พลสุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

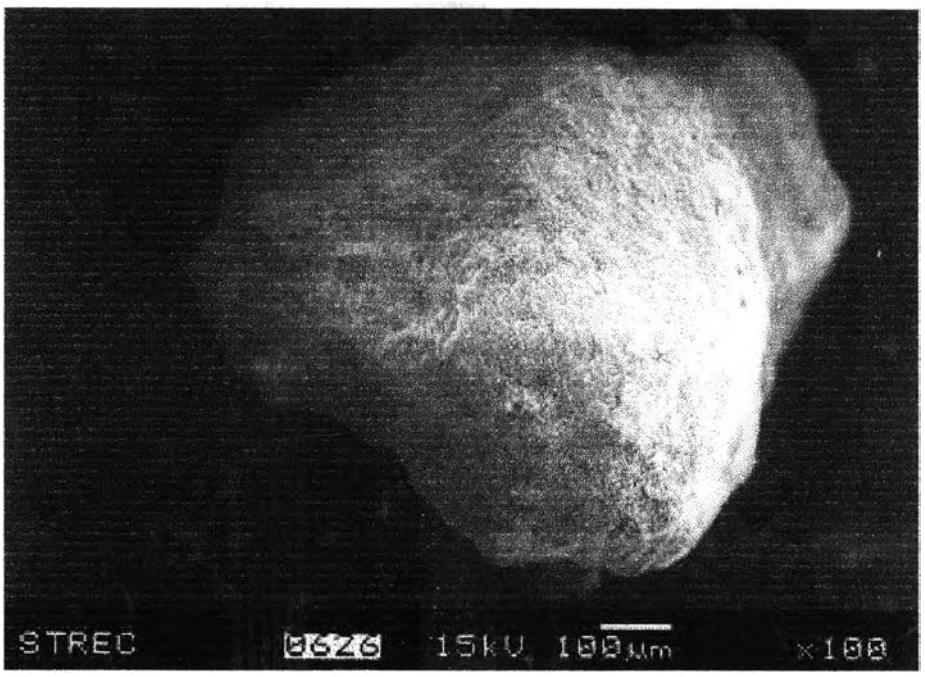
ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติของดินลูกรัง, สภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินลูกรังกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และทดสอบประสิทธิภาพของดินลูกรังในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

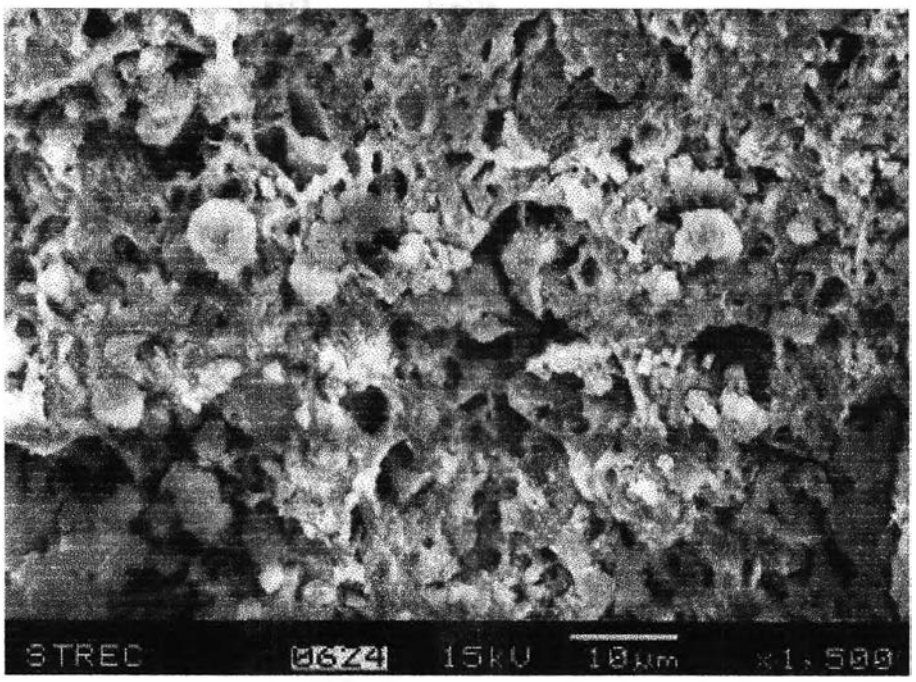
4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของดินลูกรัง

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินลูกรังขนาดอนุภาค 0.5-2.0 มิลลิเมตรแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าดินลูกรังมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ได้แก่ SiO_2, Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ในปริมาณ 40.52%, 37.50% และ 19.13% ตามลำดับ โดยมีสารประกอบออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบปะปนอยู่อย่างละเล็กน้อยในปริมาณ 0.09-1.07% ได้แก่ MnO, TiO_2, MgO, CaO, P_2O_6 และ K_2O พีเอชของดินลูกรังมีค่า 7.83 ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ของดินลูกรังมีค่า 4.75 เซ็นติโมลต่อกิโลกรัม มีพื้นที่ผิวสัมผัส 52.2258 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดโพรง 50.8127 อังสตรอม ทั้งนี้ สามารถยืนยันได้ว่าดินลูกรังที่ใช้ในการทดลองมีรูพรุนอยู่ทั่วไปจากภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเม็ดดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity; CEC) ของดินลูกรังเท่ากับ 4.75 เซ็นติโมลต่อกิโลกรัม จัดเป็นค่าที่ต่ำเนื่องจากดินลูกรังมีสารประกอบจำพวกเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักที่ให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนแก่ดิน โดยมีรวมกันอยู่ถึง 56.68% สารประกอบทั้งสองชนิดนี้ให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนแก่ดินได้น้อยเมื่อเทียบกับสารประกอบชนิดอื่น ๆ ที่ให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนแก่ดิน ทั้งนี้ สารประกอบและคอลลอยด์ทั่วไปที่ทำให้ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ได้แก่ ฮิวมัส, เวอร์มิคิวไลต์, มอนต์โมริลโลไนต์หรือสเม็กไทต์, อิลไลต์, คลอไรต์, เคโอลิไนต์ และเหล็กออกไซด์/อะลูมิเนียมออกไซด์ มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนประมาณ 200, 150, 100, 30, 30, 8 และ 4 เซ็นติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Brady, 1984; ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายเม็ดดินลูกรังด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนกำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของดินลูกรังด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอน กำลังขยาย 1,500 เท่า

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินลูกรัง

พารามิเตอร์	ปริมาณ
1. องค์ประกอบของดิน*	(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
1.1 SiO_2	40.52%
1.2 Fe_2O_3	37.50%
1.3 Al_2O_3	19.18%
1.4 MnO	1.07%
1.5 TiO_2	0.67%
1.6 MgO	0.44%
1.7 CaO	0.44%
1.8 P_2O_5	0.09%
1.9 K_2O	0.09%
2. ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	7.83
3. ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC)	4.75 $cmol_c/kg$
4. พื้นที่ผิวสัมผัส	52.2258 m^2/g
5. ขนาดโพรง	50.8127 A°

* วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry

เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของดินลูกรัง ซึ่งมีค่า 52.2258 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดโพรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50.8127 อังสตรอม พบว่าดินลูกรังมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่ำมากและมีขนาดโพรงที่เล็กเมื่อเทียบกับค่าพื้นที่ผิวสัมผัสและขนาดโพรงของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำ ถ่านกัมมันต์ทั่วไปจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดโพรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10-1,000 อังสตอม (Sawyer et. al., 1994)

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินลูกรังกำจัดโลหะหนัก

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ดินลูกรังกำจัดโลหะหนักแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 เป็นการศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก ขั้นที่ 2 เป็นการศึกษาปริมาณดินลูกรังที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก และขั้นที่ 3 เป็นการศึกษาค่าพีเอชและความ เข้มข้นที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการกำจัด ผลการทดลองที่ได้จะนำไปคำนวณให้เป็นค่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับปริมาณโลหะหนักเริ่มต้น อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการ

ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

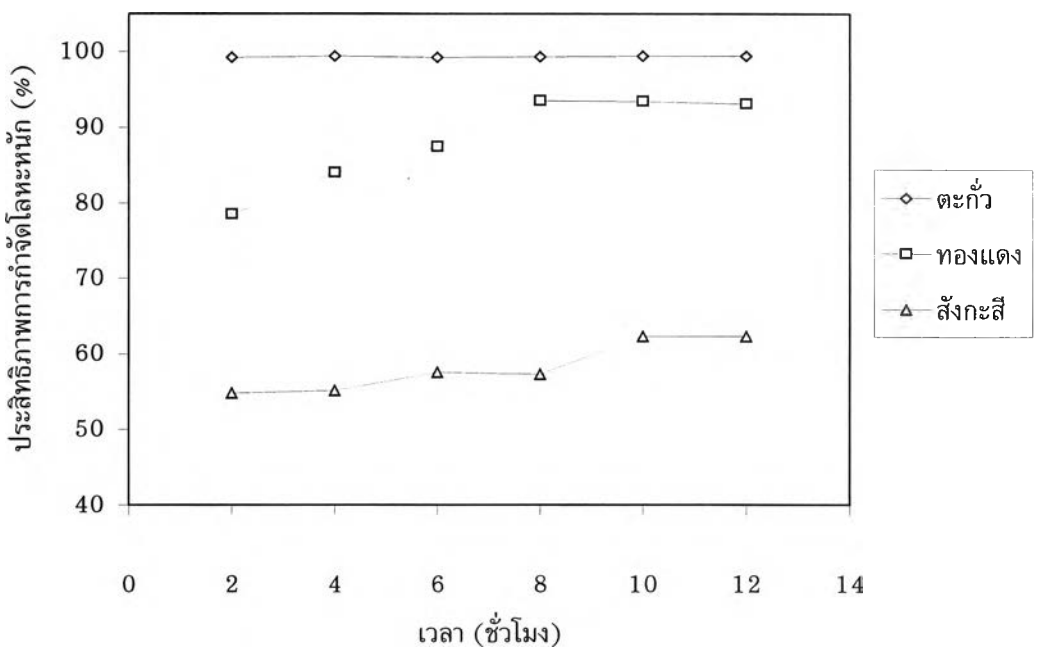
4.2.1 ผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้ดินลูกรัง 1.00 กรัม กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ปริมาตร 25 มิลลิลิตร พีเอช 6 ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดแสดงในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1.1 ถึง ข-1.3

