บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การเตรียมและการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาลักษณะของถ่านไม้แดง การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยเกลือแกง การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์โดยการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เพื่อคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุดไปใช้ในขั้นตอนต่อไป มีผลการศึกษาดังนี้

4.1.1 ลักษณะทั่วไปของถ่านไม้แดง

ถ่านไม้แดงที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นถ่านไม้ที่ผ่านการเผาแบบชาวบ้าน มีลักษณะเป็นท่อนๆ รูปทรงสี่เหลี่ยมทรงกระบอก เนื้อไม้มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ น้ำหนักเบา มีสีดำมันวาว เนื้อเปราะแตกหักง่าย ไม่สะอาด มีเศษดินเกาะ

จากนั้นทำการเตรียมถ่านไม้โดยนำถ่านไม้แดงล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น ผึ่งให้แห้ง แล้วทำการหั่นให้เป็นชิ้นขนาดประมาณ 1 x 1 เซนติเมตร ล้างให้สะอาดอีกครั้ง ผึ่งให้แห้ง จากนั้นนำถ่านไม้แดงที่คัดแยกขนาดแล้ว แบ่งส่วนหนึ่งไว้หาประสิทธิภาพของถ่านไม้แดง ซึ่งมีความหนาแน่น 0.34 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และอีกส่วนหนึ่งสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์โดยในขั้นตอนนี้จะนำมาแช่สารละลายเกลือแกงอิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาก็นำมาอบให้แห้ง และชั่งน้ำหนักของถ่านที่เพิ่มขึ้น

ถ่านไม้แดงที่ผ่านการแช่สารละลายเกลือแกงและอบแห้ง จะมีเกลือแกงเกาะอยู่ที่ผิวภายนอกของถ่านแบบไม่สม่ำเสมอ และบางก้อนไม่ปรากฏว่ามีเกลือแกงเกาะอยู่ เมื่อชั่งน้ำหนักจะพบว่ามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.5-7.0 ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นน้ำหนักของเกลือที่เกาะอยู่บนผิวของถ่าน จากนั้นจะนำถ่านที่เตรียมไว้แล้วเหล่านี้ไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

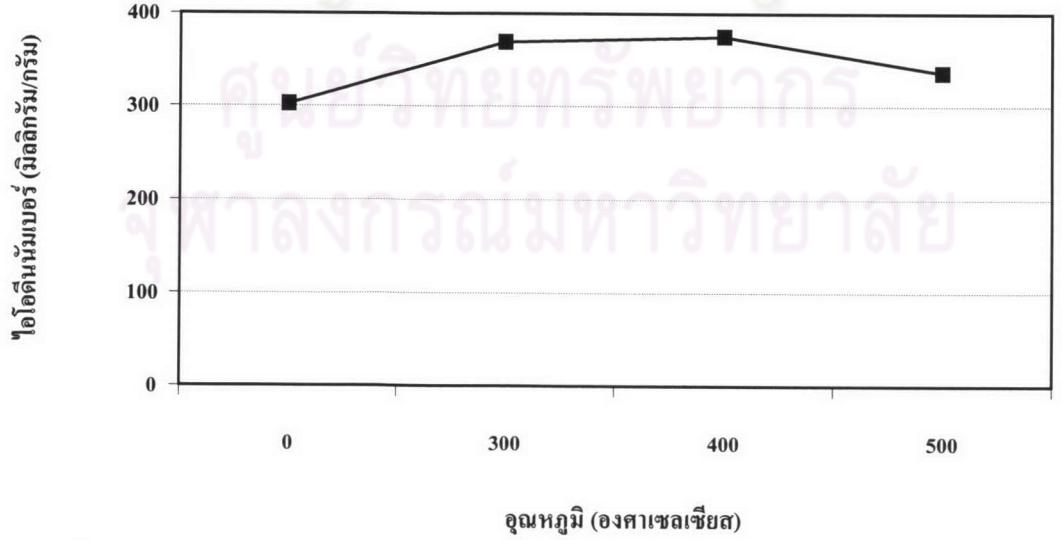
4.1.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต

4.1.2.1 ผลของอุณหภูมิในการเผา ต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาถ่านไม้แดง ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ500 องศาเซลเซียส แสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

