูกรัง เนื่องจากในเถ้าลอยจะมี $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถดูดซับหรือรวมตัวกับสารหนูแล้วเกิดการตกตะกอนและการตกตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ Ca-As-O เช่น $\text{Ca}_4(\text{OH})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 3\frac{2}{3} \text{H}_2\text{O}$ (Moon *et al.*, 2004 และ Nishimura *et al.*, 1985)



ภาพประกอบที่ 3-2 ระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของสารหนูที่ถูกดูดซับด้วยดินลูกรัง



ภาพประกอบที่ 3-3 ระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของสารหนูที่ถูกดูดซับด้วยเถ้าลอย

3.2.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารหนูบนวัสดุคลุมดิน

จากตารางที่ 3-2 เมื่อพิจารณาผลการศึกษายำแนกตามสภาวะพีเอชที่ทดลองพบว่า ที่พีเอช 7 และ 4 ความสามารถในการดูดซับสารหนูของดินลูกรังจะสูงที่สุด เนื่องจากที่พีเอช 4 ถึง 7 มีการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีกว่าพีเอชอื่น เพราะดินที่ใช้ศึกษานั้นเป็นดินธรรมชาติ ซึ่งมีค่า pH_{pzc} อยู่ที่พีเอชประมาณ 4 ถึง 5 ดังนั้นที่พีเอชน้อยกว่า 4 ประจุรวมบนผิวหน้าดินจะเป็นประจุบวก ทำให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น ในขณะที่พีเอชที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ประจุรวมที่ผิวหน้าดินจะเป็นลบมากขึ้น ดังนั้นการดูดซับของสารหนูจึงเกิดได้น้อยลง (ชนัพร และคณะ, 2548; Sabine, 2002 และ Mopoung and Thavornytikarn, 2004) และจากค่า R^2 (linear regression) ของ isotherm การดูดซับทั้งสองจะพบว่าสมการของการดูดซับมีแนวโน้มเป็นแบบ Langmuir มากกว่า Freundlich แต่ทั้งนี้ค่า R^2 มีค่าสูงใกล้เคียงกันมากทั้งสองสมการจึงถือว่าทั้งสองสมการก็มีความเหมาะสมที่จะนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของดินลูกรังกับความสามารถในการกำจัดสารหนูภายใต้สภาวะที่ทำการทดลองได้

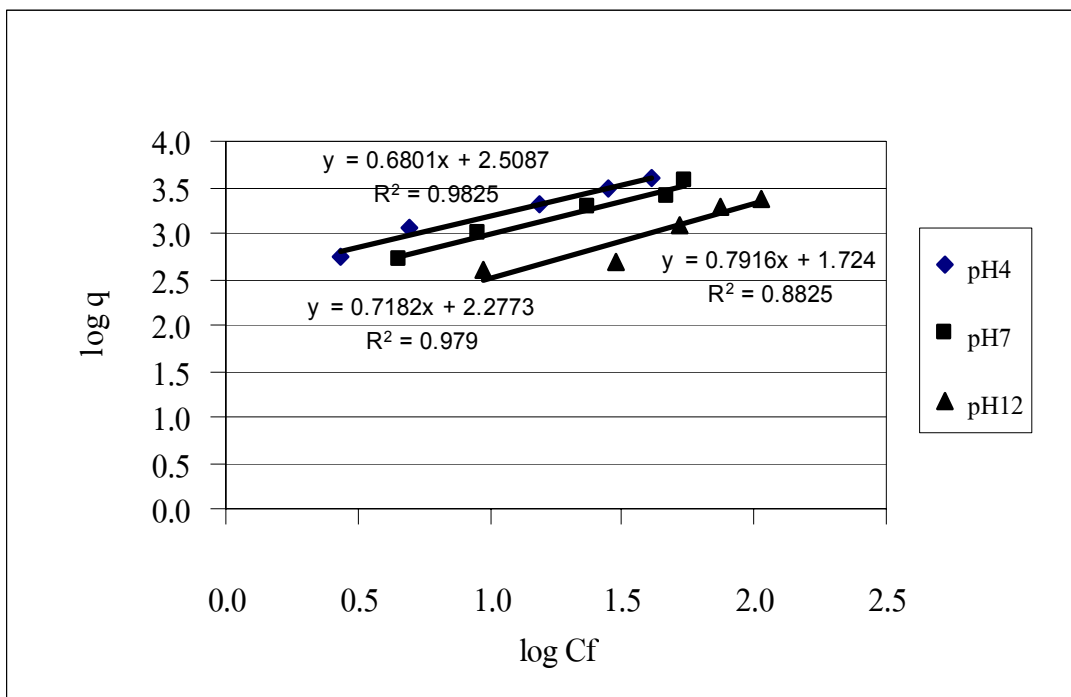
จากตารางที่ 3-3 พบว่า ที่พีเอช 12 และ 7 ความสามารถในการดูดซับสารหนูของถ้ำลอยจะสูงที่สุดเนื่องจากในถ้ำลอยจะมีองค์ประกอบของ $Ca(OH)_2$ มากและจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง (Ricou *et al.*, 1999) ประกอบกับสารหนูที่ละลายอยู่ในน้ำในสภาวะที่มีออกซิเจนและมีพีเอชสูงจะอยู่ในรูปของ AsO_4^{3-} จึงสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกันแล้วตกตะกอนได้ $Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 3\frac{2}{3} H_2O$ (Ferguson and Gavis, 1972 และ Nishimura *et al.*, 1985) และจากค่า R^2 (linear regression) ของ isotherm การดูดซับทั้งสองจะพบว่าสมการของการดูดซับที่พีเอช 12 มีแนวโน้มเป็นแบบ Freundlich แต่ขณะเดียวกันที่พีเอช 7 จะพบว่าสมการของการดูดซับมีแนวโน้มเป็นแบบ Langmuir

ตารางที่ 3-2 ไอโซเทอมของการดูดซับสารหนูตามสมการ Freundlich

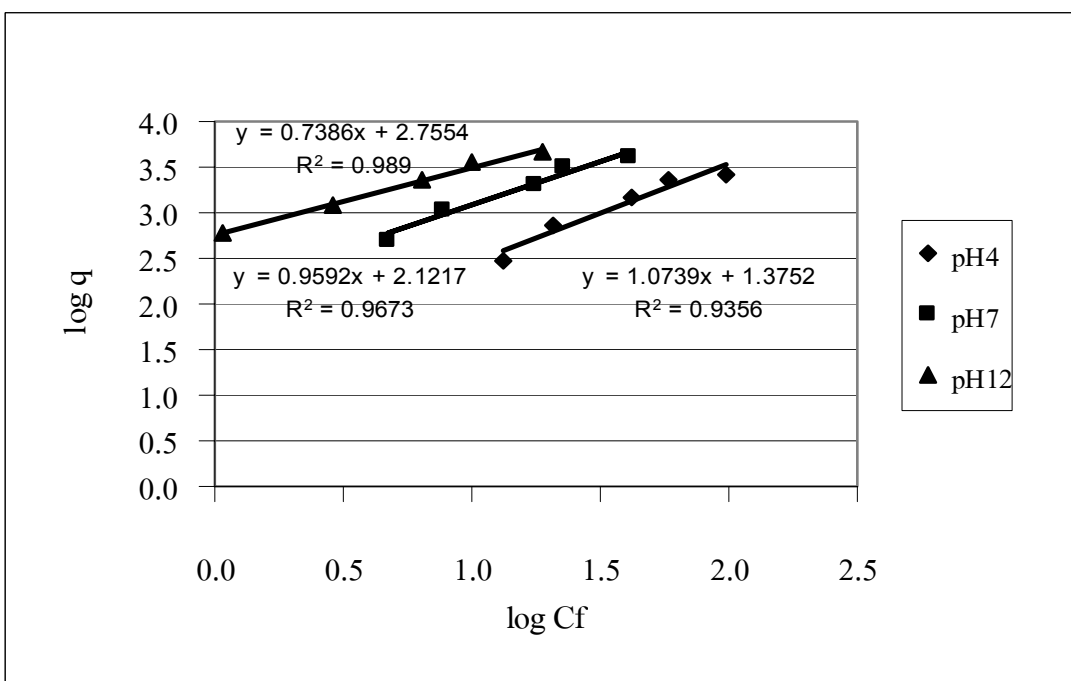
ดินลูกรัง	$q = KC_f^{1/n}$	ความชัน	n	K	R^2
pH 4	$q = 322.62C_f^{0.6801}$	0.6801	1.47	322.62	0.983
pH 7	$q = 189.37C_f^{0.7182}$	0.7182	1.39	189.37	0.979
pH 12	$q = 52.97C_f^{0.7916}$	0.7916	1.26	52.97	0.883
ถ้ำลอย					
pH 4	$q = 23.27C_f^{1.0739}$	1.0739	0.93	23.27	0.936
pH 7	$q = 132.34C_f^{0.9592}$	0.9592	1.04	132.34	0.967
pH 12	$q = 569.38C_f^{0.7386}$	0.7386	1.35	569.38	0.989

ตารางที่ 3-3 ไอโซเทอมของการดูดซับสารหนูตามสมการ Langmuir

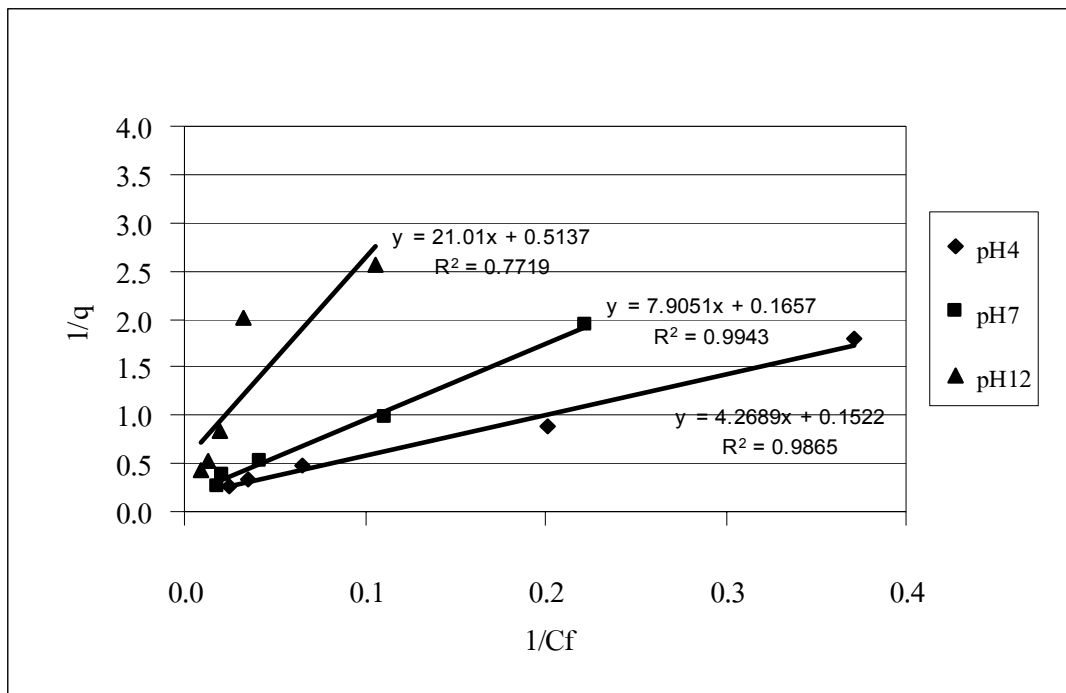
ดินลูกรัง	$1/q = (1/C_p)(K_A * q_m) + (1/q_m)$	ความชัน	q_m	K_A	R^2
pH 4	$1/q = (1/C_p)4.2689 + 0.1522$	4.2689	6.57	0.04	0.987
pH 7	$1/q = (1/C_p)7.9051 + 0.1657$	7.9051	6.04	0.02	0.994
pH 12	$1/q = (1/C_p)4.2689 + 0.1522$	4.2689	1.95	0.02	0.772
ถ้ำลอย					
pH 4	$1/q = (1/C_p)44.618 - 0.3192$	44.618	-3.13	-0.01	0.936
pH 7	$1/q = (1/C_p)9.0709 - 0.055$	9.0709	-18.18	-0.01	0.977
pH 12	$1/q = (1/C_p)1.6508 + 0.1672$	1.6508	5.98	0.10	0.988



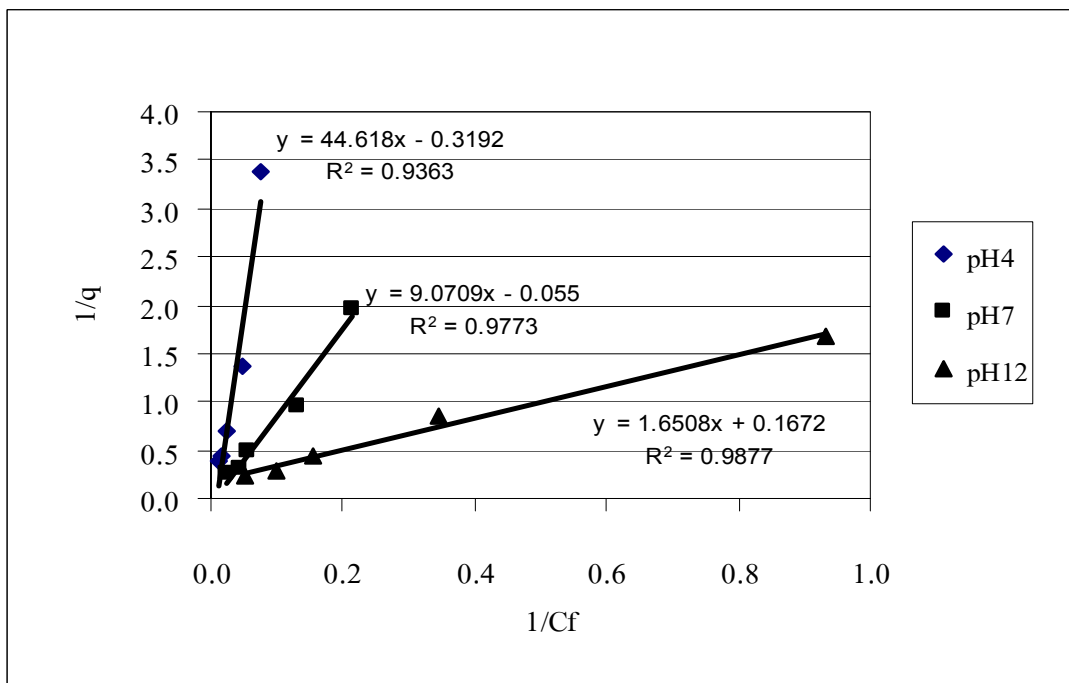
ภาพประกอบที่ 3-4 กราฟ Freundlich Isotherm ของดินลูกรัง



ภาพประกอบที่ 3-5 กราฟ Freundlich Isotherm ของเปลือกไข่



ภาพประกอบที่ 3-6 กราฟ Langmuir Isotherm ของดินลูกรัง



ภาพประกอบที่ 3-7 กราฟ Langmuir Isotherm ของน้ำ

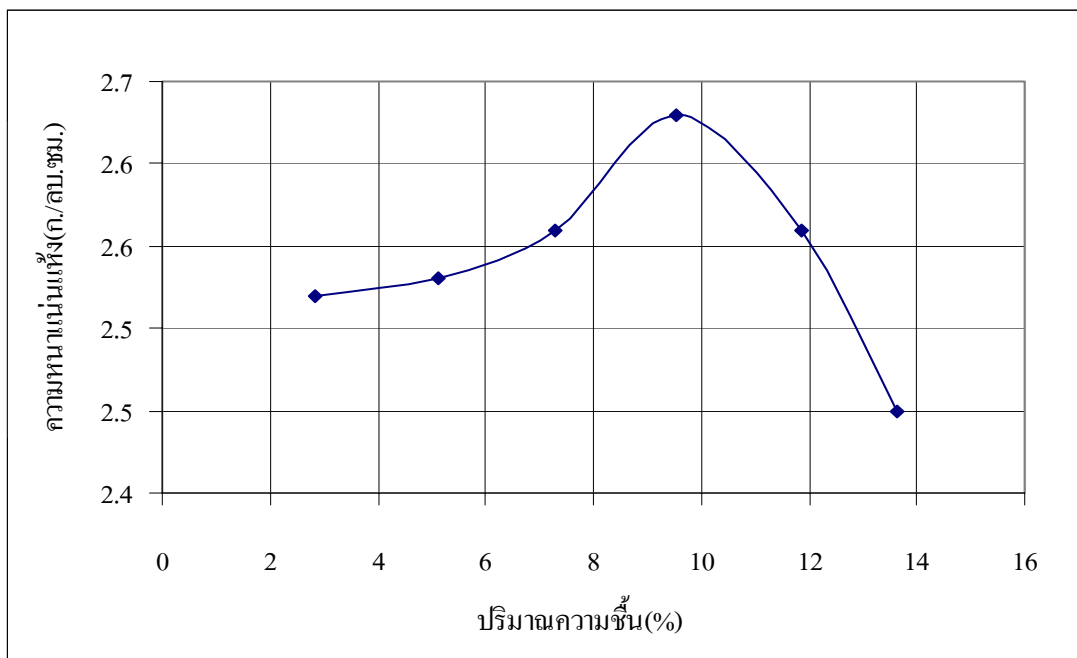
3.3 การทดลองแบบต่อเนื่อง(column leaching test)