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วมีค่าอยู่ในช่วง 99.22 - 99.46% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสโดยมีค่า 78.52%, 83.99% และ 87.46% ที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ แล้วจะเริ่มกำจัดได้ค่อนข้างคงที่โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด 93.47%, 93.43% และ 93.12% ที่ระยะเวลาสัมผัส 8, 10 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสเช่นกัน โดยมีค่า 54.81%, 55.16% และ 57.54% ที่ระยะเวลาสัมผัส 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากนั้นจะกำจัดได้ค่อนข้างคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง โดยกำจัดสังกะสีได้ 57.30% แล้วจึงเริ่มกำจัดได้เพิ่มขึ้นอีกครั้งโดยค่อนข้างคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 10 และ 12 ชั่วโมง ซึ่งกำจัดได้ 62.33% และ 62.28% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
2	99.22	78.52	54.81
4	99.46	83.99	55.16
6	99.24	87.46	57.54
8	99.37	93.47	57.30
10	99.43	93.43	62.33
12	99.43	93.12	62.28



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

เมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 4.2 มาแสดงให้อยู่ในรูปกราฟตามรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะเริ่มมีค่าสูงสุดและคงที่ที่ระยะเวลาหนึ่ง โดยที่ตะกั่วจะถูกกำจัดได้เร็วที่สุด รองลงมาคือทองแดง และสังกะสี ตามลำดับ ซึ่งการกำจัดตะกั่วจะเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง การกำจัดทองแดงจะเริ่มคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง และการกำจัดสังกะสีจะเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง จึงเลือกระยะเวลาต่าง ๆ ที่กล่าวมาเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดด้วยดินลูกรัง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าดินลูกรังสามารถกำจัดตะกั่วได้เป็นปริมาณมากที่สุดตลอดทุกช่วงระยะเวลาสัมผัสเมื่อเทียบกับการกำจัดทองแดงและสังกะสี โดยที่สังกะสีเป็นโลหะหนักที่ดินลูกรังกำจัดไปได้น้อยที่สุด ดินลูกรังจะกำจัดตะกั่วได้คงที่ในปริมาณที่สูงกว่า 99% ในทุกช่วงระยะเวลาสัมผัส ในขณะที่ดินลูกรังจะเริ่มกำจัดทองแดงได้คงที่โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด 93.47% ที่เวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง และดินลูกรังจะเริ่มกำจัดสังกะสีได้คงที่โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด 62.33% ที่เวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง

การดูดซับที่เกิดขึ้นบนสารประกอบออกไซด์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดินลูกรังโดยส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับทางเคมีซึ่งเป็นการดูดซับแบบเฉพาะ (Specific adsorption) บนสารประกอบออกไซด์ ไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสจัดได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักของดินที่มีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการดูดซับแบบเฉพาะ (Alloway, 1995) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการดูดซับแบบเฉพาะของโลหะหนักด้วยแร่ธาตุของดินจะเกี่ยวข้องกับการไฮโดรไลซิสของไอออนโลหะหนัก (Brummer, 1986) โลหะที่มีความสามารถในการสร้างตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภทไฮดรอกซีได้มากที่สุดจะถูกดูดซับแบบเฉพาะได้มากที่สุด (Kinniburg et al., 1976 ; McKenzie, 1980 ; Brummer, 1986 ; Alloway, 1995) ดังนั้น ค่าคงที่สมดุล (pK) ของปฏิกิริยา $M^{2+}+H_2O = MOH^{+}+H^{+}$ จะแสดงถึงพฤติกรรมการดูดซับโดยทั่วไปของโลหะชนิดต่าง ๆ การดูดซับแบบเฉพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าคงที่สมดุลลดลง หากโลหะชนิดใดมีค่าคงที่สมดุลเท่ากันการดูดซับแบบเฉพาะจะขึ้นอยู่กับขนาดไอออนของโลหะ ถ้าขนาดไอออนยิ่งมากก็จะยิ่งถูกดูดซับได้แรง (Brummer, 1986 ; Alloway, 1995) เมื่อพิจารณาค่าคงที่สมดุลของตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ซึ่งมีค่า 7.7, 7.7 และ 9.0 ตามลำดับ จะทำให้ทราบว่าสังกะสีถูกดูดซับได้น้อยที่สุดเนื่องจากมีค่าคงที่สมดุลสูงที่สุด สำหรับตะกั่วและทองแดงนั้น เมื่อพิจารณาขนาดไอออนของตะกั่วและทองแดงซึ่งมีรัศมีไอออนเท่ากับ 1.33 และ 0.71 อังสตรอมตามลำดับ (Cotton and Wilkinson, 1988) ทำให้ทราบว่าตะกั่วถูกดูดซับได้มากกว่าทองแดงเนื่องจากตะกั่วมีขนาดไอออนที่ใหญ่กว่าทองแดง จึงสามารถเรียงลำดับโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้จากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองที่ได้

4.2.2 ผลของปริมาณดินลูกรังที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรังปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 และ 3.00 กรัม กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 25 มิลลิลิตร พีเอช 6 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมตามผลที่ได้ จากข้อ 4.2.1 คือ ระยะเวลา 2 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่ว ระยะเวลา 8 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภททองแดง และระยะเวลา 10 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทสังกะสี ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2.1 ถึง ข-2.3

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินลูกรังที่ใช้ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ พบว่าการใช้ดินลูกรังปริมาณน้อย คือ 0.25 กรัมและ 0.50 กรัม จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้ปานกลาง คือ 54.93 % และ 69.02% ตามลำดับ เมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณ 1.00 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่าสูงถึง 92.59 % และเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณมาก คือ 2.00 กรัม และ 3.00 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่าสูงขึ้นอีกโดยให้ค่าถึง 99.45% และ 99.71% ตามลำดับ สังเกตได้ว่าการใช้ดินลูกรังปริมาณ 2.00 กรัมและ 3.00 กรัม จะให้ผลการกำจัดตะกั่วได้ไม่แตกต่างกันนัก โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้เกือบ 100% นั่นคือตะกั่วจะถูกกำจัดได้เกือบหมดเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณตั้งแต่ 2.00 กรัมขึ้นไป ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าดินลูกรังจำนวนตั้งแต่ 2.00 กรัมขึ้นไป เป็นปริมาณดินลูกรังที่มากเกินพอสำหรับการกำจัดตะกั่วในสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อพิจารณาการกำจัดทองแดงด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณน้อย คือ 0.25 กรัม และ 0.50 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะมีค่าต่ำกว่า 50% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ 33.45% และ 46.02% ตามลำดับ เมื่อใช้ดินลูกรัง 1.00 กรัม จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงขึ้นเป็น 61.07% และเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณมากคือ 2.00 กรัมและ 3.00 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะมีค่าสูงขึ้นจนเกิน 90% โดยมีค่า 90.24% และ 98.21% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินลูกรังที่ใช้และมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ดินลูกรัง 3.00 กรัม

ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินลูกรังที่ใช้เช่นกัน เมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณน้อย คือ 0.25 กรัมและ 0.50 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจะมีค่าต่ำกว่า 50% ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่