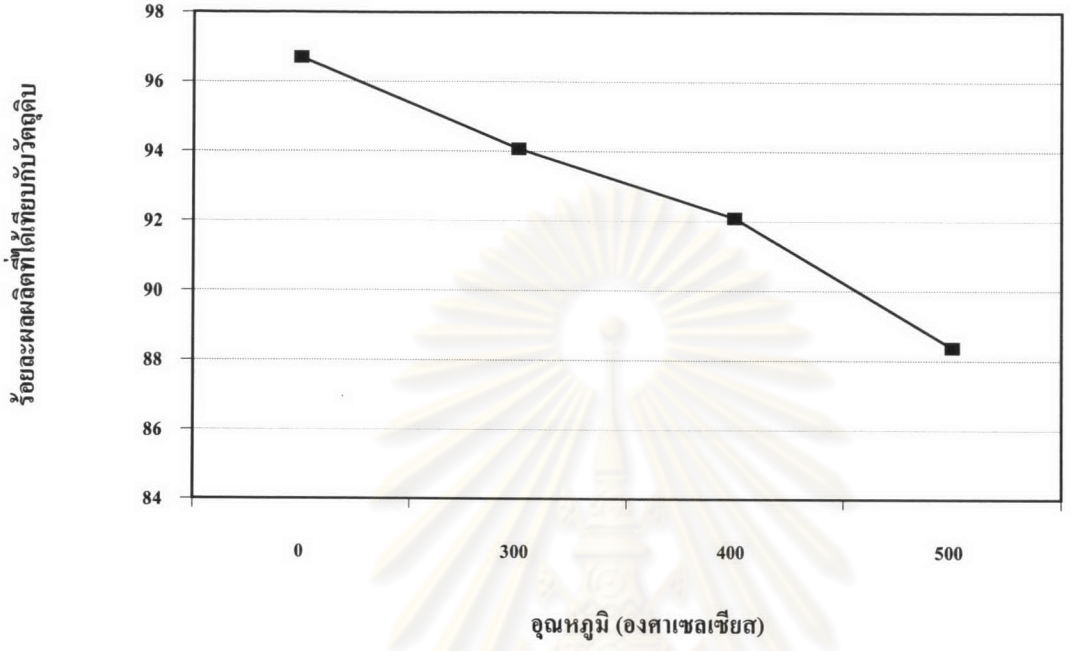
ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้เทียบกับวัตถุดิบ และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านที่ผลิตจากถ่านไม้แดงที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของผลผลิตที่ได้เทียบกับวัตถุดิบ (%)	ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่าน)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	96.69	333	301	271	302
300	94.06	402	365	340	369
400	92.08	405	366	355	375
500	88.37	367	340	301	336



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ร้อยละของผลผลิตของถ่านไม้แดงที่ได้เทียบกับวัตถุดิบ เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ถึง 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำถ่านไม้แดงซึ่งไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยเกลือแกงมาเผาต่อที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์อยู่ในช่วง 336-375 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงขึ้น คือ 369 และ 375 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าไอโอดีนนัมเบอร์กลับลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คือ 336 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ก็ยังให้ค่าที่สูงกว่าที่ได้จากถ่านไม้แดงซึ่งเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น ซึ่งให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 302 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้ พบว่าถ่านไม้แดงเริ่มต้นเมื่อนำมาเตรียมจนถึงขั้นการใช้งานจริง มีค่าสูงถึง 96.69 และเมื่อเผาต่อที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะให้ค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้ 94.06, 92.08 และ 88.37 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละของผลผลิตที่ได้ก็จะน้อยลง เนื่องจากถ่านไม้ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว ทำให้องค์ประกอบในเนื้อไม้ เช่น เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, แทนนิน, กรดไขมัน และอื่นๆ เป็นต้น ถูกย่อยสลายที่อุณหภูมิต่างๆ จนเหลือคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อเผาต่อที่อุณหภูมิสูงทั้ง 3 ดังกล่าว จะทำให้สารประกอบที่มีเหลืออยู่และสามารถย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงกว่าถูกย่อยสลายต่อไป จากการศึกษาจะพบว่ายิ่งเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นสารประกอบที่มีอยู่ในเนื้อถ่านไม้แดงจะยิ่งสลายตัวได้มากขึ้น ซึ่งจะ