3.3.1 การบดอัดดิน

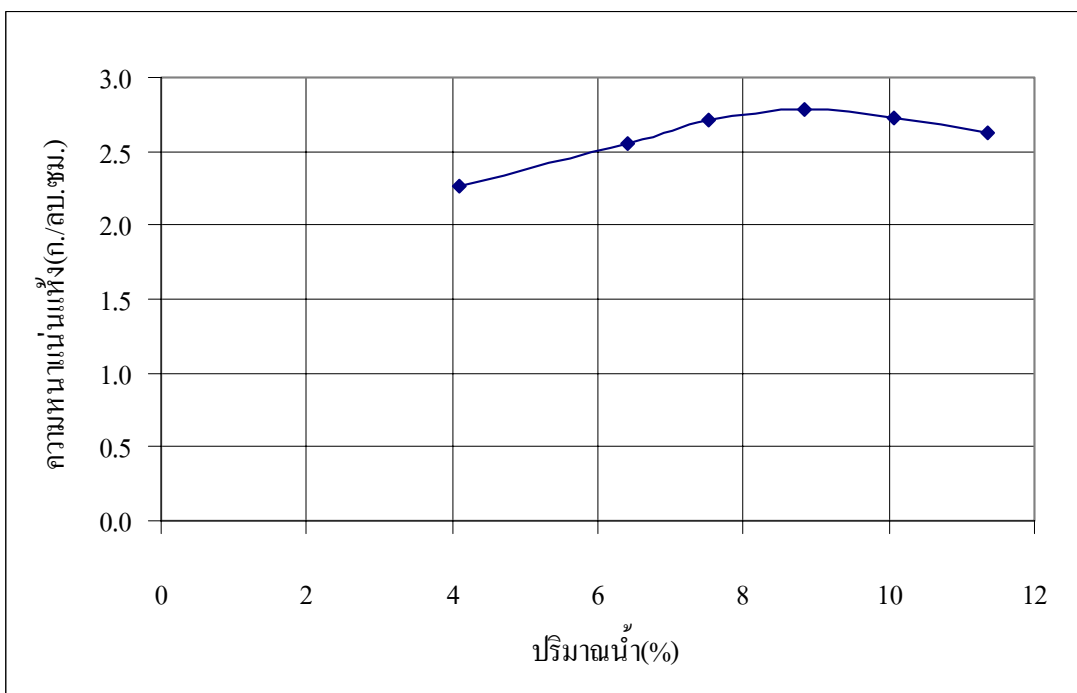
การบดอัดดิน (compaction) เป็นการทำให้ดินแน่นโดยใช้แรงคนหรือน้ำหนักจากเครื่องมือกล เพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งจะทำให้เม็ดดินอัดตัวกันแน่นขึ้น เมื่อดินมีความแน่นเพิ่มขึ้นก็จะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น ทรุดตัวได้น้อยลง และยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้น้อยลงด้วย (มณฑิธร กังศศิเทียม, 2529)

ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการบดอัดดินตามแบบมาตรฐาน (standard proctor compaction test) ก่อนการทดลองเพื่อให้ดินในแต่ละชั้นและในแต่ละชุดการทดลอง (treatment) มีความหนาแน่นและการให้น้ำซึมผ่านได้ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน ทั้งนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของดินและ นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของดิน เรียกว่า compaction curve ที่จุดยอดของ curve จะเรียกว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) ณ จุดนี้ความหนาแน่นแห้งของดินสูงสุด จะทำให้น้ำซึมผ่านช้าที่สุด และความชื้นที่จุดความหนาแน่นแห้งสูงสุดนี้ เรียกว่า ความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content) ซึ่งค่าความชื้น ณ จุดนี้จะนำไปใช้บดอัดดินในชุดการทดลองด้วย column leaching test ต่อไป โดยผลการทดลองเป็นดังนี้

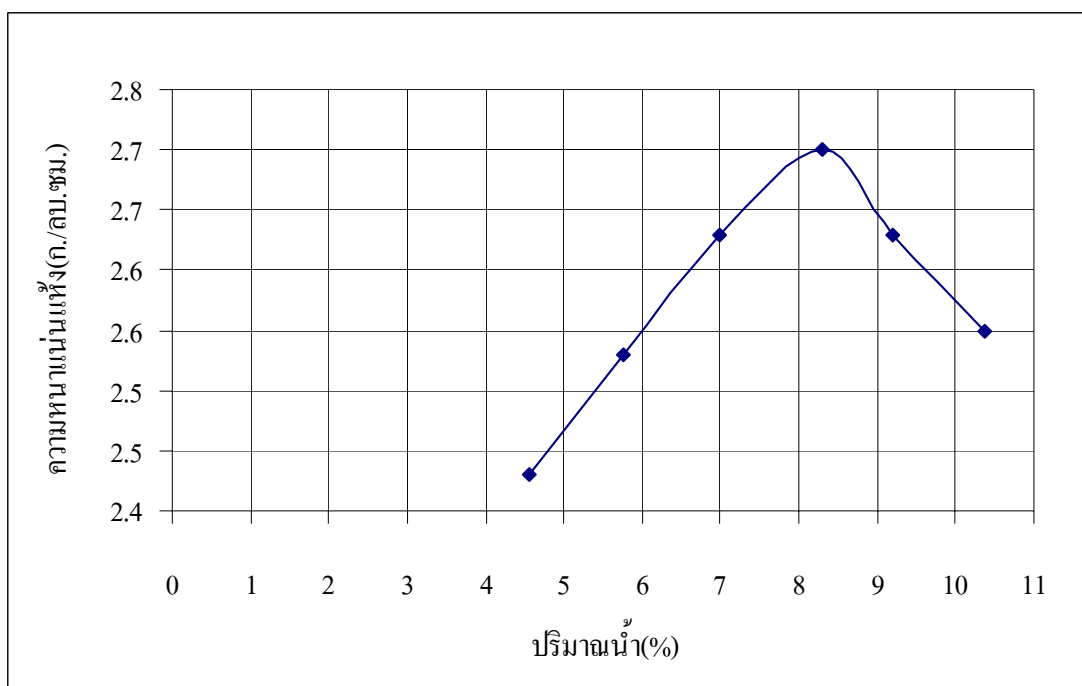
ในชุดการทดลองของดินเหมืองแร่ 100% w/w จะมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมซึ่งทำให้ได้ความหนาแน่นของดินสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 9.54 % ดังภาพประกอบที่ 3-8 ส่วนการทดลองของดินเหมืองแร่ผสมดินลูกรัง 20 % w/w จะมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นของดินสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 8.84 % ดังภาพประกอบที่ 3-9 และชุดการทดลองของดินเหมืองแร่ผสมเถ้าลอย 10% w/w จะมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นของดินสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 8.30 % ดังภาพประกอบที่ 3-10 โดยถือว่าค่าความชื้น ณ จุดยอดของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และความหนาแน่นของชุดดินเหล่านี้จะทำให้แต่ละชุดดินที่นำมาทดลองมีความแน่นสูงสุด ทำให้อุณหภูมิของดินเรียงตัวกันได้ดี รวมถึงอัตราการซึมผ่านของน้ำ ณ จุดนี้จะน้อยที่สุด และค่าความชื้นสูงสุดนี้จะนำไปใช้คำนวณปริมาณน้ำที่จะผสมกับตัวอย่างดินในการบดอัดดินเพื่อใช้ในการทดลองด้วยวิธี column leaching test



ภาพประกอบที่ 3-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และความหนาแน่น
ของชุดดินเหนืองแฉะ 100% w/w



ภาพประกอบที่ 3-9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และความหนาแน่น
ของชุดดินเหนืองแฉะผสมดินลูกรัง 20 % w/w



ภาพประกอบที่ 3-10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และความหนาแน่น
ของชุดดินเหนืองแร่ผสมเถ้าลอย 10% w/w

3.3.2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

หลังจากทำการบดอัดดินทั้ง 3 ชุดตัวอย่างแล้วจะนำมาประกอบเป็นชุด column leaching test เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในคอลัมน์ ด้วยวิธี constant head test method ASTM (D2434) ผลการทดลองเป็นดังนี้

ตารางที่ 3-4 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ชุดการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน(cm/s)
1. ดินเหนืองแร่ 100 % w/w	3.20×10^{-4}
2. ดินเหนืองแร่ผสมดินลูกรัง 20 % w/w	3.64×10^{-7}
3. ดินเหนืองแร่ผสมเถ้าลอย 10 % w/w	4.40×10^{-5}

จากตารางที่ 3-4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในชุดการทดลองของดินเหนืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุคลุมดินจะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงสุด คือ 3.20×10^{-4}

ส่วนชุดการทดลองด้วยดินเหมืองแร่ผสมดินลูกรัง 20 % w/w จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ 3.64×10^{-7} และชุดการทดลองด้วย ดินเหมืองแร่ผสมเถ้าลอย 10 % w/w เท่ากับ 4.40×10^{-5} แสดงให้เห็นว่าดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุใดเลยเมื่อสารหนูเกิดการชะละลายออกมาจะสามารถเคลื่อนที่และเกิดการแพร่กระจายไปยังที่อื่นได้ง่ายโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง แต่เมื่อมีการผสมด้วยวัสดุคลุมดินคือดินลูกรังหรือเถ้าลอย ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำก็ลดลง และพบว่าดินลูกรังจะยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อยที่สุด เนื่องจากมีอนุภาคละเอียดและมีช่องว่างในดินน้อยกว่าเถ้าลอยและดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุ ดังนั้นในเบื้องต้นดินลูกรังจึงเหมาะสมในการเป็นวัสดุคลุมดินเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของสารหนูไปสู่พื้นที่อื่นมากที่สุด

3.3.3 การทดสอบการชะละลาย (column leaching test)

การทดลองนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของสารหนูที่ละลายอยู่ในน้ำผ่านชั้นดิน โดยจะใช้ deionized water (DI) และ K_2SO_4 0.05 โมล มาทำการชะละลายเพื่อเปรียบเทียบการชะละลายของสารหนูในดินในชุดการทดลองและประเมินประสิทธิภาพของวัสดุคลุมดินในการดูดซับสารหนูที่ละลายออกมาเมื่อเวลาผ่านไป 66 ชั่วโมง ผลการทดลองเป็นดังนี้

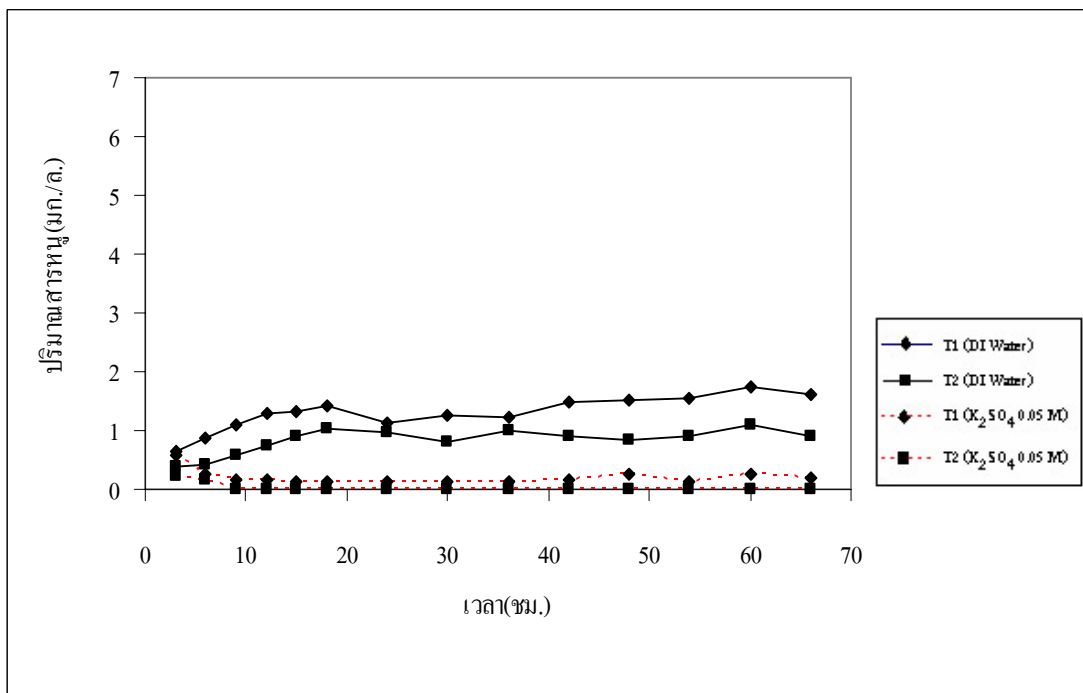
3.3.3.1 สารหนู

จากการชะละลายด้วยน้ำ DI เมื่อเวลาผ่านไป 66 ชั่วโมง ชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุคลุมดิน (T1) จะมีปริมาณสารหนูเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่มากขึ้น ส่วนชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ผสมดินลูกรัง 20% w/w (T2) และชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ผสมเถ้าลอย 10% w/w (T3) ปริมาณสารหนูจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป (ภาพประกอบที่ 3-11 ถึง 3-13) และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดสารหนูที่ถูกชะละลายออกมาพบว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับและตรึงสารหนูไว้ได้ดีกว่าดินลูกรัง และชุดดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุคลุมดิน

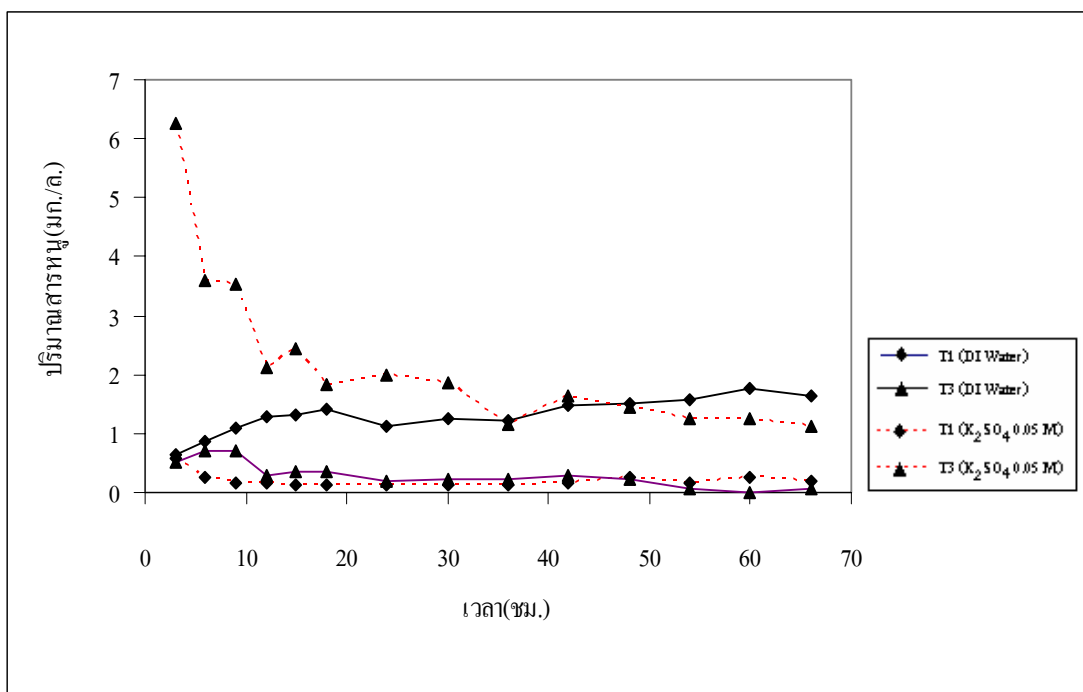
ส่วนการชะละลายด้วย K_2SO_4 0.05 โมล พบว่าชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุคลุมดินจะมีปริมาณสารหนูลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ผสมดินลูกรัง 20% w/w และชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ผสมเถ้าลอย 10% w/w ปริมาณสารหนูจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปเช่นเดียวกัน การชะละลายด้วย K_2SO_4 0.05 โมล เป็นที่น่าสังเกตว่าชุดคอลัมน์ที่บรรจุดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุคลุมดิน เมื่อถูกชะละลายด้วย K_2SO_4 0.05 โมล จะมีปริมาณสารหนุมากกว่าถูกชะละลายด้วยน้ำ DI เนื่องจาก K_2SO_4 จะไปเพิ่ม ionic strength ในสารละลาย ทำให้การละลายได้ของสารหนูลดลง ส่วนในชุดคอลัมน์ที่ทดลองด้วยเถ้าลอยกลับพบว่าปริมาณสารหนูถูกชะละลายออกมามากกว่าชุดดินเหมืองแร่ที่ไม่ได้ผสมวัสดุ