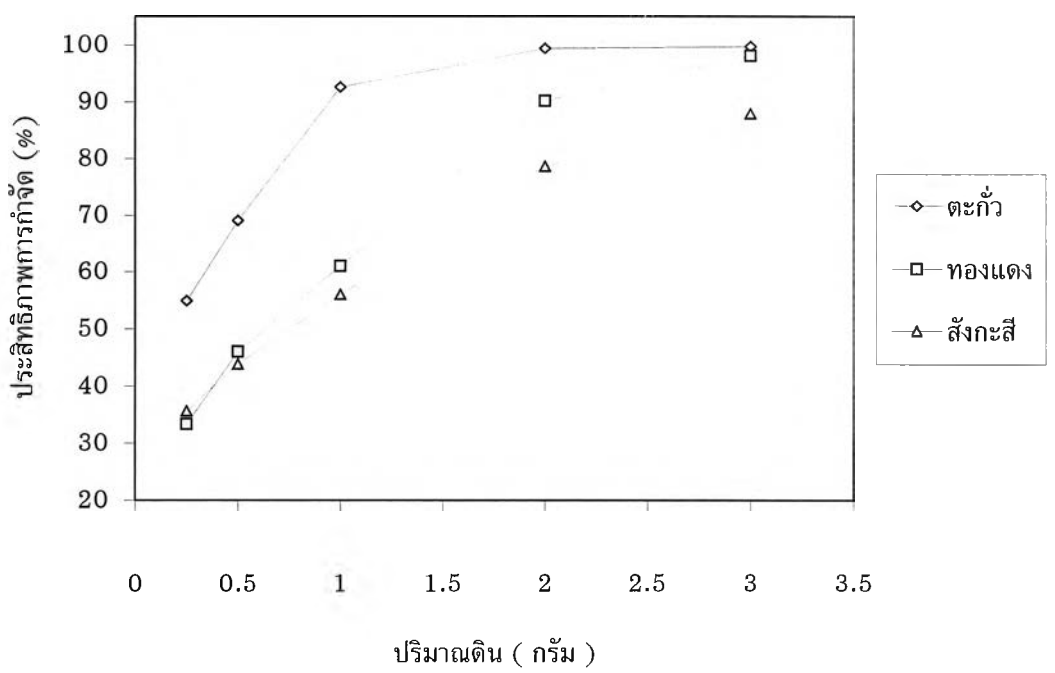
ปริมาณดินเดียวกัน เมื่อใช้ดินลูกรัง 1.00 กรัมจะกำจัดสังกะสีได้สูงขึ้นเป็น 56.10% และเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณมากคือ 2.00 กรัมและ 3.00 กรัมจะสามารถกำจัดสังกะสีไปได้ถึง 78.57% และ 87.93% ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจะมีค่าสูงขึ้นได้อีกหากมีการเพิ่มปริมาณดิน

เมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 4.3 มาแสดงให้อยู่ในรูปกราฟตามรูปที่ 4.4 เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ พบว่าตะกั่วจะถูกกำจัดไปได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นที่ปริมาณดินเดียวกันและเมื่อเรียงลำดับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจากมากไปน้อยสามารถเรียงได้ตามลำดับคือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี นอกจากนี้ยังพบว่าทองแดงจะถูกกำจัดไปได้ใกล้เคียงกับสังกะสีเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณ 0.25-0.50 กรัม และทองแดงจะถูกกำจัดได้ใกล้เคียงกับตะกั่วเมื่อใช้ดินลูกรังปริมาณ 3.00 กรัม

โดยทั่วไปการเลือกใช้ปริมาณสารดูดซับควรใช้สารดูดซับปริมาณน้อยที่สุดแต่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารถูกดูดซับได้สูงสุด ดังนั้นการพิจารณาเลือกปริมาณดินลูกรังที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักจึงควรเลือกปริมาณดินที่ไม่มากเกินสมดุลสำหรับการดูดซับโลหะหนักและไม่น้อยเกินไปจนให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดได้ต่ำ จากผลการทดลองพบว่าการใช้ดินลูกรังปริมาณตั้งแต่ 2.00 กรัมขึ้นไป แม้จะสามารถกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดได้สูงสุดแต่ก็อาจเป็นปริมาณดินที่มากเกินพอจนเกินสมดุลสำหรับการกำจัดตะกั่ว ในขณะที่ปริมาณดิน 0.25-0.50 กรัม แม้จะสามารถกำจัดตะกั่วได้ค่อนข้างสูงแต่สามารถกำจัดทองแดงและสังกะสีได้ต่ำกว่า 50% ปริมาณดินลูกรัง 1.00 กรัมจึงเป็นปริมาณดินที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากเป็นปริมาณดินต่ำที่สุดที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดได้สูงสุดโดยไม่ประสบปัญหาเรื่องปริมาณดินมากเกินสมดุล

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณดิน (กรัม)	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
0.25	54.93	33.45	35.72
0.50	69.02	46.02	43.86
1.00	92.59	61.07	56.10
2.00	99.45	90.24	78.57
3.00	99.71	98.21	87.93



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรังปริมาณต่าง ๆ

4.2.3 ผลของค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการกำจัดโลหะหนัก

การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรังปริมาณ 1.00 กรัมซึ่งเป็นปริมาณดินที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากข้อ 4.2.2 และใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากข้อ 4.2.1 คือ ระยะเวลา 2 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่ว ระยะเวลา 8 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภททองแดง และระยะเวลา 10 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทสังกะสี ทำการทดลองโดยการแปรผันความเข้มข้นและพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โดยที่โลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5, 10, 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 25 มิลลิลิตร แต่ละค่าความเข้มข้นจะปรับค่าพีเอช 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดในสภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดแสดงไว้ในตารางที่ 4.4-4.6 และ รูปที่ 4.5-4.7 โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3.1 ถึง ข-3.15

เนื่องจากการปรับค่าพีเอชมีผลทำให้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเปลี่ยนแปลงไป และยังมีผลให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักเมื่อปรับพีเอชไปจนถึงค่าที่สูง ดังนั้นการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจึงต้องคำนวณจากปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่จริงในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนที่จะมีการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรัง จากการทดลองพบว่าโลหะหนักทั้งสามชนิดมีการตกตะกอนเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปรับพีเอช ซึ่งสังเกตได้จากสีและความขุ่นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่จริงในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งแสดงถึงปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในรูปสารละลายจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน ชี้ให้เห็นว่าในสารละลายมีปริมาณโลหะหนักลดลงเนื่องจากมีการตกตะกอนไปบางส่วน โดยพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่วจะตกตะกอนที่พีเอชสูงกว่า 6 ในทุก ๆ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น น้ำเสียสังเคราะห์ประเภททองแดงจะมีการตกตะกอนที่พีเอชสูงกว่า 7 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 5 พีพีเอ็ม และ 10 พีพีเอ็ม แต่การตกตะกอนจะเกิดขึ้นทีพีเอชสูงกว่า 6 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง 25-100 พีพีเอ็ม ในขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทสังกะสีมีการตกตะกอนที่พีเอชสูงกว่า 7 ในทุก ๆ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่จริงในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการปรับพีเอชแสดงไว้ในภาคผนวก ข ภายในตารางที่ ข-3.1 ถึง ข-3.15

นอกจากนี้ จากการที่โลหะหนักซึ่งใช้ในการทดลองมีการตกตะกอนเกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นไปได้ว่าอาจมีการตกตะกอนของโลหะหนักเกิดขึ้นในขณะที่ดินลูกรังสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากดินลูกรังมีพีเอชเท่ากับ 7.83 การผสมดินลูกรังกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี

ค่าพีเอชต่างกันย่อมมีผลให้พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไป ดังที่ได้แสดงผลการตรวจวัดพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการดูดซับโลหะหนักด้วยดินลูกรังไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3.17 ถึง ข-3.19 และเมื่อพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปเป็นพีเอชในระดับที่เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักหลังจากการสัมผัสกับดินลูกรัง ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรังก็จะเป็นผลจากการดูดซับควบคู่กับการตกตะกอนของโลหะหนัก จึงกล่าวได้ว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรังจะเกิดขึ้นโดยกระบวนการดูดซับควบคู่กับกระบวนการตกตะกอนเมื่อส่วนผสมระหว่างน้ำเสียและดินลูกรังมีค่าพีเอชในระดับที่เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก

ผลการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นและพีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง มีดังนี้

4.2.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่ว

จากตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.4 ให้อยู่ในรูปกราฟได้แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นและพีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง พบว่าที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 พีพีเอ็ม ที่พีเอชในช่วง 3-6 ดินลูกรังจะสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงกว่า 95% แต่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะลดลงเล็กน้อยเมื่อพีเอชมีค่า 7 และ 9 โดยมีค่าประมาณ 93-94% ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่าสูงสุดเมื่อพีเอชมีค่า 8 โดยมีค่าเท่ากับ 96.16% เมื่อพิจารณาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็ม พบว่าในช่วงพีเอช 4-7 ดินลูกรังมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้ประมาณ 95-96% ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 พีพีเอ็มจะมีค่าสูงกว่า 99% ในช่วงพีเอช 4-8 โดยมีค่าสูงสุดในช่วงพีเอช 5-6 ซึ่งให้ค่าประมาณ 99.5% เมื่อพิจารณาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม พบว่าที่พีเอชตั้งแต่ 4-9 ดินลูกรังจะมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้เกิน 95% โดยให้ค่าสูงสุดประมาณ 98% ในช่วงพีเอช 7-8 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็มจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 95.56 % ที่ พีเอช 7 จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะลดลงเล็กน้อยที่พีเอช 8 และ 9 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่พีเอช 3 มักจะมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่พีเอชอื่น ๆ โดยเป็นระดับพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้ต่ำที่สุดอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 25, 50 และ 100

พีพีเอ็ม โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเท่ากับ 86.04%, 68.72% และ 66.16% ตามลำดับ รวมทั้งยังสังเกตได้ว่าเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 พีพีเอ็ม และ 10 พีพีเอ็ม ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อพีเอชมีค่าตั้งแต่ 7 ขึ้นไป แต่เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม จะมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมีค่าลดลงเล็กน้อยที่พีเอชในช่วง 8-9

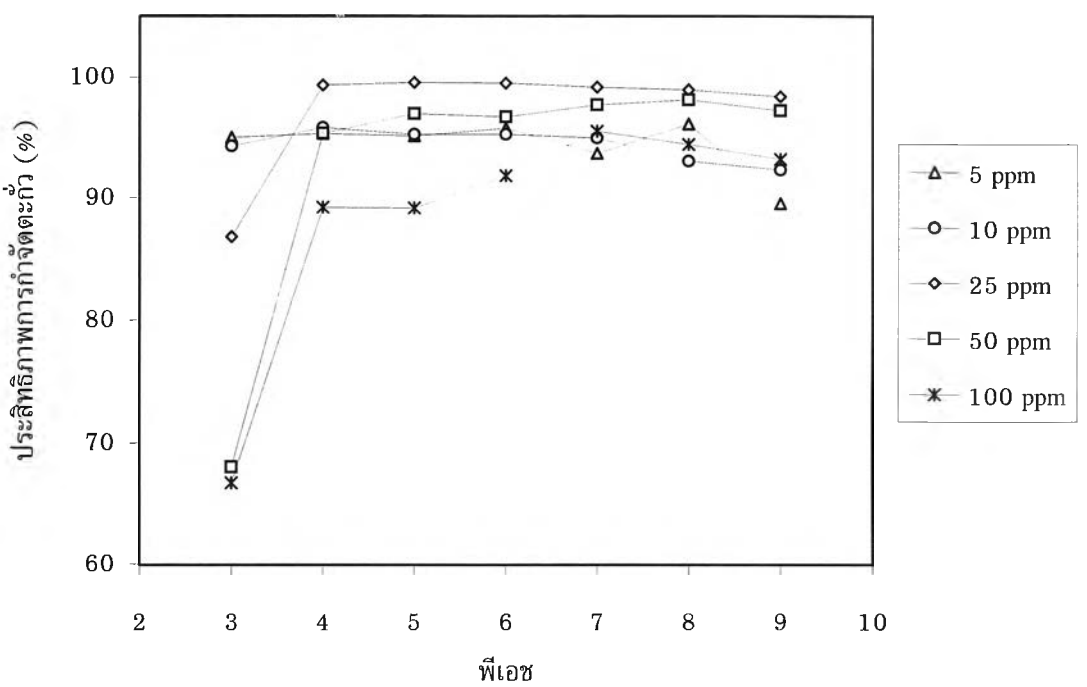
อย่างไรก็ดี จากการที่น้ำเสียสังเคราะห์จะเริ่มมีการตกตะกอนของตะกั่วเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 6-7 จึงเป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการปรับพีเอช (แสดงเป็นค่า Initial Concentration ในภาคผนวก ข ภายในตารางที่ ข-3.1 ถึง ข-3.5) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากในช่วงพีเอช 7 - 9 โดยมีค่าลดลงตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่พีเอชตั้งแต่ 7-9 จึงเป็นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่มิได้มาจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ค่าเดียวกันกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่พีเอช 3-6 ในทุก ๆ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำหนดขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในช่วงพีเอช 7-9 มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในช่วงพีเอช 3-6 เพื่อเลือกหาพีเอชที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นการพิจารณาเลือกพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วจึงพิจารณาได้ในช่วงพีเอช 3-6 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วใกล้เคียงกันโดยมีค่าเป็นไปตามความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำหนดไว้คือ 5, 10, 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยดินลูกรังในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เพื่อเปรียบเทียบหาความเข้มข้นเริ่มต้นและพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงสุด พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงสุดเป็นส่วนใหญ่คือ 25 พีพีเอ็ม เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงถึง 98-99% ที่ทุกค่าพีเอช ยกเว้นที่พีเอช 3 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ 86.83% และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่พีเอชต่าง ๆ พบว่าพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงสุดคือพีเอช 6 เนื่องจากเป็นพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงสุดในเกือบทุกค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ แม้พีเอช 7-9 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูง แต่ก็ไม่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่พีเอชอื่น ๆ ได้เนื่องจากเกิดการตกตะกอนในระหว่างการปรับพีเอช ทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ (%)				
	5 พีพีเอ็ม	10 พีพีเอ็ม	25 พีพีเอ็ม	50 พีพีเอ็ม	100 พีพีเอ็ม
3	95.01	94.29	86.83	68.13	65.81
4	95.33	95.85	99.36	95.35	89.25
5	95.16	95.28	99.58	97.00	89.20
6	95.78	95.29	99.52	96.75	91.86
7	93.72*	94.99*	99.21*	97.76*	95.56*
8	96.16*	93.08*	99.01*	98.18*	94.46*
9	94.15*	92.36*	98.44*	97.27*	93.25*

* ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนของตะกั่วเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

4.2.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภททองแดง

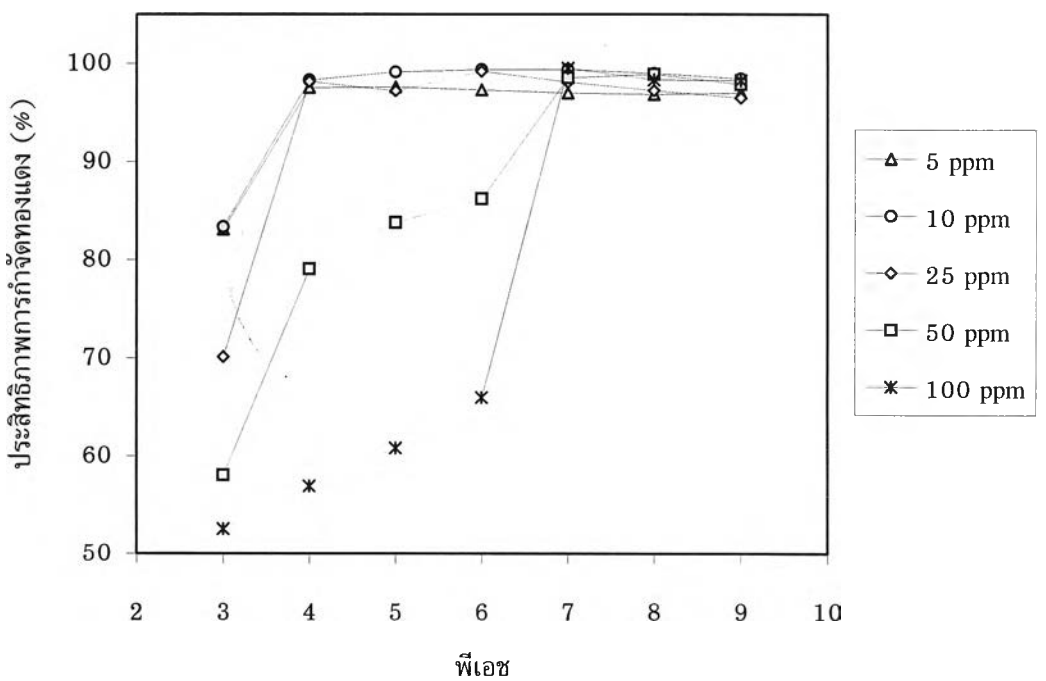
ในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.5 ให้อยู่ในรูปกราฟ ได้แสดงประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นและพีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 พีพีเอ็ม ที่พีเอช 4-9 ดินลูกรังจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้ 96.83-97.62% ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่พีเอช 3 จะมีค่าต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ 83.13% เมื่อพิจารณาการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็ม พบว่าในช่วงพีเอช 5-7 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงกว่า 99% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดอยู่ที่พีเอช 3 ซึ่งเท่ากับ 83.47% ประสิทธิภาพของดินลูกรังในการกำจัดทองแดงเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 25 พีพีเอ็ม มีค่าสูงสุดที่พีเอช 7 โดยมีค่า 98.09% และมีค่าต่ำสุดที่พีเอช 3 โดยมีค่า 70.51% ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่พีเอชอื่น ๆ มีค่าประมาณ 96-98% เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม พบว่าในช่วงพีเอช 3-8 ดินลูกรัง จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้สูงขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่พีเอช 3 ซึ่งเท่ากับ 58.05% และมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่พีเอช 8 ซึ่งเท่ากับ 98.88% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม ในช่วงพีเอช 3-7 จะมีค่าสูงขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดที่พีเอช 3 ซึ่งเท่ากับ 52.56% และมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่พีเอช 7 ซึ่งเท่ากับ 99.52% นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าพีเอช 3 เป็นระดับพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้ต่ำที่สุดในทุก ๆ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลง กล่าวคือเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำจะมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่สูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ๆ โดยพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้สูงที่สุดคือความเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้โดยรวมแล้วสูงกว่าที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นอื่น ๆ โดยให้ค่าเกิน 99 % ในช่วงพีเอช 5-7 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่กว้างกว่าช่วงพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้สูงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นอื่น ๆ ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ในการกำจัดทองแดงด้วยดินลูกรังคือความเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ (%)				
	5 พีพีเอ็ม	10 พีพีเอ็ม	25 พีพีเอ็ม	50 พีพีเอ็ม	100 พีพีเอ็ม
3	83.13	83.47	70.51	58.05	52.56
4	97.53	98.51	97.05	79.05	56.94
5	97.62	99.18	97.94	83.80	60.84
6	97.25	99.39	97.09	86.23	65.97
7	97.00	99.40	98.09*	98.54*	99.52*
8	96.83*	98.98*	97.24*	98.88*	98.32*
9	96.99*	98.44*	96.47*	97.88*	98.26*

* ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนของทองแดงเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยดินลูกรัง

เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์เกิดการตกตะกอนของทองแดงในช่วงพีเอช 7-9 เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงหลังการปรับพีเอช (แสดงเป็นค่า Initial Concentration ในภาคผนวก ข ภายในตารางที่ ข-3.6 ถึง ข-3.10) เปลี่ยนแปลงไปมากและไม่เป็นไปตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนด คือ 5, 10, 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม โดยที่การตกตะกอนของทองแดงจะเกิดขึ้นที่พีเอช 8-9 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 พีพีเอ็ม และ 10 พีพีเอ็ม แต่จะเกิดการตกตะกอนของทองแดงที่พีเอช 7-9 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 25-100 พีพีเอ็ม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อพิจารณาเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ในการกำจัดทองแดงด้วยดินลูกรังจึงควรพิจารณาที่ระดับพีเอชซึ่งไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช โดยสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเดียวกันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น และพบว่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดทองแดงด้วยดินลูกรังคือพีเอช 6-7 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงสุด โดยพีเอช 6 จะเป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดทองแดงด้วยดินลูกรังเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงคือ 25-100 พีพีเอ็ม ในขณะที่พีเอช 7 เป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดทองแดงด้วยดินลูกรังเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่ำคือ 5-10 พีพีเอ็ม

4.2.3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ประเภทสังกะสี

ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.6 ให้อยู่ในรูปกราฟ ได้แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นและพีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง พบว่าที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ 5 พีพีเอ็ม ที่พีเอช 4-9 ดินลูกรังจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงได้ประมาณ 97-98% ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่พีเอช 3 จะมีค่าต่ำที่สุดโดยมีค่า 91.34% เมื่อพิจารณาการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็ม พบว่าในช่วงพีเอช 5-9 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในช่วง 94-98% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดอยู่ที่พีเอช 3 ซึ่งเท่ากับ 61.76% ประสิทธิภาพของดินลูกรังในการกำจัดสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 25 พีพีเอ็ม จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้นโดยมีค่าต่ำสุดที่พีเอช 3 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 64.29% และมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่พีเอช 8-9 โดยมีค่าประมาณ 96% เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้นโดยมีค่าต่ำสุดที่พีเอช 3 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 56.95% แต่จะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีสูงสุดที่พีเอช 9 ซึ่งเท่ากับ 97.65% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม มีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจะมีค่าต่ำสุดที่พีเอช 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.84% และ

มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่พีเอช 9 ซึ่งเท่ากับ 97.60% นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าพีเอช 3 เป็นระดับพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีได้ต่ำที่สุดในทุก ๆ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลง กล่าวคือ เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่สูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ๆ โดยพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีได้สูงสุดคือความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีได้โดยรวมแล้วสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นอื่น ๆ โดยให้ค่าเกิน 90 % ในทุกพีเอช ดังนั้น ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ในการกำจัดสังกะสีด้วยดินลูกรังคือความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม

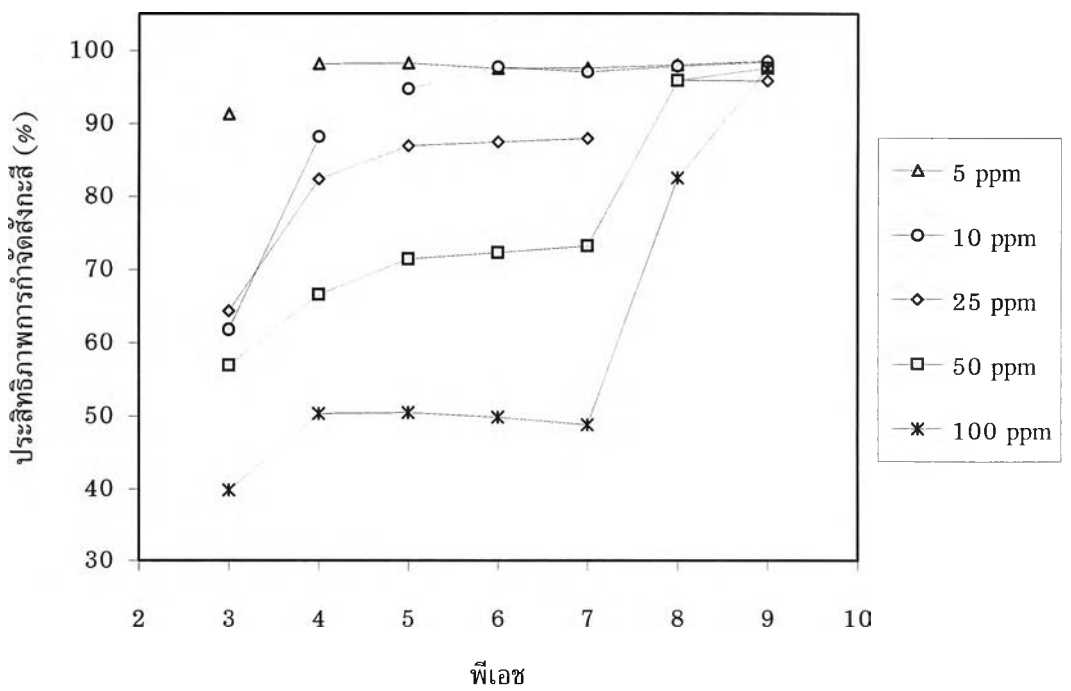
จากการที่น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มตกตะกอนที่พีเอชระหว่าง 7-8 เป็นสาเหตุให้น้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 8-9 มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีหลังการปรับพีเอช (แสดงเป็นค่า Initial Concentration ในภาคผนวก ข ภายในตารางที่ ข-3.11 ถึง ข-3.15)เปลี่ยนแปลงไปมากและไม่เป็นไปตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนด คือ 5, 10, 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีเพื่อพิจารณาเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ในการกำจัดสังกะสีด้วยดินลูกรัง จึงควรพิจารณาที่ระดับพีเอชซึ่งไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอชซึ่งได้แก่พีเอช 3-7 ที่สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเดียวกันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสังกะสีด้วยดินลูกรังคือพีเอช 6-7 ซึ่งเป็นพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงที่สุดในทุกค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนดขึ้นของน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายที่ความเข้มข้นและพีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง ทำให้ทราบว่าพีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก โดยที่โลหะหนักชนิดต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาจะถูกดูดซับได้ด้วยดินลูกรังเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชตั้งแต่ 3 ขึ้นไปด้วยแนวโน้มของการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามค่าพีเอช ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการดูดซับขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายโดยจะมีผลต่อประจุบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์(%)				
	5 พีพีเอ็ม	10 พีพีเอ็ม	25 พีพีเอ็ม	50 พีพีเอ็ม	100 พีพีเอ็ม
3	91.34	61.76	64.29	56.95	39.84
4	98.20	88.22	82.39	66.56	50.37
5	98.30	94.81	86.98	71.44	50.51
6	97.59	97.76	87.51	72.35	49.88
7	97.65	97.10	87.99	73.27	48.87
8	98.08*	97.88*	96.01*	95.96*	82.58*
9	98.60*	98.49*	95.89*	97.65*	97.60*

* ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนของสังกะสีเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นผลจากกระบวนการดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นจากแรงแวนเดอร์วาลส์ทำให้ไอออนของโลหะหนักถูกดูดติดอยู่บนพื้นผิวและบริเวณรูพรุนของดินลูกรัง การดูดซับทางเคมีซึ่งอาศัยกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นตามกระบวนการทางเคมี กล่าวคือ เมื่อสารประกอบออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของดินลูกรังสัมผัสกับน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายในสารละลาย ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากโมเลกุลของน้ำที่ล้อมอยู่รอบสารประกอบออกไซด์จะเคลื่อนย้ายมาสู่ออกซิเจนที่ประกอบอยู่ตรงชั้นผิวของสารประกอบออกไซด์ ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถรับและปล่อยไฮโดรเจนไอออนได้ ดังสมการ (Leckie, 1986 ; Dzombak and Morel, 1990)

$$SOH \longleftrightarrow SO^- + H^+ \quad \text{.....(1)}$$

$$SOH + H^+ \longleftrightarrow SOH_2^+ \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่ SOH คือ ผิวหน้าของสารประกอบออกไซด์ในดินลูกรังหลังจากสัมผัสกับน้ำ