อาจเนื่องมาจากในถ้ำลอมมีองค์ประกอบของแร่พวก KCl, NaCl, CaCO₃, Ca(OH)₂, CaSO₄, CaCl₂, CaClOH, CaSO₄·2H₂O และ K_{86.5}Al_{86.5}Si_{105.5}O₃₈₄ (พจนีย์ อินทสโร, 2545) โดยมีปริมาณแคลเซียมอยู่สูงและแคลเซียมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอาร์ซีเนตและตกตะกอนเป็นแคลเซียมอาร์ซีเนตที่พีเอชสูง เมื่อถูกชะละลายด้วย K₂SO₄ 0.05 โมล SO₄⁻² จะแข่งขันกับอาร์ซีเนตเพื่อทำปฏิกิริยากับ Ca⁺² เกิดเป็น CaSO₄ ทำให้อาร์ซีเนตไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ Ca⁺² เพื่อตกตะกอนเป็นแคลเซียมอาร์ซีเนตได้ ทำให้ปริมาณหนูในสารละลายมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อชะละลายด้วย K₂SO₄ 0.05 โมล แต่ทั้งนี้ก็พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารหนูก็ดลดลงเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดสารหนูที่ถูกชะละลายด้วย K₂SO₄ 0.05 โมล พบว่าดินลูกรังมีประสิทธิภาพในการดูดซับและตรึงสารหนูไว้ได้ดีกว่าถ้ำลอม

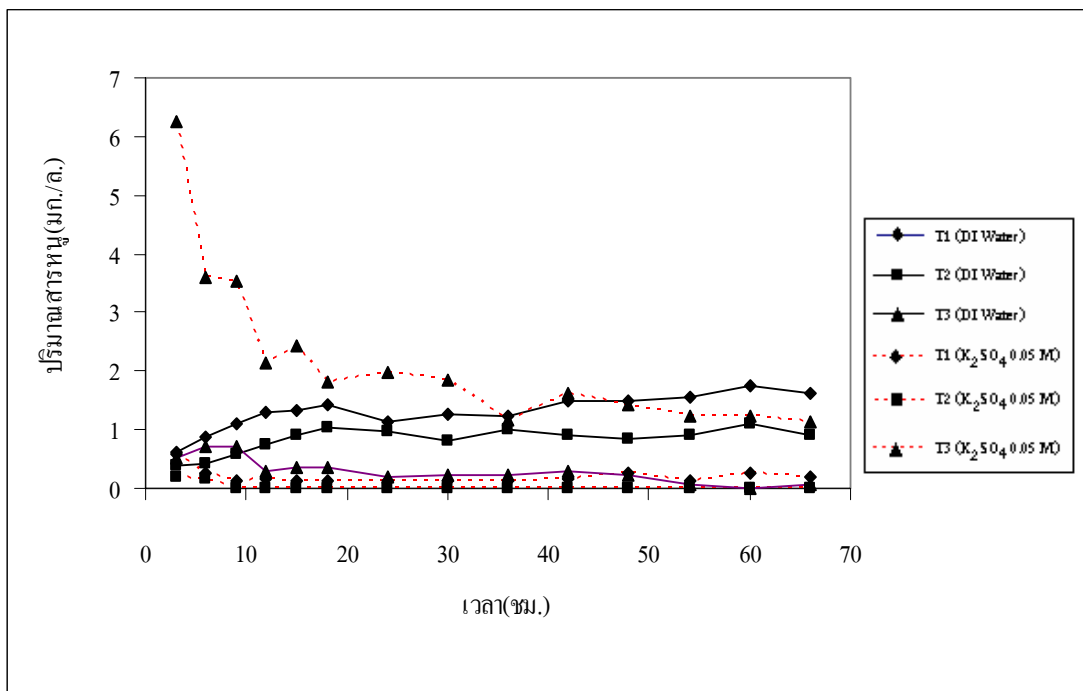
นอกจากนี้จะเห็นว่าปริมาณสารหนูสะสม (ภาพประกอบที่ 3-14) ของชุด T1 ที่ชะละลายด้วยน้ำ DI จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป ส่วน T2 และ T3 ปริมาณสารหนูสะสมจะมีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่าหากสารหนูถูกชะล้างด้วยน้ำฝนและไม่ได้มีการป้องกันการแพร่กระจายซึ่งมีน้ำเป็นตัวพา จะทำให้มีปริมาณสารหนูละลายออกมาและอาจปนเปื้อนไปสู่พื้นที่อื่นได้ แต่เมื่อมีการใช้ดินลูกรังหรือถ้ำลอมไปผสมกับดินที่ปนเปื้อนสารหนูพบว่าปริมาณสารหนูก็ดลดลง ดังนั้นดินลูกรังหรือถ้ำลอมจึงสามารถนำมาใช้ดูดตรึงสารหนูและควบคุมการแพร่กระจายของสารละลายสารหนูไปสู่พื้นที่อื่นได้ แต่เมื่อทดสอบการชะละลายด้วย K₂SO₄ 0.05 โมล พบว่า T3 มีปริมาณสารหนูสะสมอยู่ในปริมาณมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาแข่งขันดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว และพบว่า T2 มีปริมาณสารหนูสะสมน้อยสุด



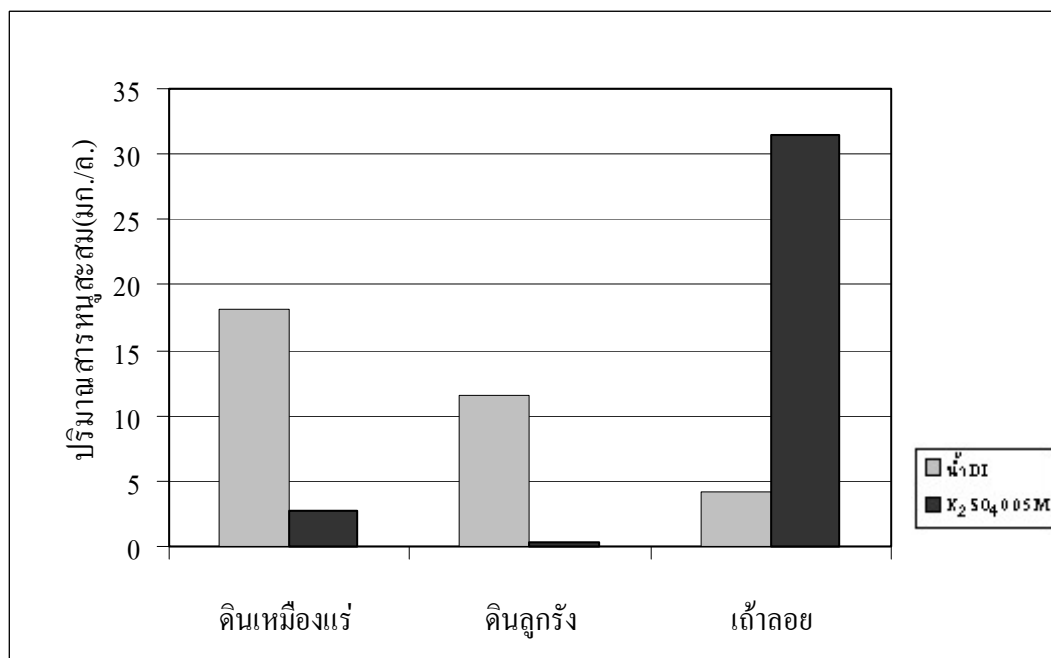
ภาพประกอบที่ 3-11 ปริมาณสารหนูกับเวลาของ T1 และ T2 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K₂SO₄ 0.05 โมล



ภาพประกอบที่ 3-12 ปริมาณสารหนูกับเวลาของ T1 และ T3 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K₂SO₄ 0.05 โมล



ภาพประกอบที่ 3-13 ปริมาณสารหนูกับเวลาของ T1, T2 และ T3 เมื่อถูกชะละลายด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล

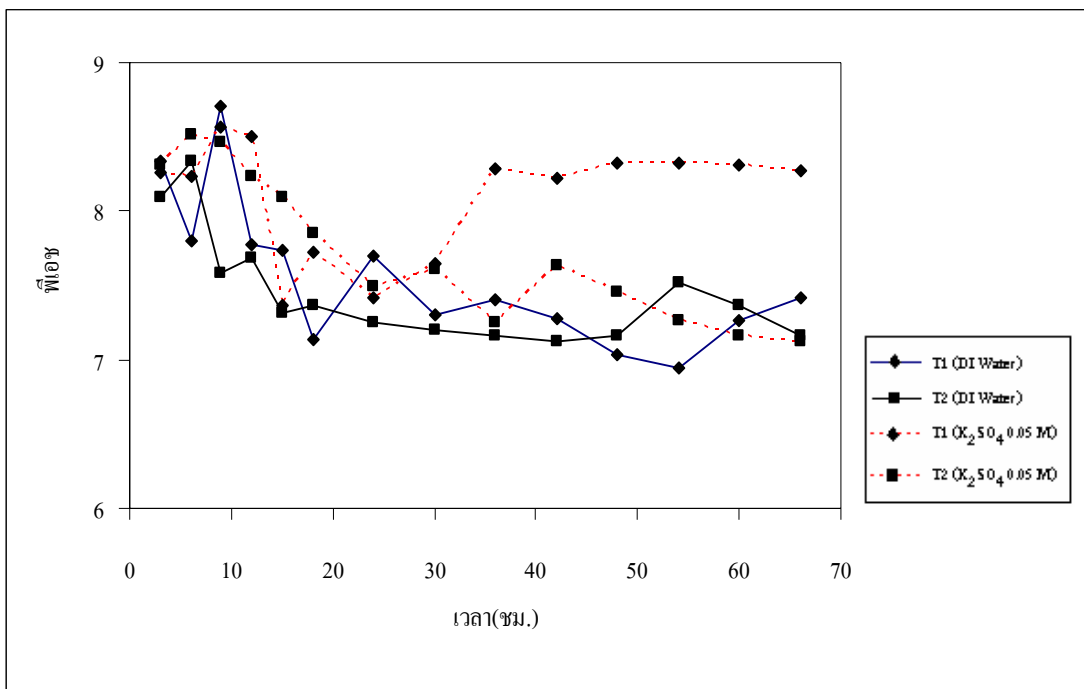


ภาพประกอบที่ 3-14 ปริมาณสารหนูสะสมเมื่อถูกชะละลายด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล

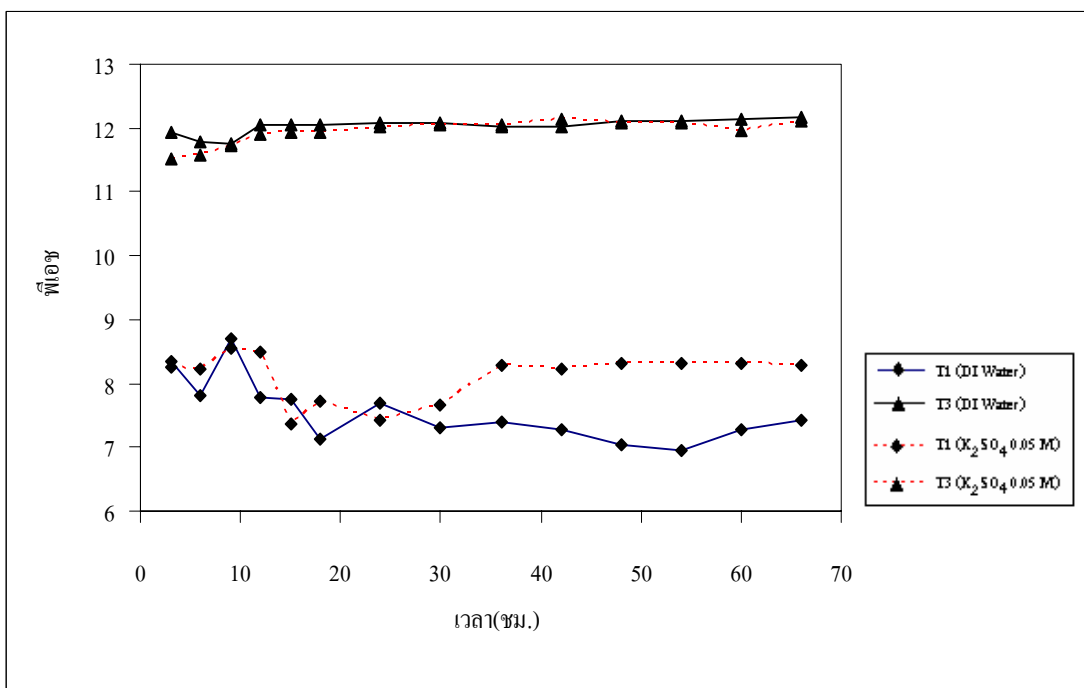
3.3.3.2 พีเอช

จากภาพประกอบที่ 3-15 ถึง 3-17 พบว่า T1 และ T2 เมื่อทดสอบการชะละลายด้วยน้ำ DI พีเอชจะมีค่าต่ำลงจนอยู่ในสภาวะที่ค่อนข้างเป็นกลางเมื่อระยะเวลาผ่านไป ส่วน T3 จะมีพีเอชสูงขึ้นและอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างสูง ทั้งนี้เนื่องจาก T3 จะมีองค์ประกอบของแคลเซียมอยู่สูงมากเมื่อถูกชะละลายออกมาจึงทำให้พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบการชะละลายด้วย K_2SO_4 0.05 โมล พบว่า T1 จะมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและอยู่ในสภาวะด่างอ่อนเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องจาก K_2SO_4 จะไปชะละลายแคลเซียมหรือเกลือที่อยู่ในดินออกมาทำให้ พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน T2 พีเอชจะมีค่าต่ำลงจนอยู่ในสภาวะที่ค่อนข้างเป็นกลางเมื่อระยะเวลาผ่านไป เนื่องจาก K_2SO_4 จะไปชะละลายโลหะพวกเหล็กหรืออะลูมิเนียมที่อยู่ในดินลูกรังออกมาและ Fe^{+3} และ Al^{+3} จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น $Fe(OH)_3$ กับ $Al(OH)_3$ และปลดปล่อย H^+ ออกมา ทำให้พีเอชมีค่าต่ำลงเมื่อเวลาผ่านไป และ T3 พีเอชจะมีค่าสูงขึ้นและอยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง

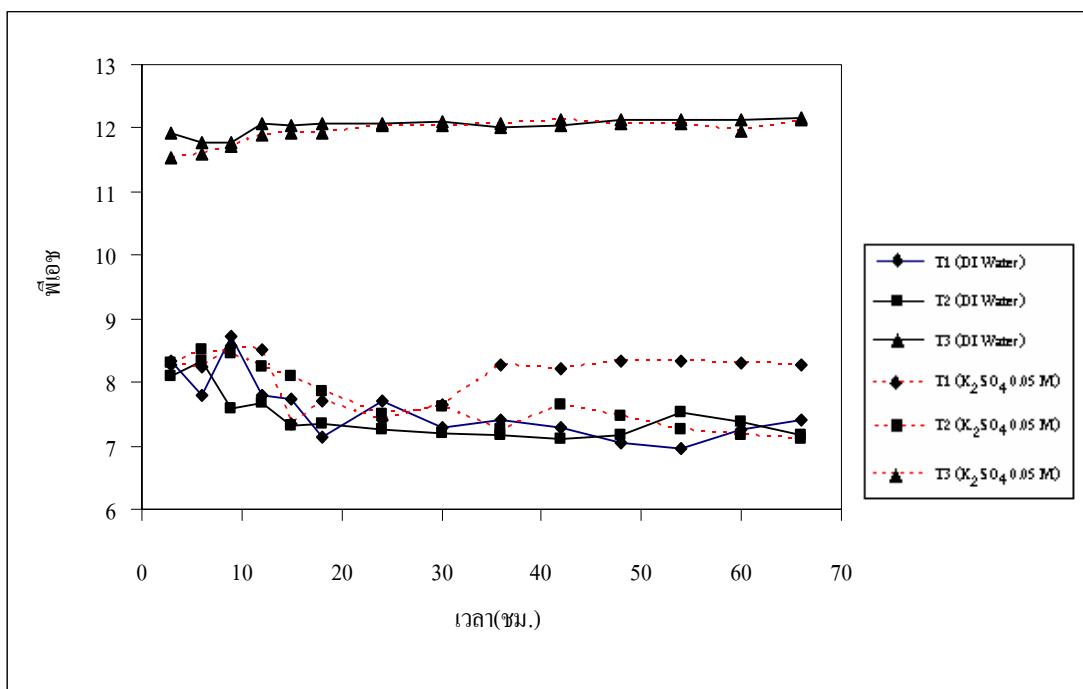
ดังนั้นจะเห็นว่าที่พีเอชต่ำหรือค่อนข้างเป็นกลางดินลูกรังจะสามารถดูดซับสารหนูได้ดีกว่าถ้ำลอย เนื่องจากในดินลูกรังมีองค์ประกอบของ อะลูมิเนียม และเหล็ก ที่มีความสามารถดูดซับสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอาร์ซีเนตได้ดี (Sabine and Glaubig, 1988; Pierce and Moore, 1982) ส่วนในถ้ำลอยซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมอยู่สูงจะสามารถดูดซับและทำการตกตะกอนสารหนูที่อยู่ในรูปของสารประกอบอาร์ซีเนตได้ดีกว่าดินลูกรัง เนื่องจากพีเอชที่สูงประมาณ 11.18-12.72 แคลเซียมจะตกตะกอนร่วมกับสารหนูที่อยู่ในรูปของอาร์ซีเนต ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมอาร์ซีเนต เช่น $Ca_4(OH)_2(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$, $Ca_5(AsO_4)_3OH$ และ $Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 3/2 H_2O$ และมีความเสถียรเป็นระยะเวลานาน (Bothe and Brown, 1999)



ภาพประกอบที่ 3-15 พีเอชกับเวลาของ T1 และ T2 เมื่อถูกระบายด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล



ภาพประกอบที่ 3-16 พีเอชกับเวลาของ T1 และ T3 เมื่อถูกระบายด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล

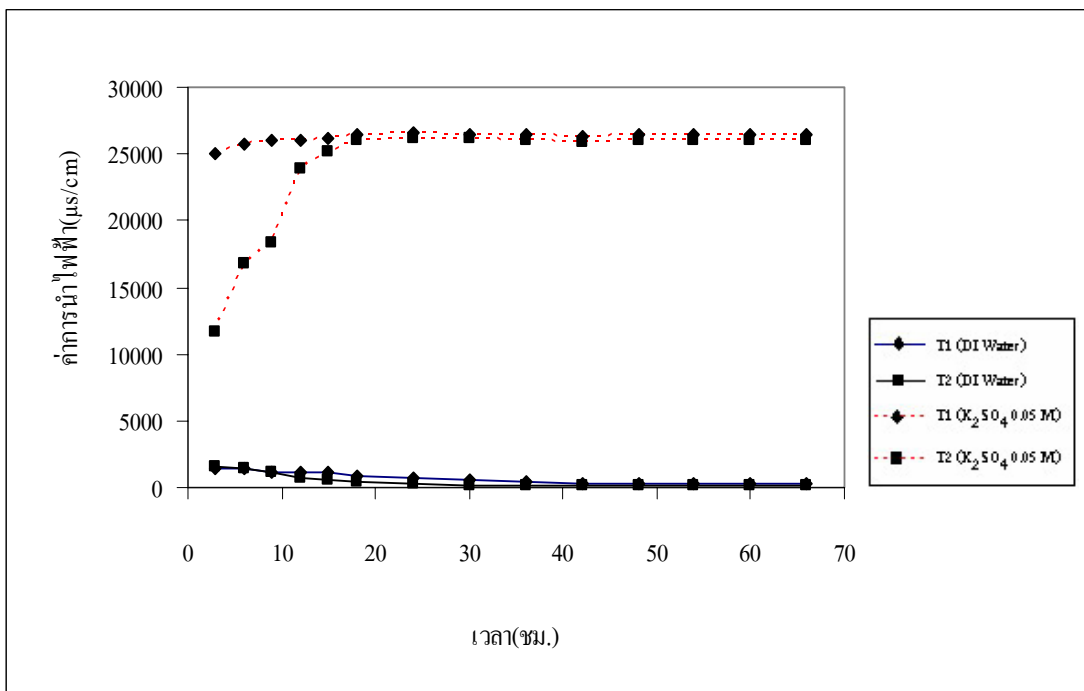


ภาพประกอบที่ 3-17 พีเอชกับเวลาของ T1, T2 และ T3 เมื่อถูกชะละลายด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล

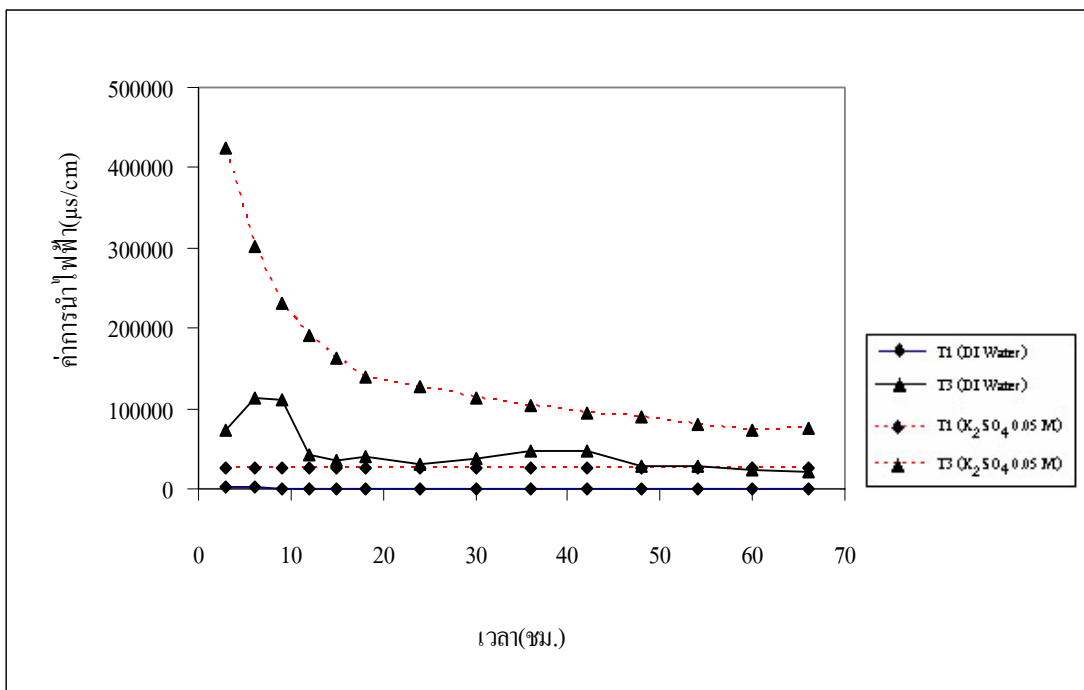
3.3.3.3 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าจะบอกถึงความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในน้ำที่สามารถแตกตัวได้เป็นประจุบวก(cation) และประจุลบ(anion) ซึ่งประจุบวกและลบที่เกิดขึ้น จะเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้สารละลายที่แตกตัวได้มีค่าการนำไฟฟ้า(electric conductivity) ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในน้ำดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นตัวบอกปริมาณความเข้มข้นในสารละลายได้

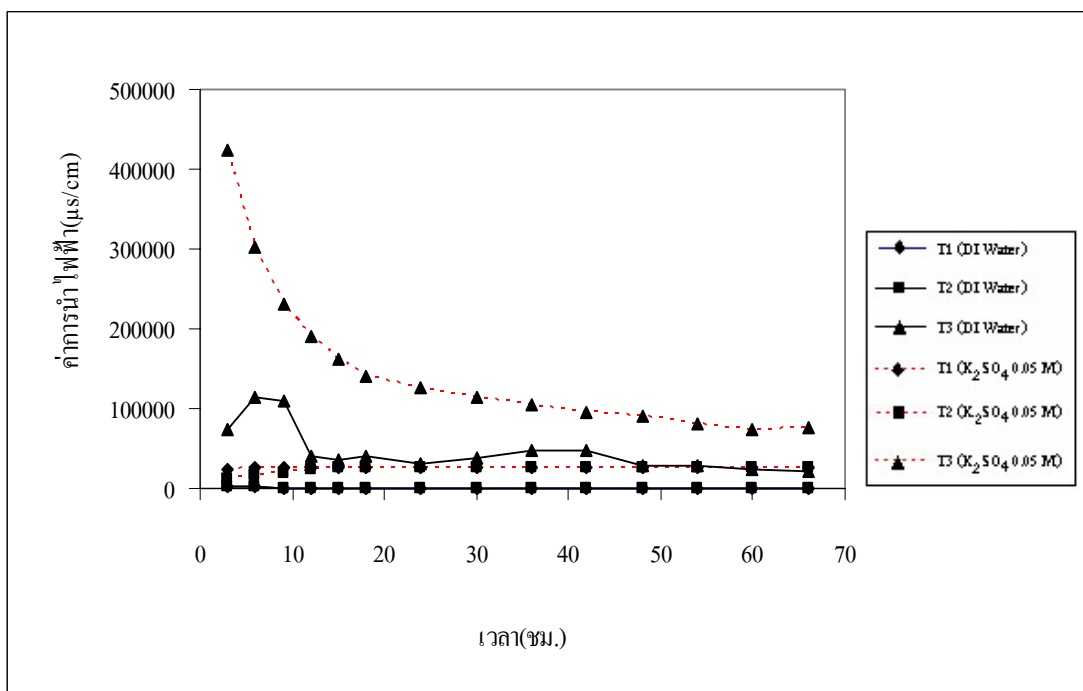
จากภาพประกอบที่ 3-18 ถึง 3-20 เมื่อทดสอบการชะละลายด้วยน้ำ DI จะเห็นว่า T1 T2 และ T3 มีแนวโน้มค่าการนำไฟฟ้าลดลงทุกชุดการทดลองเมื่อระยะเวลาผ่านไปเพราะปริมาณของไอออนชนิดต่างๆ มีปริมาณลดลงเนื่องจากถูกชะล้างออกไป นอกจากนี้ยังมีโลหะบางส่วนที่สามารถตกตะกอนร่วมกันและไม่ละลายน้ำเมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าการนำไฟฟ้าจึงลดลง และเมื่อชะละลายด้วย K_2SO_4 0.05 โมล พบว่า T1, T2 และ T3 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า T1, T2 และ T3 ที่ชะละลายด้วยน้ำ DI เพราะ K_2SO_4 เป็นสารที่สามารถละลายและแตกตัวได้ดีในน้ำ ทำให้มีความเข้มข้นของสารละลายในน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ T3 ที่เป็นชุดทดลองด้วยเกลือ พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากมีองค์ประกอบของเกลือชนิดต่างๆ อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น KCl , $NaCl$, $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, $CaSO_4$, $CaCl_2$, $CaClOH$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ และ $K_{865}Al_{865}Si_{1055}O_{384}$ (ภควัฒน์ แสสนเจริญ, 2546 และ พจนีย์ อินทสโร, 2545) ซึ่งสามารถละลายและแตกตัวได้ดี ดังนั้นจึงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าทุกชุดการทดลอง และพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าการนำไฟฟ้าของ T3 จะลดลงเนื่องจากมีโลหะบางส่วนที่สามารถตกตะกอนร่วมกันและไม่ละลายน้ำ



ภาพประกอบที่ 3-18 ค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาของ T1 และ T2 เมื่อถูกชะละลายด้วย deionized water และ K₂SO₄ 0.05 โมล



ภาพประกอบที่ 3-19 ค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาของ T1 และ T3 เมื่อถูกชะละลายด้วย deionized water และ K₂SO₄ 0.05 โมล

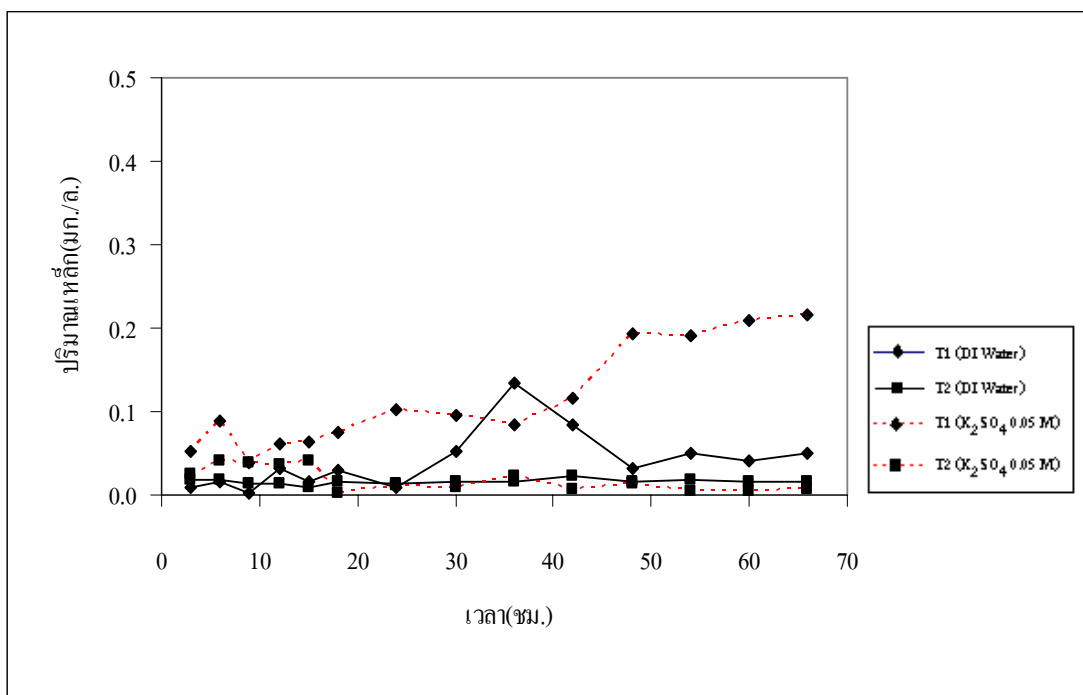


ภาพประกอบที่ 3-20 ค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาของ T1, T2 และ T3 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล

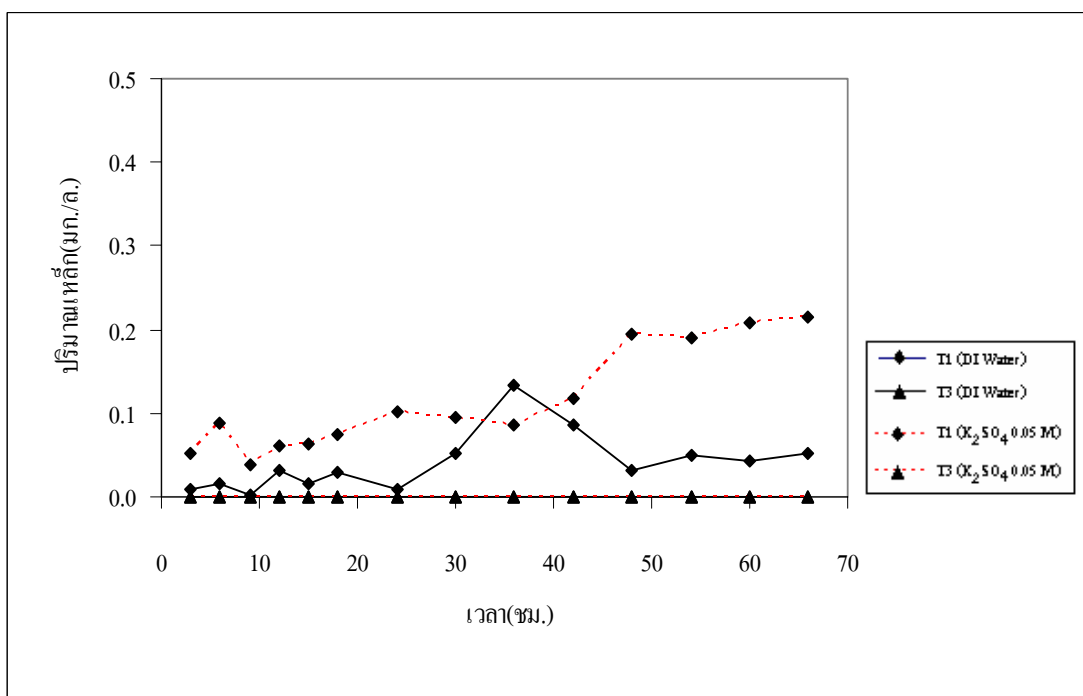
3.3.3.4 ปริมาณเหล็ก

จากภาพประกอบที่ 3-21 ถึง 3-23 เมื่อทดสอบการชะละลายด้วยน้ำ DI จะเห็นว่า T1 และ T2 จะมีปริมาณเหล็กละลายออกมาน้อยและเมื่อชะละลายด้วย K_2SO_4 0.05 โมล T1 จะมีปริมาณเหล็กละลายออกมามากกว่าถูกชะละลายด้วยน้ำ DI แต่ T2 จะมีปริมาณเหล็กละลายออกมาน้อยกว่าถูกชะละลายด้วยน้ำ DI ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเหล็กในดินลูกรังที่ละลายออกมาจะไปดูดซับกับสารหนูและตกตะกอนร่วมกัน เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ จึงทำให้ปริมาณเหล็กมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ส่วน T3 ซึ่งเป็นชุดการทดลองด้วยเกลือและไม่มีเฟสสูงตรวจไม่พบปริมาณเหล็กที่ละลายออกมา ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กจะไม่ละลายที่เฟสสูง

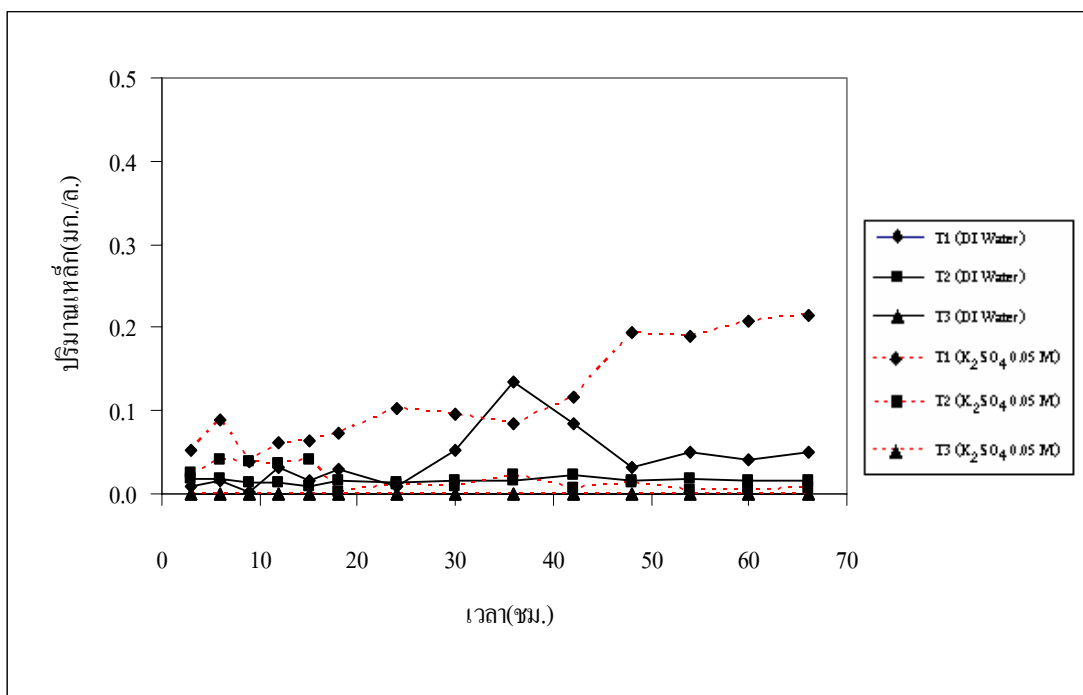
เหล็กที่อยู่ในรูปของสารละลาย Fe^{+2} ในสถานะที่เป็นกลางหรือกรดอ่อนจะสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกันกับสารหนูและตกตะกอนได้ (Wilson and Hawkins, 1987) และสารหนูยังถูกดูดซับด้วยเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีพันธะแข็งแรง และมีความเสถียร (Sabine and Cliff, 2001) ดังนั้นเหล็กจึงเป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งในการลดปริมาณสารหนู



ภาพประกอบที่ 3-21 ปริมาณเหลือกับเวลาของ T1 และ T2 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล



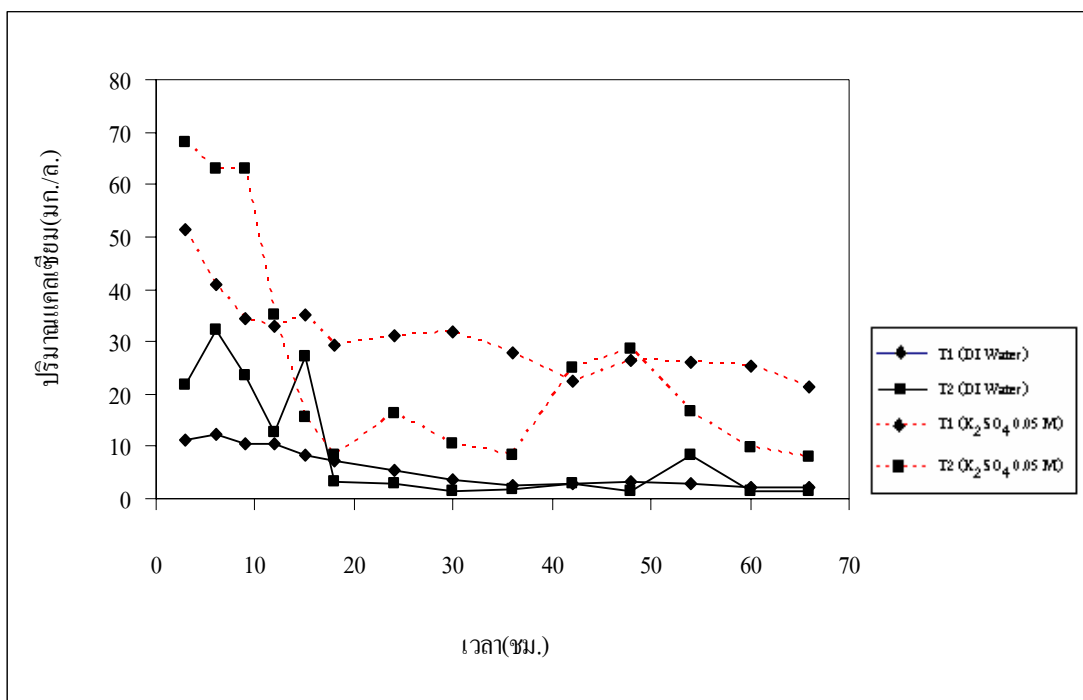
ภาพประกอบที่ 3-22 ปริมาณเหลือกับเวลาของ T1 และ T3 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล



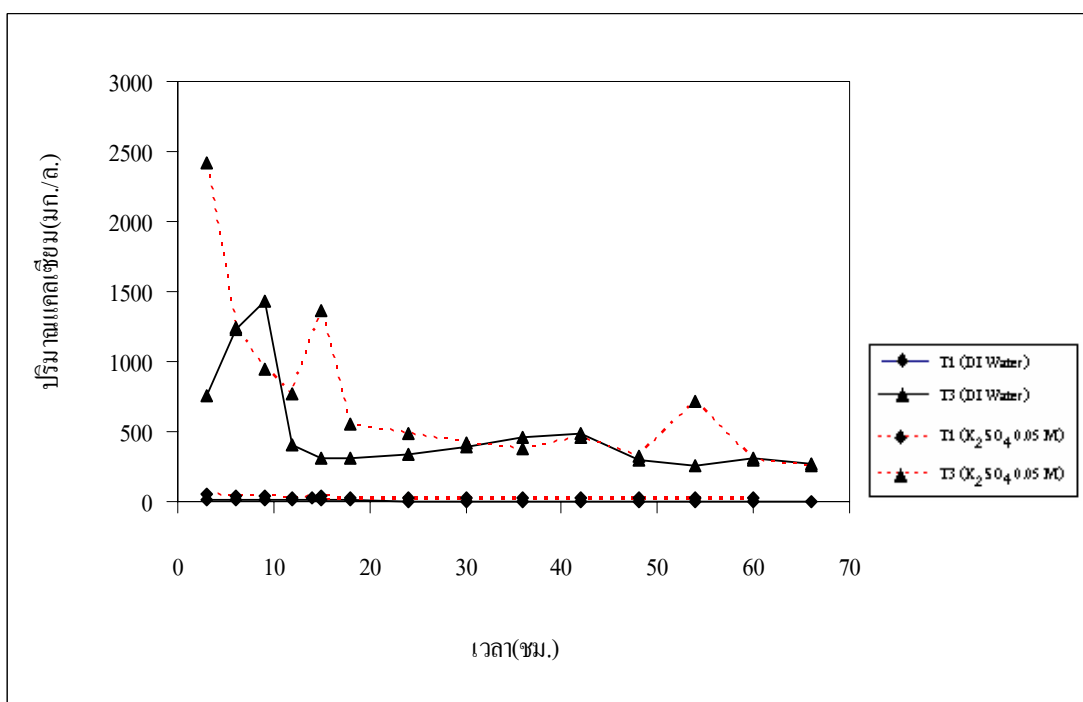
ภาพประกอบที่ 3-23 เหล็กกับเวลา T1, T2 และ T3 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K₂SO₄ 0.05 โมล

3.3.3.5 ปริมาณแคลเซียม

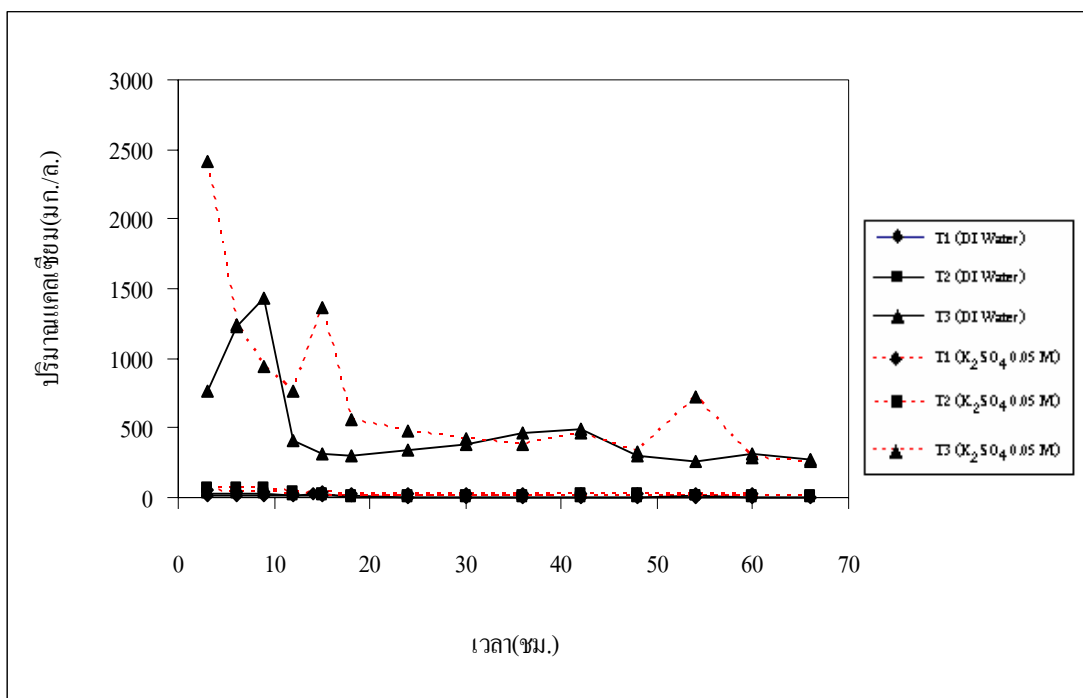
จากภาพประกอบที่ 3-24 ถึง 3-26 เมื่อทดสอบการชะละลายด้วยน้ำ DI จะเห็นว่า T1, T2 และ T3 จะมีปริมาณแคลเซียมลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป และเมื่อทดสอบการชะละลายด้วย K₂SO₄ 0.05 โมล ปริมาณแคลเซียมจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปเช่นเดียวกัน แต่จะพบว่าปริมาณแคลเซียมที่วัดได้ในชุดที่ทดสอบด้วย K₂SO₄ 0.05 โมล จะมีค่าสูงกว่าการชะละลายด้วยน้ำ DI เนื่องจาก K₂SO₄ จะสามารถแตกตัวให้ K⁺ ซึ่งจะเข้าไปไล่และแทนที่ Ca²⁺ ที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของ Fe-oxide และแร่ดินเหนียวทำให้มีปริมาณแคลเซียมในสารละลายเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 3-24 ปริมาณแคลเซียมกับเวลาของ T1 และ T2 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล



ภาพประกอบที่ 3-25 ปริมาณแคลเซียมกับเวลาของ T1 และ T3 เมื่อถูกชะละลาย
ด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล



ภาพประกอบที่3-26 ปริมาณแคลเซียมกับเวลาของ T1, T2 และ T3 เมื่อถูกชะละลายด้วย deionized water และ K_2SO_4 0.05 โมล

3.34 ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรที่ทำการศึกษา

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient: r) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกัน ซึ่งสหสัมพันธ์จะมี 2 แบบ คือ สหสัมพันธ์ทางบวก (positive correlation) และ สหสัมพันธ์ทางลบ (negative correlation) โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะเป็นตัววัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในเชิงเส้นตรง ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะบอกถึงระดับความสัมพันธ์ว่ามากหรือน้อย โดยพิจารณาจากการเกาะกลุ่มของจุดรอบๆ แนวเส้นตรงว่าใกล้ชิดหรือกระจายห่างจากเส้น

3.3.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของตัวแปรในชุดการทดลองแบบกะ

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ร่วมระหว่างตัวแปรที่ละคู่ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01 และ 0.05 ในการทดลองแบบกะ เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยวัสดุคลุมดินทั้ง 4 ชนิดเป็นดังนี้

ตารางที่ 3-5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของตัวแปรในชุดการทดลองแบบกะ (batch adsorption test)

ดินลูกรัง					หินปูนฝุ่น					ปูนขาว					ถ้ำลอย									
	pH	EC	As	Fe	Ca		pH	EC	As	Fe	Ca		pH	EC	As	Fe	Ca		pH	EC	As	Fe	Ca	
pH	1	0.44	0.93**	0.91*	-0.16	1	0.58	-0.44	-0.41	0.86*	1	0.99*	-0.90*	-0.99**	0.99**	1	0.83*	-0.80	-0.99**	0.80				
EC		1	0.23	0.12	0.65		1	0.04	-0.79	0.88*		1	-0.93**	-0.99**	0.99**		1	-0.98**	-0.76	0.99**				
As			1	0.61	-0.39			1	0.01	-0.38			1	0.91	-0.95**			1	0.74	-0.98**				
Fe				1	-0.56				1	-0.67				1	-0.99**				1	-0.72				
Ca					1					1					1					1				