โลหะหนักที่มีอยู่ในสารละลายที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ล้วนเป็นโลหะหนักชนิดไดวาเลนซ์ สามารถแตกตัวอยู่ในรูปต่าง ๆ คือ M^{2+}, $M(OH)^+$ และ $M(OH)_2$ เมื่อ M คือโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ รูปของโลหะหนักที่กล่าวมาจะเกิดขึ้นตามปฏิกิริยา

$$M^{2+} + H_2O \longleftrightarrow MOH^+ + H^+ \quad \text{.....(3)}$$

$$MOH^+ + H_2O \longleftrightarrow M(OH)_2 + H^+ \quad \text{.....(4)}$$

การแตกตัวที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยที่ M^{2+} จะพบได้มากที่สุดเมื่อพีเอชของสารละลายเป็นกรด และ $M(OH)_2$ จะพบมากที่สุดเมื่อพีเอชของสารละลายเป็นเบส ดังนั้นจึงสามารถอธิบายเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสของสารประกอบออกไซด์ในดินลูกรังได้ว่า ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด โลหะหนักในสารละลายจะอยู่ในรูปที่เป็นไอออนอิสระคือ M^{2+} ได้แก่ Pb^{2+}, Cu^{2+} และ Zn^{2+} ต่อมาเมื่อมีการสูญเสียไฮโดรเจนไอออนที่ผิวของ SOH จะทำให้เกิดปฏิกิริยาดูดซับบนผิวของสารประกอบออกไซด์ จึงเกิด SOM เป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดหลักบนผิวของสารประกอบออกไซด์ การดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการ (McKenzie, 1980 ; Aualiitia and Pickering, 1986 ; Leckie, 1986)

$$SOH + M^{2+} \longleftrightarrow SOM + H^{+} \quad \text{.....(5)}$$

เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าสูงขึ้น โลหะหนักในรูปของ MOH^{+} ได้แก่ $PbOH^{+}$, $CuOH^{+}$ และ $ZnOH^{+}$ จะเป็นรูปที่มีอยู่มากในสารละลาย เมื่อเกิดการดูดซับจะมี SOMOH เป็นสารเชิงซ้อนชนิดหลักบนผิวของสารประกอบออกไซด์ในดินลูกรัง การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (McKenzie, 1980 ; Leckie, 1986)

$$SOH + H_2O + M^{2+} \longleftrightarrow SOMOH + 2H^{+} \quad \text{.....(6)}$$

ในสารละลายที่มีพีเอชเป็นเบส จะมีโลหะหนักในรูป $M(OH)_2$ ได้แก่ $Pb(OH)_2$, $Cu(OH)_2$ และ $Zn(OH)_2$ เกิดขึ้นในสารละลาย เมื่อมีปฏิกิริยาดูดซับเกิดขึ้นจะมี $SOM(OH)_2$ เป็นสารเชิงซ้อนที่ผิวของสารประกอบออกไซด์ในดินลูกรัง เป็นไปตามสมการ (McKenzie, 1980 ; Leckie, 1986)

$$SOH + 2H_2O + M^{2+} \longleftrightarrow SOM(OH)_2 + 3H^{+} \quad \text{.....(7)}$$

ปฏิกิริยาดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อพีเอชเป็นกรดจะเริ่มจากปฏิกิริยาตามสมการ (5) เมื่อพีเอชสูงขึ้นจะเริ่มมีปฏิกิริยาดูดซับตามสมการ (6) เกิดขึ้น จนเมื่อพีเอชเป็นเบสจะมีปฏิกิริยาตามสมการ (7) เกิดขึ้นตามมา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ (7) อาจทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักในรูป $M(OH)_2$ ได้แก่ $Pb(OH)_2$, $Cu(OH)_2$ และ $Zn(OH)_2$ ในขณะเกิดปฏิกิริยาดูดซับ ซึ่งเป็นการตกตะกอนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสซึ่งเป็นผลจากการเหนี่ยวนำตรงบริเวณผิวหน้า (Surface-induced interfacial precipitation) หรือปฏิกิริยาไฮโดร-ลิซิสของไอออนที่ถูกดูดติดอยู่บนผิวของสารประกอบออกไซด์ (McKenzie, 1980) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ได้เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงถึงระดับที่เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักเป็นผลมาจากการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน

พีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีอยู่ในดินลูกรัง โดยที่การดูดซับจะยิ่งเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดูดติดอยู่ที่ผิวของสารประกอบออกไซด์ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงจะถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายและเป็นจำนวนมาก ในขณะที่สารละลายที่มีพีเอชต่ำจะเกิดการดูดซับโลหะหนักบนสารประกอบออกไซด์ได้ไม่ดีนัก เนื่องจากในสารละลายที่มีพีเอชต่ำจะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมากทำให้โลหะหนักในรูปไอออนอิสระในสารละลายที่เป็นกรดมีความสามารถในการดูดติดกับผิวของออกไซด์

ได้ต่ำ เพราะไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่เป็นจำนวนมากจะไปแข่งขันกับไอออนของโลหะหนักในการดูดติดกับผิวของสารประกอบออกไซด์ จึงมีการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นได้น้อย

4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชต่างๆ โดยใช้ดินลูกรังปริมาณ 1.00 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณดินที่เหมาะสม และใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมได้แก่ ระยะเวลา 2 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทตะกั่ว ระยะเวลา 8 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภททองแดง และระยะเวลา 10 ชั่วโมงสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทสังกะสี แสดงไว้ในตารางที่ 4.7-4.11 และรูปที่ 4.8-4.12 ทั้งนี้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักอาจพิจารณาได้ในช่วงพีเอชที่น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นไม่เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักหลังการปรับพีเอช ซึ่งจะเป็นพีเอชที่น้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภทมีความเข้มข้นเริ่มต้นใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำหนดไว้ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5, 10, 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม

ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.7 ให้อยู่ในรูปกราฟ ได้แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีด้วยดินลูกรังเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 พีพีเอ็ม พบว่าที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็นพีเอช 4 แต่ลำดับการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดที่พีเอชต่าง ๆ ตั้งแต่พีเอช 4 ขึ้นไป จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจากมากไปน้อยคือ สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว จึงกล่าวได้ว่าดินลูกรังมีประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีได้สูงกว่าตะกั่วและทองแดงเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 พีพีเอ็ม เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีสูงกว่าตะกั่วและทองแดงในช่วงพีเอชที่กว้าง ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 90-98% ในทุก ๆ พีเอช ยกเว้นประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่พีเอช 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 88.13%

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีด้วยดินลูกรังเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็ม แสดงผลไว้ในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.8 ให้อยู่ในรูปกราฟ พบว่าที่พีเอช 3 ดินลูกรังสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง และสังกะสี ตามลำดับ เมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลงไปเป็น 4 และ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะเปลี่ยนแปลงไป โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้เป็น ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6-9 ลำดับของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะ

เปลี่ยนแปลงไปอีกครั้ง โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้เป็น ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว แต่ทว่าในช่วงพีเอช 7-9 มีการตกตะกอนของโลหะหนักเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละประเภทในช่วงพีเอช 7-9 ที่นำมาเปรียบเทียบกัน เป็นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่างกัน ดังนั้นลำดับของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่พีเอช 7-9 จากผลการทดลองที่ได้อาจไม่ใช่ลำดับที่แท้จริง อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าดินลูกรังมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงกว่าตะกั่วและสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 พีพีเอ็ม เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและสังกะสีในช่วงพีเอชที่กว้าง

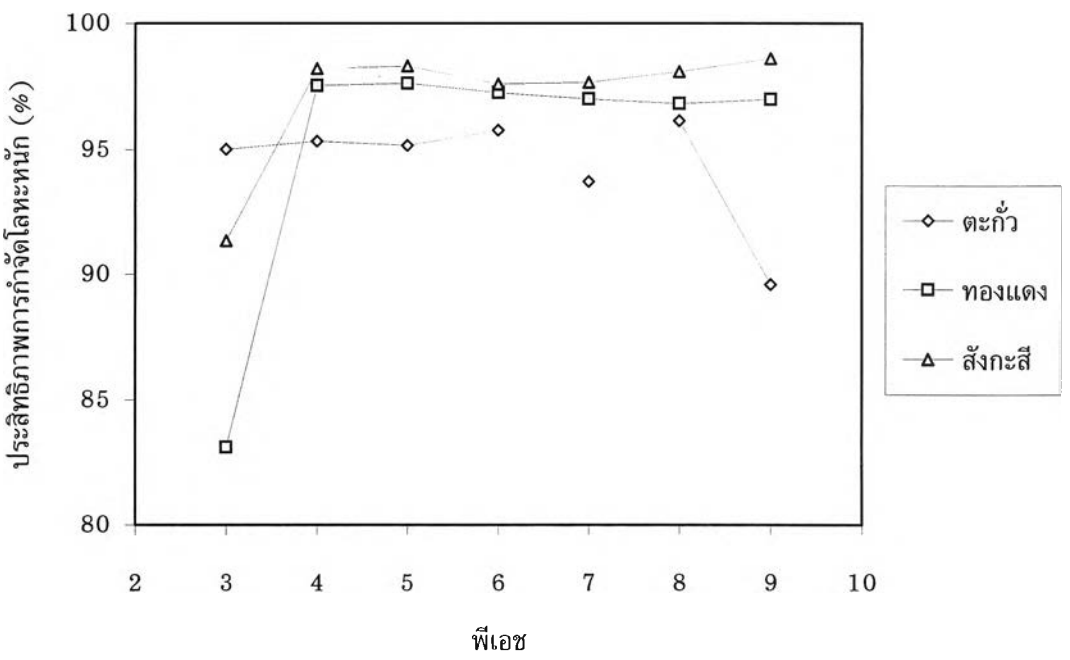
จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.9 ให้อยู่ในรูปกราฟ ได้แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีด้วยดินลูกรังเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 25 พีพีเอ็มที่พีเอชต่าง ๆ พบว่าที่ทุก ๆ ค่าพีเอช ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือทองแดง ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจะมีค่าต่ำสุดโดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น จึงกล่าวได้ว่าดินลูกรังมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงกว่าทองแดงและสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 25 พีพีเอ็ม เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงกว่าทองแดงและสังกะสีในช่วงพีเอชที่กว้าง แม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดตามผลการทดลองที่ได้ในช่วงพีเอช 7-9 จะเป็นผลจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชเดียวกันก็ตาม