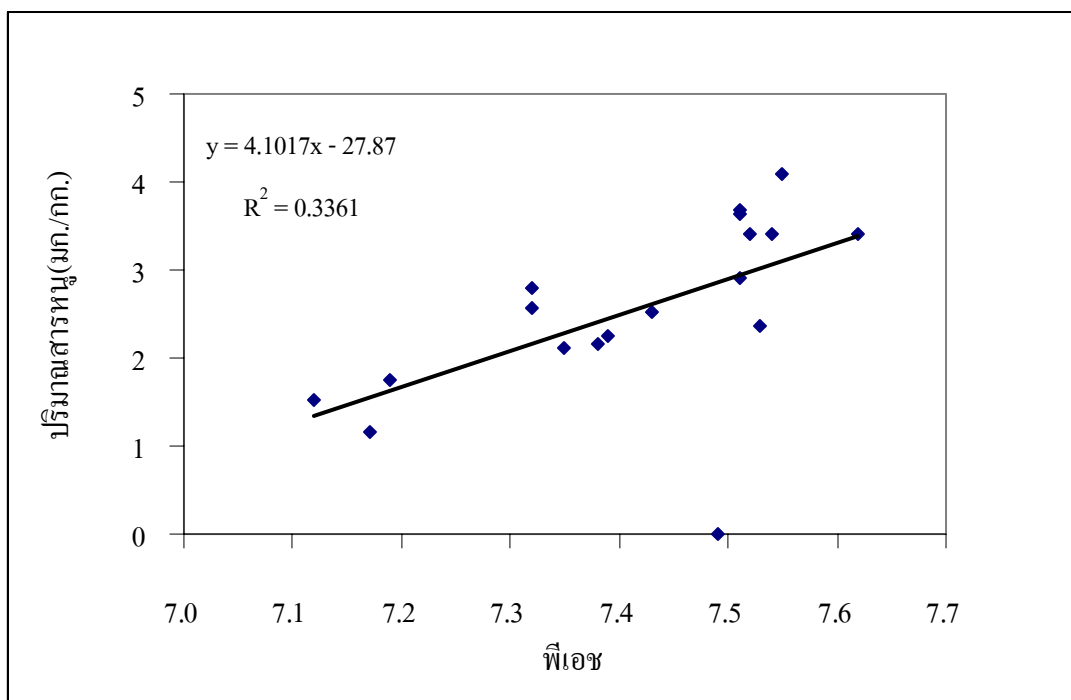
* P-value < 0.05

** P-value < 0.01

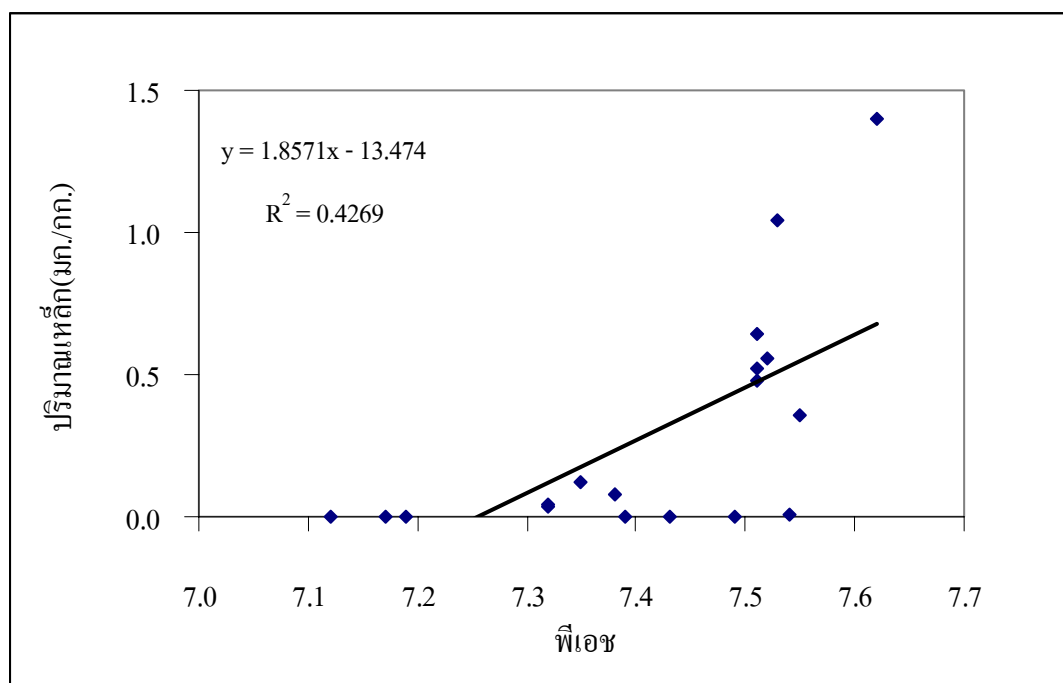
1) ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรที่ศึกษาในชุดการทดลองด้วยดินลูกรัง

ข้อมูลตารางที่ 3-5 ของชุดการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยดินลูกรัง พบว่าพีเอชมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณสารหนูที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (p-value < 0.01) และมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณเหล็กที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value < 0.05)

สำหรับความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงระหว่างพีเอชกับปริมาณสารหนู ($r=0.93$) แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเติมปริมาณดินลูกรังเพิ่มขึ้นในดินเหมืองแร่ ค่าพีเอชจะลดลงทำให้เกิดการดูดซับสารหนูได้ดีขึ้น (ภาพประกอบที่ 3-27) เนื่องจากในดินลูกรังจะมีส่วนประกอบของเหล็กและ อะลูมิเนียม อยู่เป็นจำนวนมากรวมถึงมีแร่ธาตุหลักคือ kaolinite, goethite, hematite และ gibbsite ส่วนประกอบของธาตุเหล่านี้จะไปทำการดูดซับสารหนูที่ละลายอยู่ในน้ำและในสถานะที่น้ำค่อนข้างเป็นกลางหรือเป็นกรด ออกไซด์ของเหล็กกับอะลูมิเนียมในดินลูกรัง จะเกิดปฏิกิริยากับสารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบอาร์ซีเนตและตกตะกอนรวมกัน (Ana and Virginia, 2004; Willson and Hawkin, 1987) ดังนั้นปริมาณสารหนูที่วัดได้จึงมีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้การที่พีเอชมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณของเหล็กในระดับสูง ($r=0.91$) เนื่องจาก Fe^{+3} และ Al^{+3} เมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยา $Fe^{+3} + H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + H^+$ และ $Al^{+3} + H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 + H^+$ ทำให้พีเอชลดลง และในขณะเดียวกัน $Fe(OH)_3$ และ $Al(OH)_3$ จะตกตะกอนและไม่ละลายน้ำ ดังนั้นปริมาณเหล็กที่วัดได้จึงมีค่าลดลง เมื่อพีเอชลดลง (ภาพประกอบที่ 3-28)



ภาพประกอบที่ 3-27 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณสารหนูในชุดการทดลองด้วยดินลูกรัง

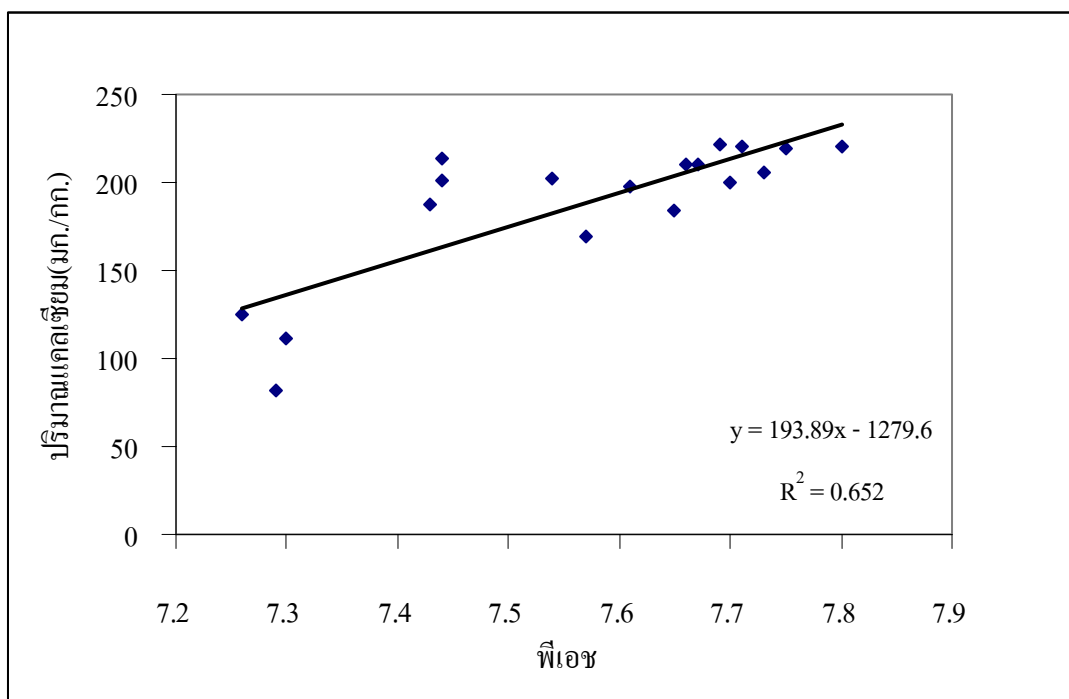


ภาพประกอบที่ 3-28 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเหล็กในชุดการทดลองด้วยดินลูกรัง

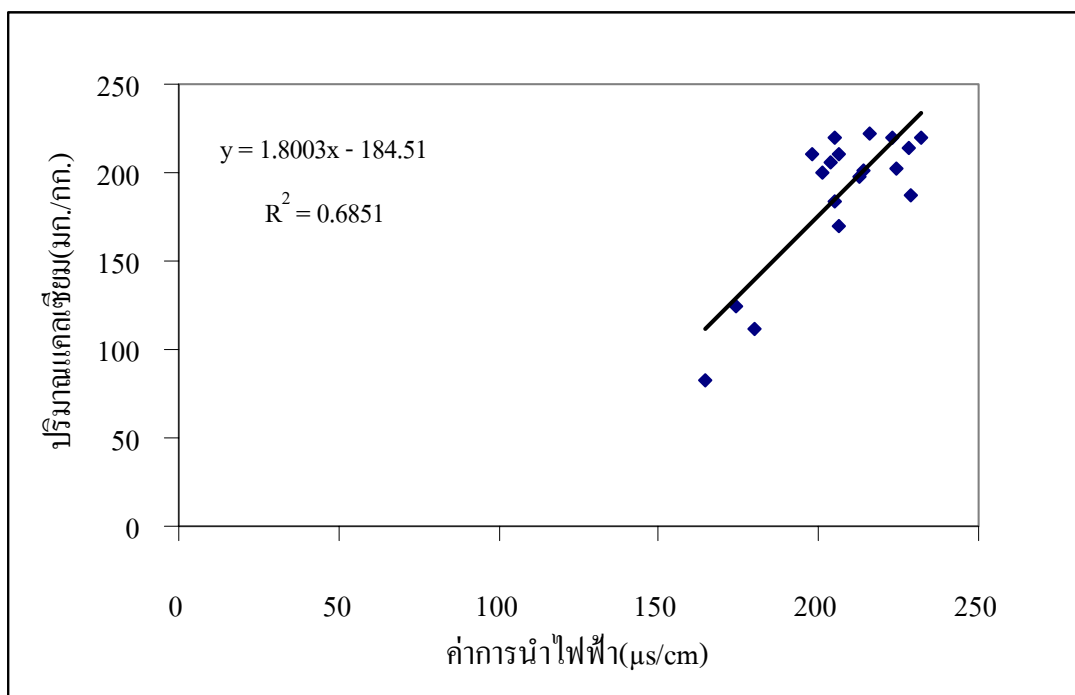
2) ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรที่ศึกษาในชุดการทดลองด้วยหินปูนฝุ่น

ข้อมูลในตารางที่ 3-5 ของชุดการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยหินปูนฝุ่น พบว่าพีเอชมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} < 0.05$) และค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} < 0.05$)

สำหรับความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงระหว่างพีเอชกับปริมาณแคลเซียม ($r = 0.86$) และค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณแคลเซียม ($r = 0.88$) แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเติมปริมาณหินปูนฝุ่น เพิ่มขึ้นในดินเหมืองแร่จะทำให้พีเอช ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณแคลเซียมมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ภาพประกอบที่ 3-29 และภาพประกอบที่ 3-30) เนื่องจากในหินปูนฝุ่นจะประกอบไปด้วยแร่คาร์บอเนต มากกว่าร้อยละ 50 เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวทำให้มีปริมาณแคลเซียม สารประกอบคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตละลายออกมา ส่งผลให้พีเอชและการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ระดับพีเอชและปริมาณแคลเซียมของชุดการทดลองนี้มีค่าไม่สูงมากเนื่องจากแร่คาร์บอเนตเป็นแร่ที่สามารถละลายน้ำได้น้อย ประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูจึงมีน้อยลง ดังจะเห็นจากความสัมพันธ์เชิงลบในระดับต่ำ ($r = -0.38$) ระหว่างปริมาณแคลเซียมและปริมาณสารหนู (ตารางที่ 3-5)



ภาพประกอบที่ 3-29 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณแคลเซียมในชุดการทดลองด้วยหินปูนฝุ่น

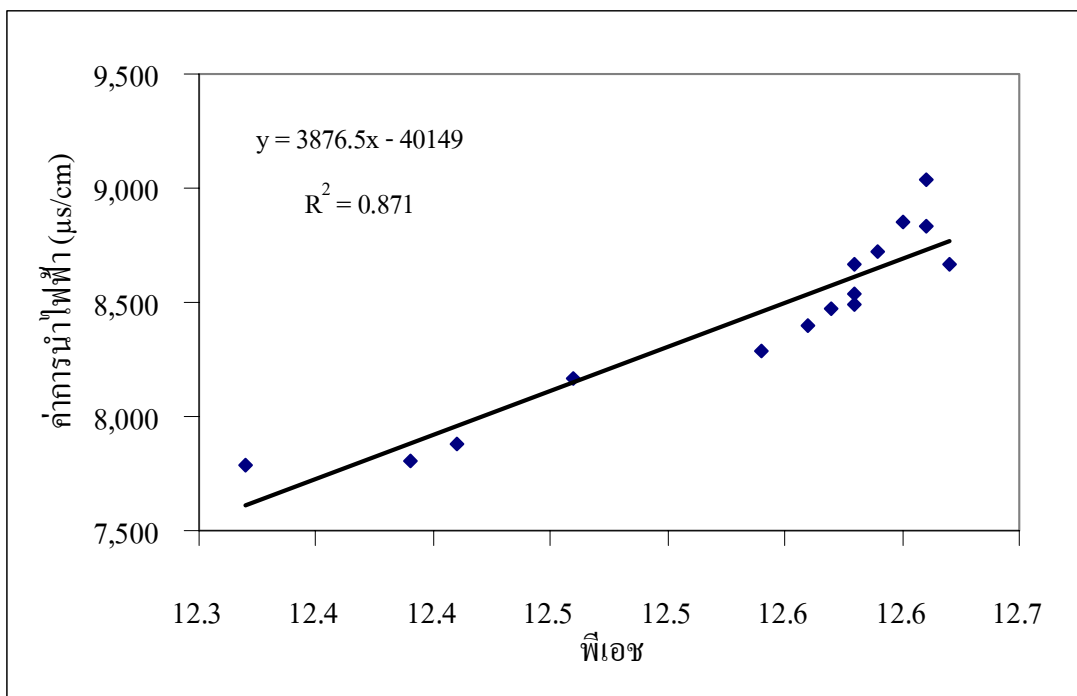


ภาพประกอบที่3-30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณแคลเซียม
ในชุดการทดลองด้วยหินปูนฝุ่น

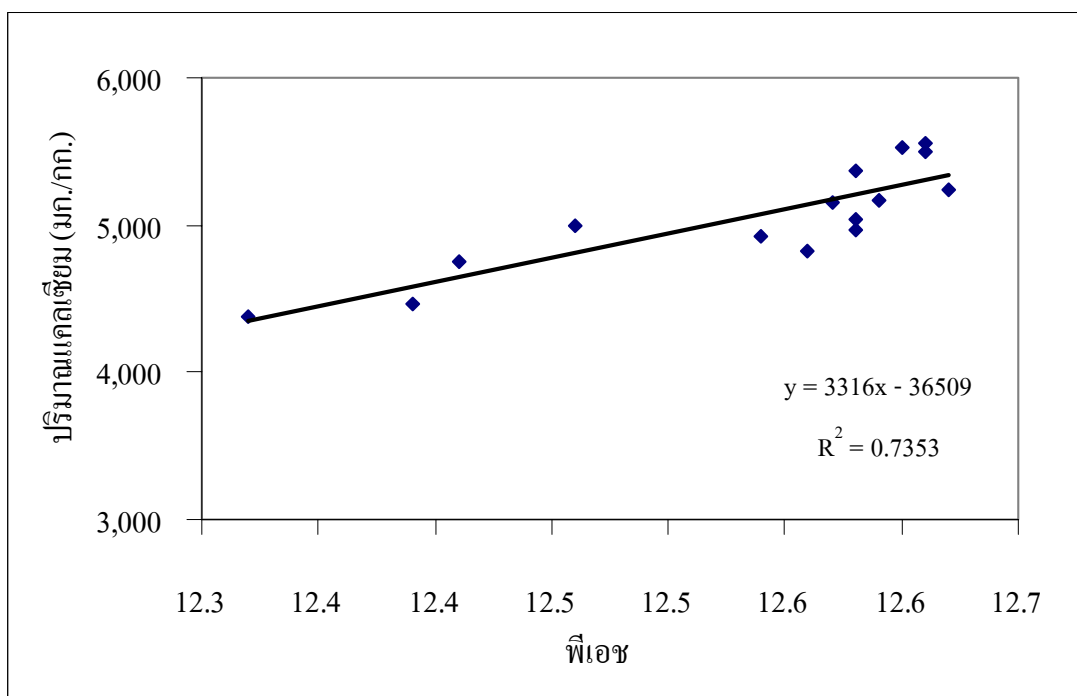
3) ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองด้วยปูนขาว