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีโลหะหนักที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม ในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.10 ให้อยู่ในรูปกราฟ จะเห็นได้ว่าในช่วงพีเอช 3-6 ดินลูกรังสามารถกำจัดโลหะหนักเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี โดยที่ดินลูกรังจะมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในช่วงพีเอช 7-9 ตามผลการทดลองที่ได้สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรังจากมากไปน้อยได้เป็น ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี แต่ทว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่ได้ในช่วงพีเอช 7-9 เป็นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันเนื่องมาจากการตกตะกอนของโลหะหนักที่เกิดขึ้นในขณะปรับพีเอชให้ได้ตามค่าที่กำหนด ผลการเปรียบเทียบที่ได้ในช่วงพีเอช 7-9 จึงอาจไม่ใช่ผลตามที่ควรจะเป็นเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินลูกรังมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงกว่าทองแดงและสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 5 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
3	95.01	88.13	91.34
4	95.33	97.53	98.20
5	95.16	97.62	98.30
6	95.78	97.25	97.59
7	93.72*	97.00	97.65
8	96.16*	96.83*	98.08*
9	89.59*	96.99*	98.60*

* ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช

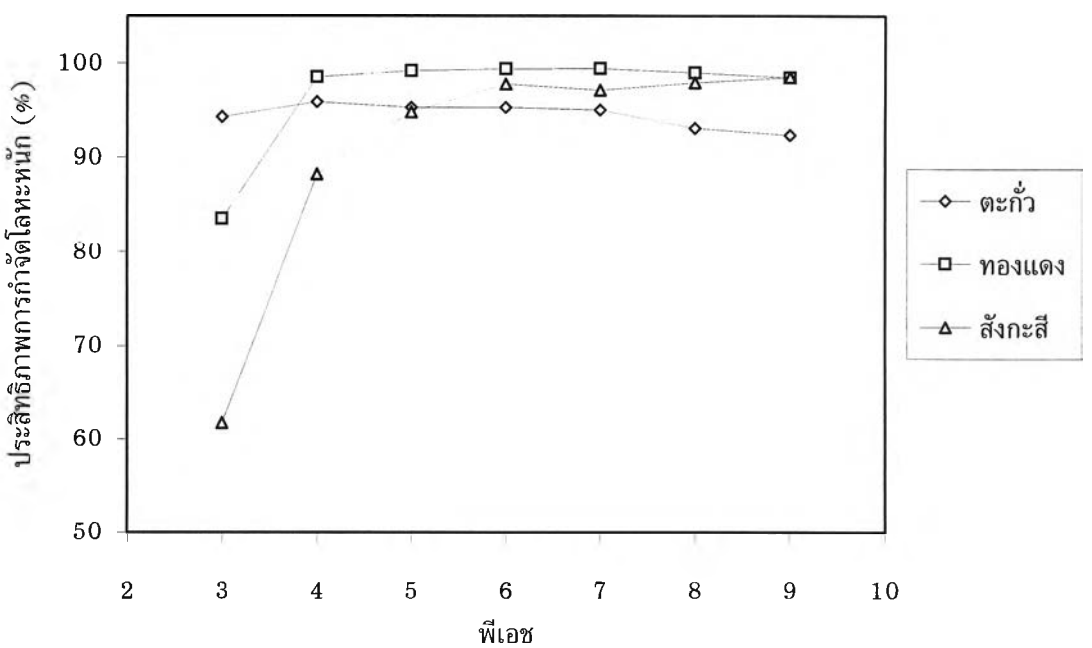


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 5 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 10 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
3	94.29	83.47	61.76
4	95.85	98.51	88.22
5	95.28	99.18	94.81
6	95.29	99.39	97.76
7	94.99*	99.40	97.10
8	93.08*	98.98*	97.88*
9	92.36*	99.44*	98.49*

* ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช

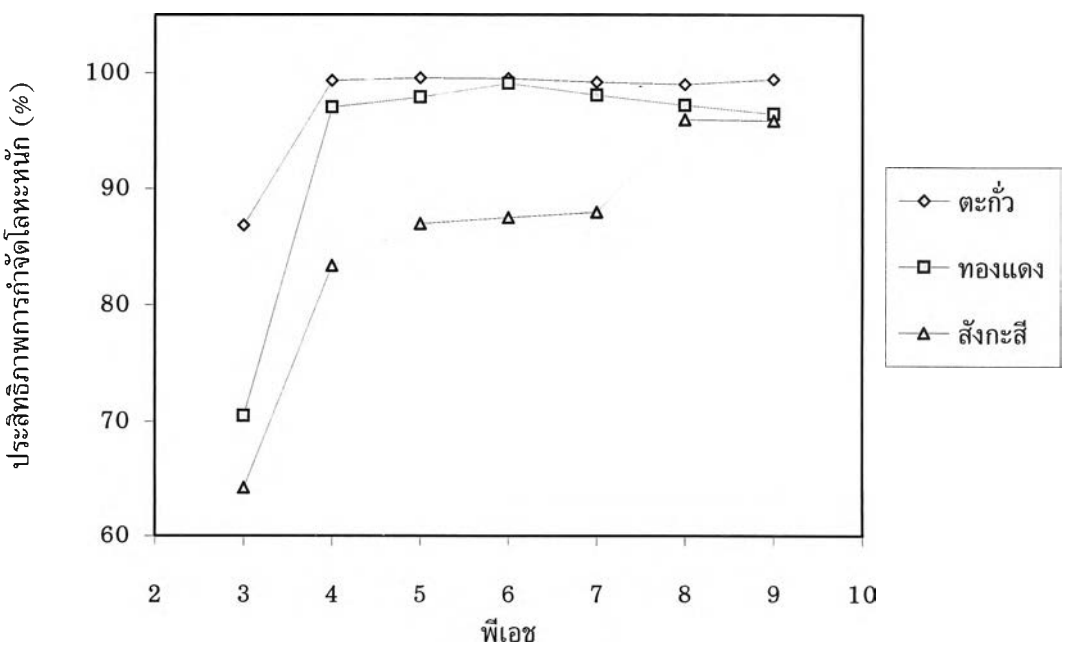


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 10 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 25 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
3	86.83	70.51	64.29
4	99.36	97.05	82.39
5	99.58	97.94	86.98
6	99.52	97.09	87.51
7	99.21*	98.09*	87.99
8	99.01*	97.24*	96.01*
9	98.44*	96.47*	95.89*

* ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช

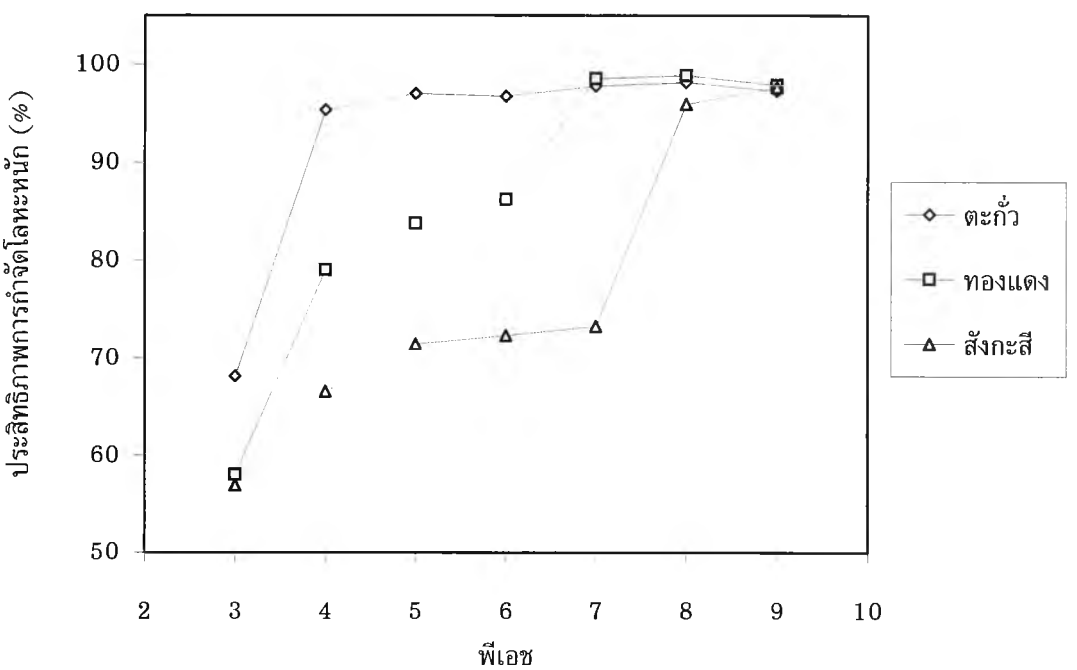


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 25 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 50 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
3	68.13	58.05	56.95
4	95.35	79.05	66.56
5	97.00	83.80	71.44
6	96.75	86.23	72.35
7	97.76*	98.54*	73.27
8	98.18*	98.88*	95.96*
9	97.27*	97.88*	97.65*

* ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช

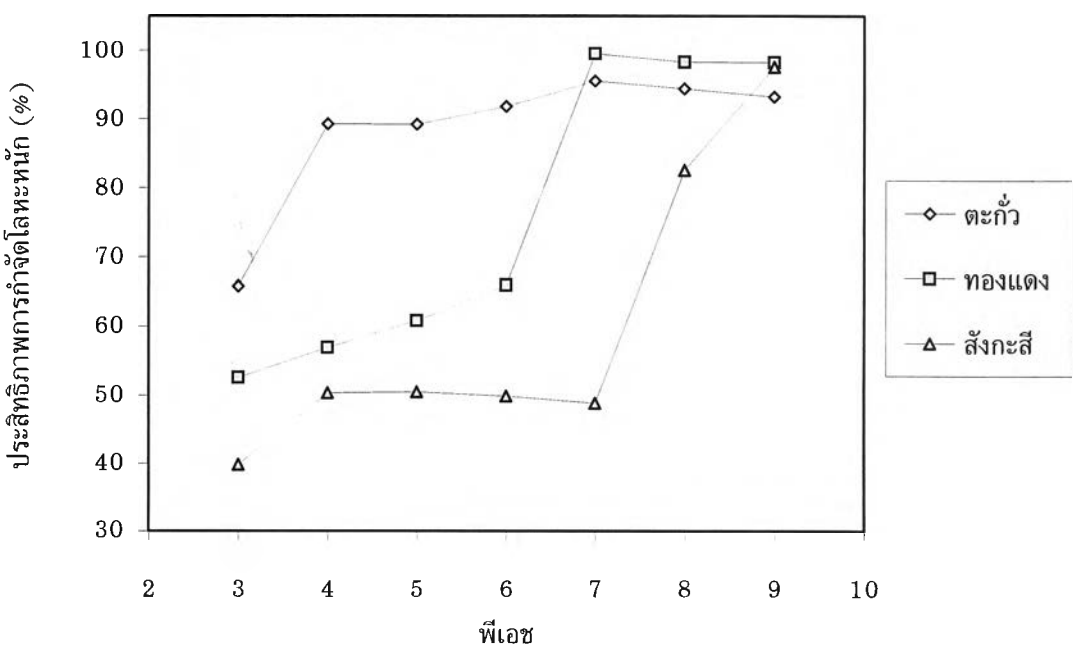


รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 50 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ด้วยดินลูกรัง

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 100 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (%)		
	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี
3	65.81	52.56	39.84
4	89.25	56.94	50.37
5	89.20	60.84	50.51
6	91.86	65.97	49.88
7	95.56*	99.52*	48.87
8	94.46*	98.32*	82.58*
9	93.25*	98.26*	97.60*

* ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีการตกตะกอนเกิดขึ้นหลังการปรับพีเอช



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักความเข้มข้น 100 พีพีเอ็มในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่าง ๆ ด้วยดินลูกรัง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีเมื่อโลหะหนักมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็มในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.11 ให้อยู่ในรูปกราฟ ได้ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเช่นเดียวกับผลที่ได้เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม กล่าวคือ มีลำดับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรังเรียงจากมากไปน้อยคือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีในช่วงพีเอช 3-6 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นไปตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้และเป็นช่วงพีเอชที่กว้าง จึงกล่าวได้ว่าดินลูกรังมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงกว่าทองแดงและสังกะสีเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม

4.4 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยดินลูกรัง

การศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ดินลูกรัง 1.00 กรัม เป็นปริมาณดินที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากข้อ 4.2.2 นำมาดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่ได้จากตำแหน่งบ่อรวมน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่แห่งหนึ่ง น้ำเสียมีความเข้มข้นของตะกั่ว 5.44 พีพีเอ็ม พีเอช 3.25 ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียปริมาตร 25 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ได้แก่ 2, 4, 8 และ 12 ชั่วโมง เขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงผลจากตารางที่ 4.12 ให้อยู่ในรูปกราฟ โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3.16 และ ข-3.20

จากผลการทดลองพบว่าดินลูกรังสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ได้ดี โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วมากกว่า 70% ในทุก ๆ ระยะเวลาสัมผัส ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสโดยมีค่า 71.63%, 77.76%, 80.21% และ 81.99% ที่ระยะเวลา 2, 4, 8 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับ โดยมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วอาจมีค่าสูงขึ้นอีกหากเพิ่มระยะเวลาสัมผัสต่อไป

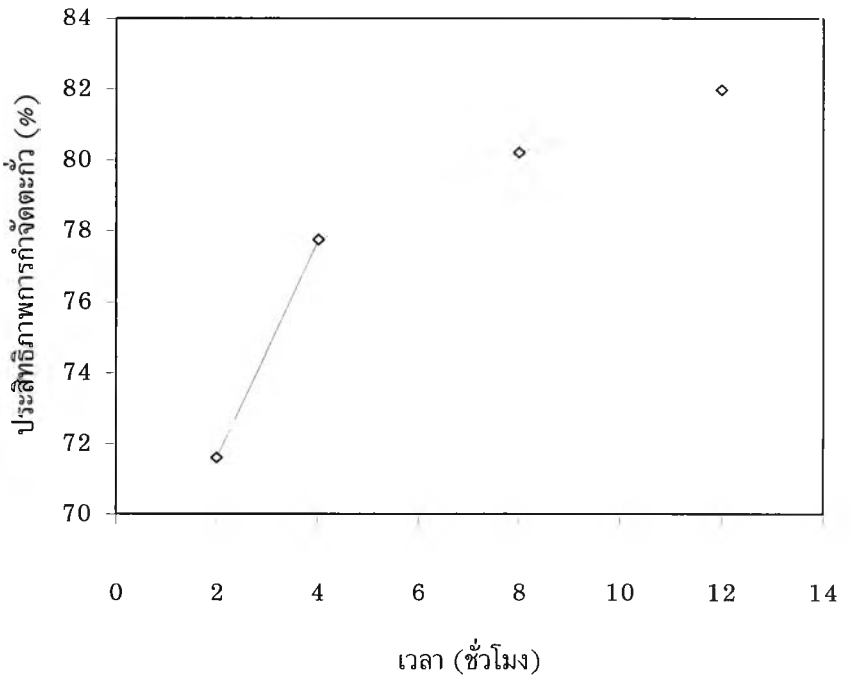
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่กับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 71.63% เป็นค่าที่ต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเท่ากับ 99.22% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 พีพีเอ็ม พีเอช 3 ซึ่งเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับสภาวะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีความเข้มข้น 5.44 พีพีเอ็ม พีเอช 3.25 นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมงในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะ

เวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่น้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแตกต่างไปจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์อาจเนื่องมาจากการที่น้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่มีโลหะชนิดอื่น ๆ รวมทั้งสารประกอบต่าง ๆ จากกระบวนการผลิตปะปนอยู่ จึงมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ได้แสดงผลการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ที่มีปะปนอยู่ในน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรังที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงดังตารางที่ 4.13 ทำให้ทราบว่าโลหะหนักอีกชนิดหนึ่งที่ดินลูกรังสามารถดูดซับได้ดีคือโครเมียม โครเมียมจึงอาจเป็นโลหะหนักที่ไปแข่งขันกับตะกั่วในการดูดติดกับผิวดินลูกรัง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

การเปรียบเทียบความสามารถของดินลูกรังในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่กับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (รายละเอียดค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค) มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกำหนดให้น้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีตะกั่วเจือปนอยู่ได้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่หลังผ่านการกำจัดตะกั่วด้วยดินลูกรังที่ระยะเวลา 2, 4, 8 และ 12 ชั่วโมง จะมีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่เท่ากับ 1.54 , 1.21, 1.08 และ 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร (พีพีเอ็ม) ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณตะกั่วที่เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ทั้งนี้ เนื่องจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่มีค่าพีเอช 3.25 ซึ่งเป็นพีเอชที่ไม่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วด้วยดินลูกรัง ดังนั้น การนำดินลูกรังไปใช้กำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ อาจต้องมีการเพิ่มปริมาณดินลูกรังที่ใช้ หรือมีการนำกระบวนการกำจัดโลหะหนักวิธีอื่น ๆ เข้ามาใช้ร่วมกัน เพื่อให้น้ำเสียหลังการบำบัดมีปริมาณตะกั่วไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยดินลูกรัง

เวลา (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (%)
2	71.63
4	77.76
8	80.21
12	81.99



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยดินลูกรัง

ตารางที่ 4.13 ผลการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ก่อนและหลังการกำจัดโลหะหนักด้วยดินลูกรัง

โลหะหนัก	ตะกั่ว	ทองแดง	สังกะสี	โครเมียม
ปริมาณก่อนกำจัดด้วยดินลูกรัง (พีพีเอ็ม)	5.44	0.03	0.17	0.96
ปริมาณหลังกำจัดด้วยดินลูกรัง (พีพีเอ็ม)	1.54	0.02	0.16	0.06
ปริมาณที่ดินลูกรังกำจัดออกไป (พีพีเอ็ม)	3.90	0.01	0.01	0.90