ข้อมูลตารางที่ 3-5 ของชุดการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยปูนขาว พบว่าพีเอชมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p\text{-value} < 0.01$) และยังมีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณสารหนูและปริมาณเหล็กที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} < 0.05$) และ 99% ($p\text{-value} < 0.01$) ตามลำดับ

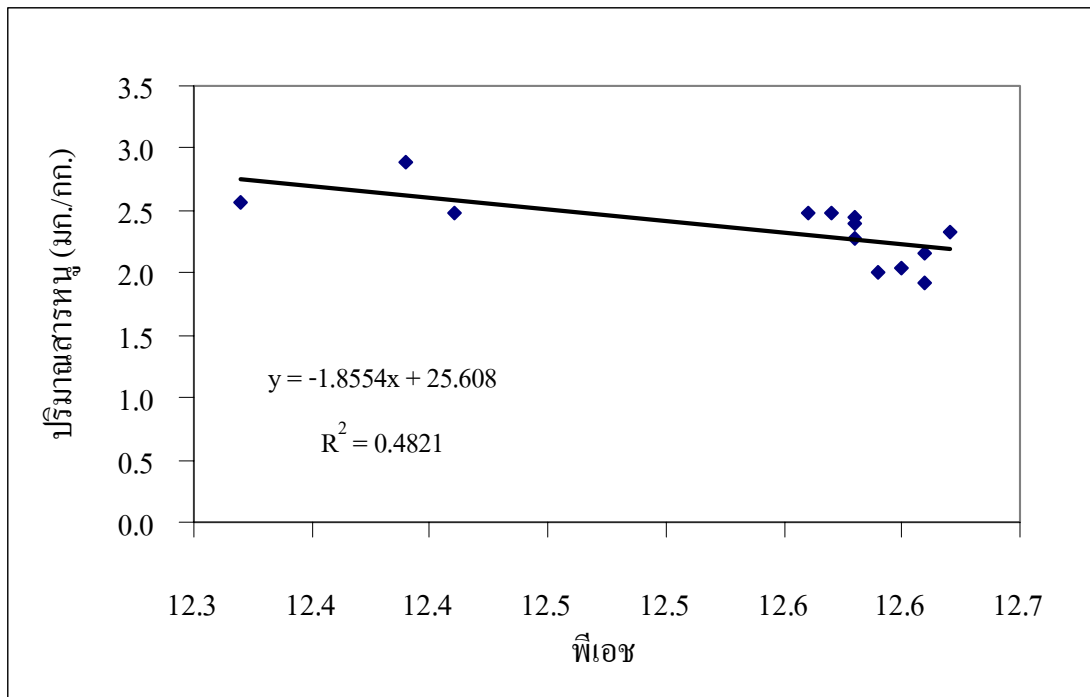
สำหรับความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงระหว่างพีเอชกับค่าการนำไฟฟ้า ($r=0.99$) และปริมาณแคลเซียม ($r=0.99$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมปูนขาวเพิ่มขึ้นในดินเหมืองแร่จะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในปูนขาวละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้มากขึ้นและส่งผลให้พีเอชของดินสูงขึ้นตามไปด้วย (ภาพประกอบที่3-31และภาพประกอบที่3-32) นอกจากนี้ความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงระหว่างพีเอชกับปริมาณสารหนู ($r=-0.90$)และปริมาณเหล็ก ($r=-0.99$) นั้น ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อพีเอชสูงและเกิดสถานะที่เป็นด่าง แคลเซียมไอออนจะสามารถดูดซับสารหนูได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณสารหนูในน้ำที่วัดได้มีค่าลดลง นอกจากนี้พีเอชที่สูงขึ้นยังทำให้เหล็กละลายน้ำได้น้อยลง ปริมาณเหล็กที่วัดได้จึงลดลงไปด้วย (ภาพประกอบที่3-33และภาพประกอบที่3-34)



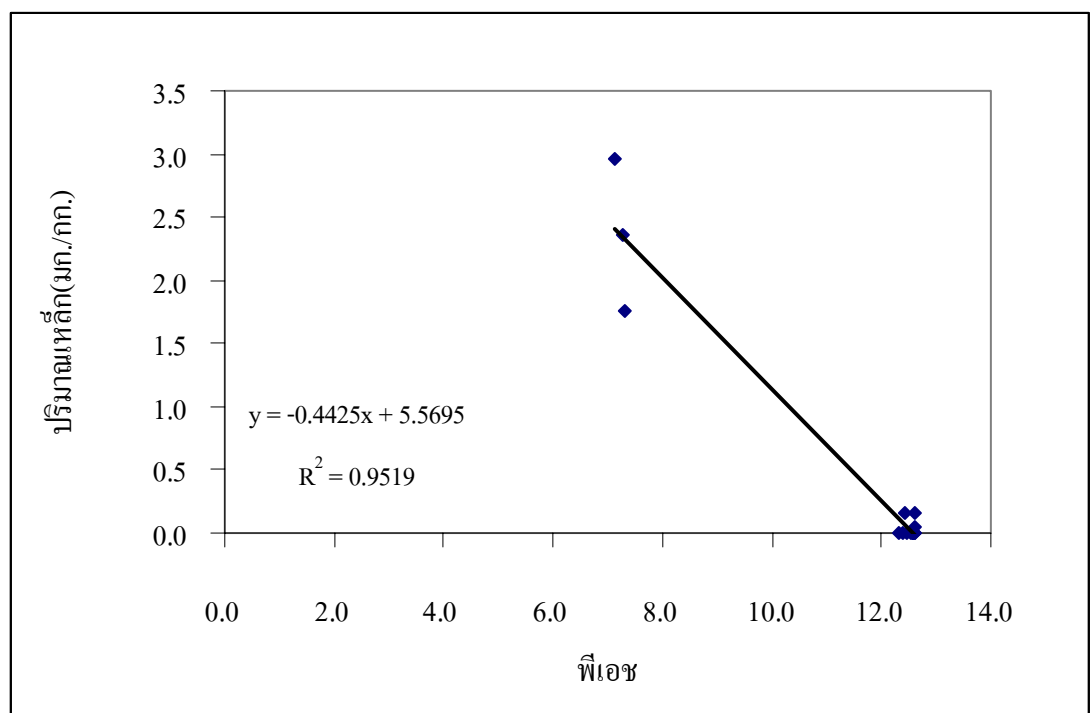
ภาพประกอบที่ 3-31 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับค่าการนำไฟฟ้าในชุดการทดลองด้วยปูนขาว



ภาพประกอบที่ 3-32 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณคลอโรฟิลล์ในชุดการทดลองด้วยปูนขาว



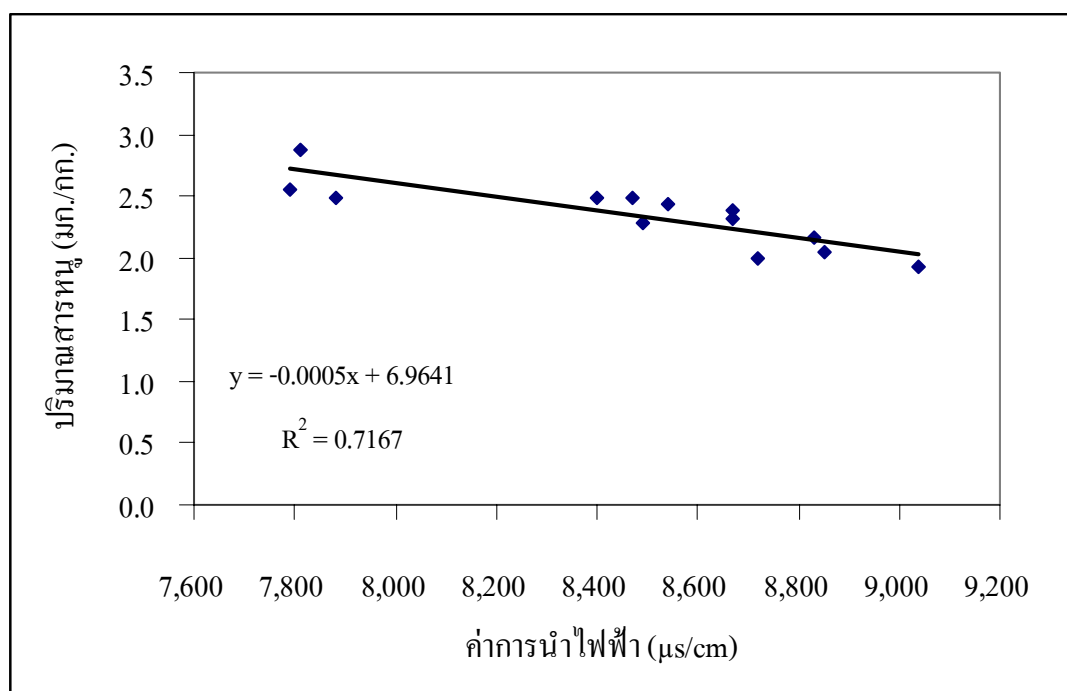
ภาพประกอบที่ 3-33 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณสารหนูในชุดการทดลองด้วยปูนขาว



ภาพประกอบที่ 3-34 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเหล็กในชุดการทดลองด้วยปูนขาว

ส่วนค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณสารหนูและปริมาณเหล็กที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (p-value < 0.01) และมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (p-value < 0.01)

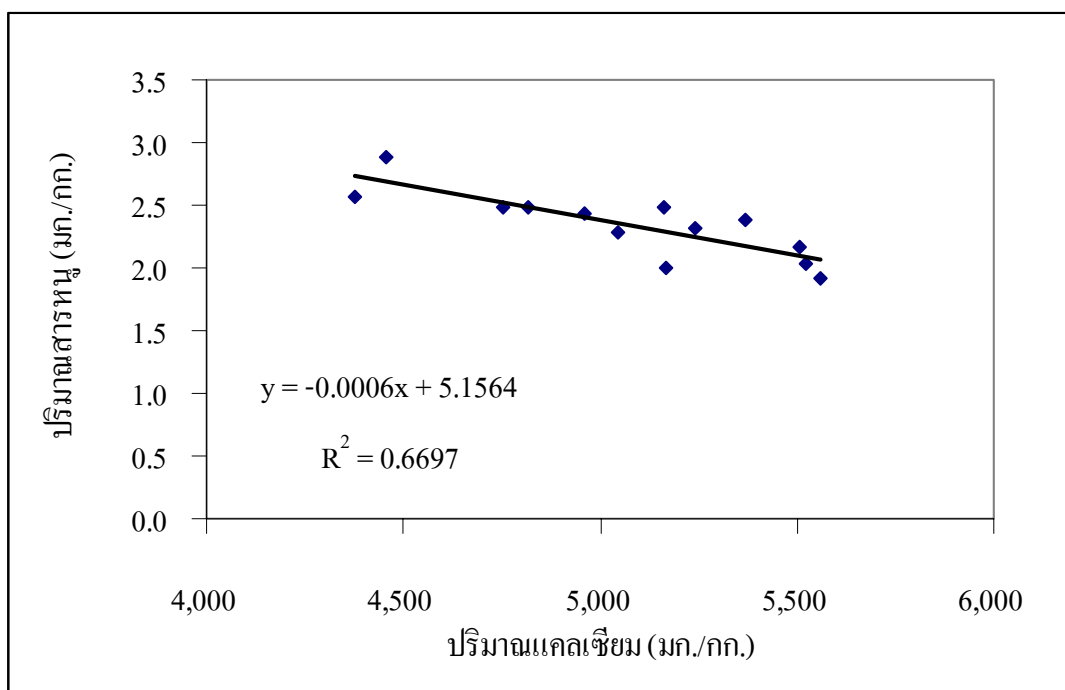
สำหรับความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณสารหนูและปริมาณเหล็ก ($r = -0.93$ และ -0.99 ตามลำดับ) และยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียม แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนขาว เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็น Ca^{+2} และ OH^+ ได้ดี ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นและแคลเซียมที่แตกตัวเหล่านี้ยังไปทำปฏิกิริยาการดูดซับกับสารหนูได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณสารหนูที่วัดได้มีค่าลดลง (ภาพประกอบที่ 3-35 ถึงภาพประกอบที่ 3-37)



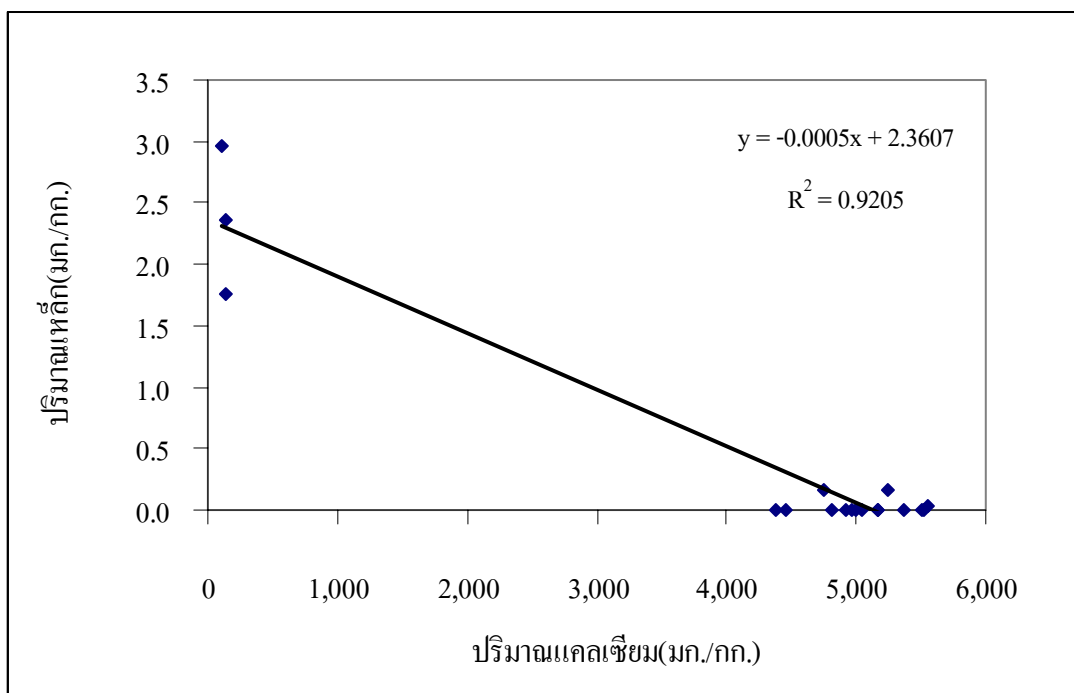
ภาพประกอบที่ 3-35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณสารหนูในชุดการทดลองด้วยปูนขาว

สารหนูมีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (p-value < 0.01) และเหล็กมีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (p-value < 0.01)

ส่วนความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงระหว่างสารหนูกับแคลเซียม ($r = -0.95$) และความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงระหว่างเหล็กกับแคลเซียม ($r = -0.99$) แสดงให้เห็นว่าสารหนูจะมีค่าลดลงเมื่อแคลเซียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนขาวจะทำปฏิกิริยาการดูดซับและการตกตะกอนกับสารหนูในสถานะที่เป็นต่างได้แคลเซียมอาร์ซีเนต ดังนั้นสารหนูที่วัดได้จึงมีปริมาณลดลง นอกจากนี้การแตกตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนขาว ทำให้พีเอชสูงขึ้น เหล็กจึงละลายในน้ำได้น้อยลง (ภาพประกอบที่ 3-38 และภาพประกอบที่ 3-39)



ภาพประกอบที่ 3-38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมกับปริมาณสารหนูในชุดการทดลองด้วยปูนขาว

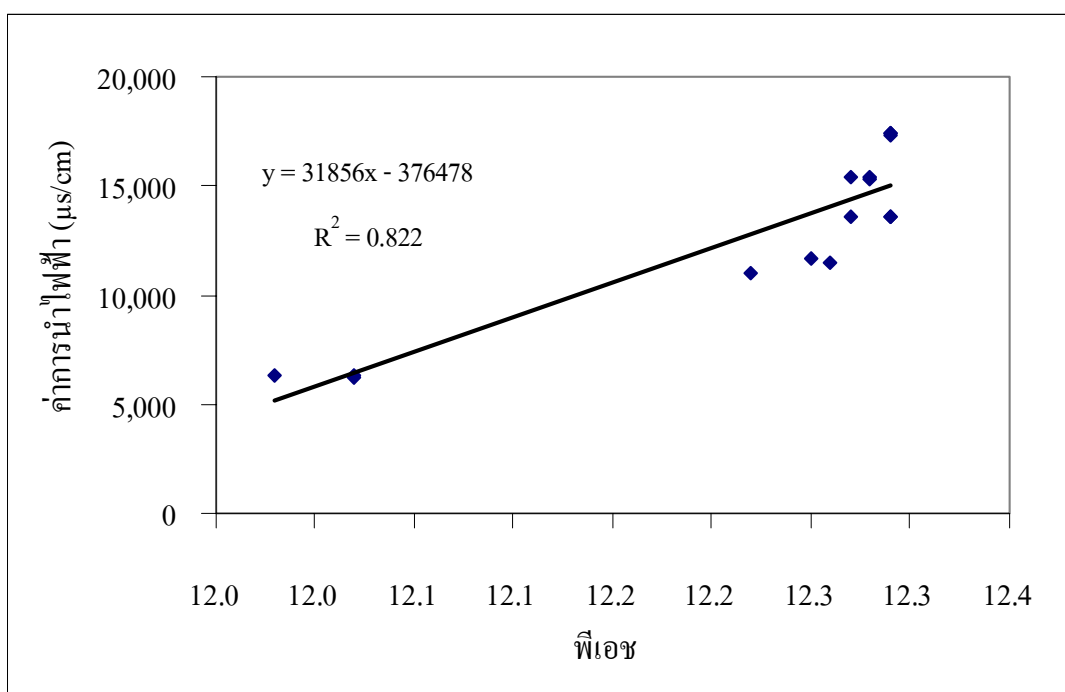


ภาพประกอบที่ 3-39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมกับปริมาณเมล็ดในชุดการทดลองด้วยปูนขาว

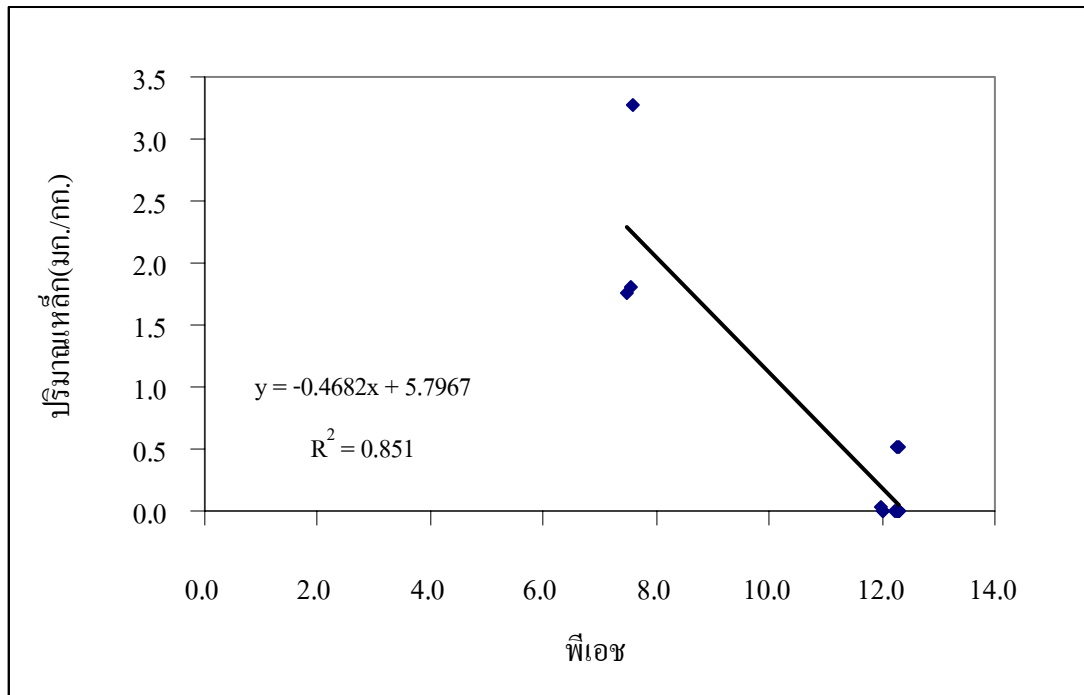
4) ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองด้วยถั่วลอย ข้อมูลในตารางที่ 3-5 ของชุดการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยถั่วลอย พบว่าพีเอชมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับค่าการนำไฟฟ้าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p\text{-value} < 0.05$) และมีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณเมล็ดที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p\text{-value} < 0.01$) สำหรับความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงระหว่างพีเอชกับค่าการนำไฟฟ้า ($r = 0.83$) และความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณเมล็ด ($r = -0.99$) แสดงให้เห็นว่าพีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันก็ทำให้ปริมาณเมล็ดลดลง (ภาพประกอบที่ 3-40 และภาพประกอบที่ 3-41)

ส่วนค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณสารหนูที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p\text{-value} < 0.01$) และมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p\text{-value} < 0.01$) ส่วนปริมาณสารหนูมีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p\text{-value} < 0.01$) สำหรับความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณสารหนู ($r = -0.98$) และมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงกับปริมาณแคลเซียม ($r = 0.99$) รวมถึงความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงระหว่างปริมาณสารหนูกับปริมาณแคลเซียม ($r = -0.98$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถั่วลอยในดินเหมืองแร่

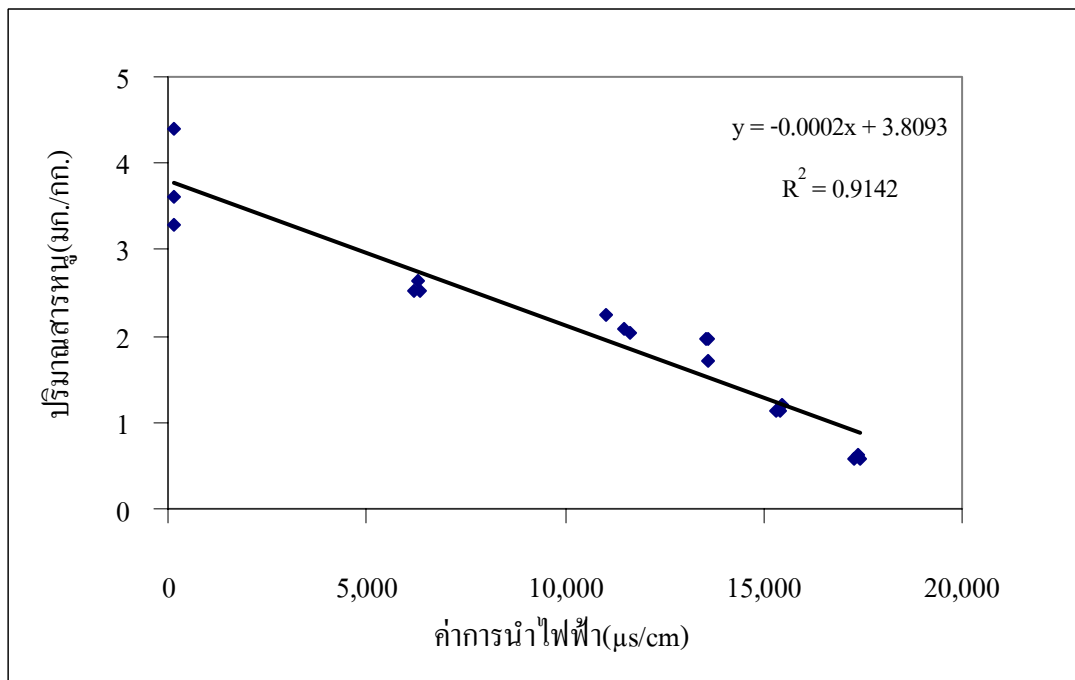
ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณแคลเซียมสูงขึ้นแต่ปริมาณสารหนูลดลงเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย โดยส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือปูนขาว Ca(OH)_2 ส่วน alkali (Na_2O และ K_2O), Cl และ SO_3 มีความเข้มข้นสูง (ภควัฒน์ แสนเจริญ, 2546) นอกจากนี้ องค์ประกอบทางแร่วิทยา จะประกอบไปด้วยผลึกแร่ของ KCl, NaCl, CaCO_3 , Ca(OH)_2 , CaSO_4 , CaCl_2 , CaClOH, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{K}_{86.5}\text{Al}_{86.5}\text{Si}_{105.5}\text{O}_{384}$ (พจนีย์ อินทสโร, 2545) ดังนั้นเมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวได้ดีและมี Ca^{+2} ออกมาในปริมาณมาก จึงทำให้สามารถดูดซับสารหนูได้ดี ดังนั้นสารหนูที่วัดได้จึงมีค่าลดลงเมื่อค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณแคลเซียมสูงขึ้น (ภาพประกอบที่ 3-42 ถึงภาพประกอบที่3-44)



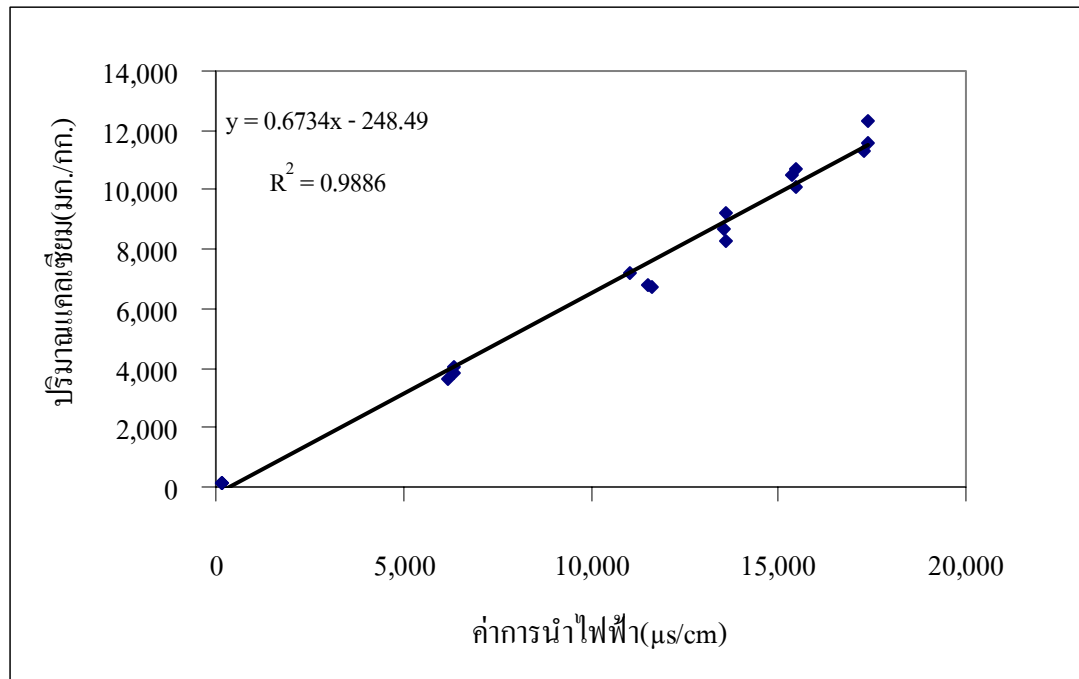
ภาพประกอบที่ 3-40 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับค่าการนำไฟฟ้าในชุดการทดลองด้วยเถ้าลอย



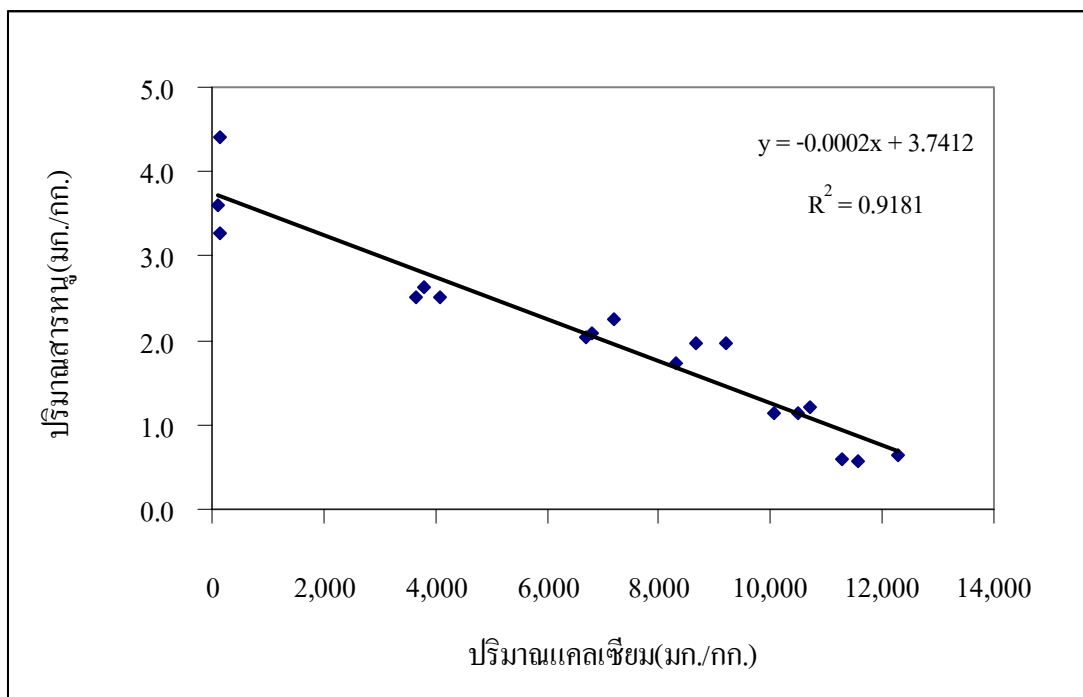
ภาพประกอบที่ 3-41 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเหล็กในชุดการทดลองด้วยถ้ำลอย



ภาพประกอบที่ 3-42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณสารหนูในชุดการทดลองด้วยถ้ำลอย



ภาพประกอบที่ 3-43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณคลอโรฟิลล์ในชุดการทดลองด้วยถั่วลอย



ภาพประกอบที่ 3-44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์กับปริมาณสารหนูในชุดการทดลองด้วยถั่วลอย

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของตัวแปรเพื่อหาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการดูดซับสารหนู พบว่าชุดดินปนเปื้อนสารหนูผสมดินลูกรัง ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์มากที่สุดกับชุดการทดลองนี้คือ พีเอช เห็นได้จากเมื่อพีเอชต่ำ ดินลูกรังจะสามารถลดปริมาณสารหนูได้ดีกว่าถ้ำลอย ส่วนในชุดดินปนเปื้อนสารหนูผสมถ้ำลอย พบว่าตัวแปรที่มีความสัมพันธ์มากที่สุดกับชุดการทดลองนี้คือ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณแคลเซียม เห็นได้จากเมื่อพีเอชสูงถ้ำลอยจะสามารถลดปริมาณสารหนูได้ดีกว่าดินลูกรัง รวมถึงการที่ถ้ำลอยมีองค์ประกอบของ Ca(OH)_2 อยู่มาก อีกทั้งยังมีองค์ประกอบทางแร่วิทยา ซึ่งประกอบไปด้วยผลึกแร่ของ KCl , NaCl , CaCO_3 , Ca(OH)_2 , CaSO_4 , CaCl_2 , CaClOH , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{K}_{86.5}\text{Al}_{86.5}\text{Si}_{105.5}\text{O}_{384}$ (พจน์ีย์ อินทสโร, 2545) นอกจากนี้ Ca(OH)_2 จะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง (Ricou *et al.*, 1999) จึงทำให้สามารถดูดซับสารหนูและลดปริมาณสารหนูที่ละลายออกมาได้ดีมาก