ทำให้ร้อยละของผลผลิตที่ได้ลดลงไปตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ได้เมื่อเผาต่อที่อุณหภูมิต่างๆ ก็พบว่ายังไม่ให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกมาชัดเจนมากนัก ดังนั้นในขั้นตอนต่อไป จะทำการศึกษาถึงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกงที่อุณหภูมิการเผา 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

4.1.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อตัวกระตุ้น ต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้แดงในการศึกษานี้ใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้นประสิทธิภาพ โดยการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อตัวกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 , 1:3 และ 1:4 ทำการเผาและกระตุ้นให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส และพิจารณาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้โดยศึกษาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้จะต่ำลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นไม่ว่าที่อัตราส่วนใดๆ ของวัตถุดิบต่อเกลือแกงโดยจะเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกันระหว่างอุณหภูมิการเผา 300 และ 500 องศาเซลเซียส ที่จะให้ค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้สูงสุดที่ 92.90 และ 86.14 แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ได้ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ อยู่ในช่วง 358-394 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสอยู่เล็กน้อย คือค่าไอโอดีนนัมเบอร์อยู่ในช่วง 319-366 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด คือ 420-434 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักถ่านต่อตัวกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3

เมื่อพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมถ่าน จะเกิดการสูญเสียเนื้อถ่านในขั้นตอนการแช่สารละลายเกลือแกงเล็กน้อย และจะสูญเสียมากขึ้นในขั้นตอนการเผากระตุ้น โดยพบว่าเมื่อผ่านการเผาในที่อับอากาศจะมีเศษชิ้นส่วนของถ่านเล็กๆปะปนอยู่ในเกลือแกงจนเห็นเป็นสีเทา โดยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีสีเทาของเกลือมากที่สุด และจะสูญเสียมากขึ้นในขั้นตอนการล้างและการบดร่อนแต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละของผลผลิตที่ได้จากการใช้ถ่านไม้แดงเตรียมถ่านกัมมันต์ก็ยังมีค่าสูง คืออยู่ในช่วงร้อยละ 92.90-84.46

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา อัตราส่วนโดยน้ำหนักวัตถุดิบต่อตัวกระตุ้นเกลือแกง ร้อยละผลผลิตที่ได้ และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวกระตุ้น	ร้อยละของผลผลิตที่ได้ (%)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
300	1:0	92.10	389	363	347	366
	1:1	92.25	343	328	286	319
	1:2	91.28	409	370	320	366
	1:3	87.72	347	311	344	334
	1:4	92.90	340	345	346	344
400	1:0	89.22	377	370	321	356
	1:1	90.43	452	429	416	432
	1:2	89.83	441	420	399	420
	1:3	88.96	452	434	418	434
	1:4	90.54	334	338	280	318
500	1:0	84.46	363	340	370	358
	1:1	85.98	437	402	344	394
	1:2	86.14	379	398	339	372
	1:3	85.18	425	396	354	391
	1:4	84.91	398	371	354	374

จากการศึกษาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ได้ แสดงว่าการเผากระตุ้นถ่านไม้แดงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้อัตราส่วนตัวกระตุ้นเกลือแกงมีผลต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่อัตราส่วนตัวกระตุ้นเกลือแกง 1:1, 1:2 และ 1:3 ซึ่งแสดงว่าเกลือแกงจะไปมีผลต่อปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นผิวของถ่านเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มตามไปด้วย แต่หากผสมอัตราส่วนตัวกระตุ้นเกลือแกงมากเกินไป ดังเช่นจากการศึกษาที่อัตราส่วน 1:4 ที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 400 องศาเซลเซียส กลับให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลง อันแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของถ่านลดต่ำลง ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากอัตราส่วนเกลือแกงที่มากเกินไปจะไปเพิ่มขนาดของรูพรุนส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ได้ก็น้อยลงไปด้วย

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ทำให้สามารถคัดเลือกสภาวะในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้แดง เพื่อนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป คือถ่านที่ผ่านการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อตัวกระตุ้นเกลือแกง 1:1 เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าว ใช้ปริมาณตัวกระตุ้นต่ำ สิ้นเปลืองสารเคมี น้ำ และแรงงานในการล้างน้อย และก่อให้เกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด แต่สามารถให้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในระดับสูงสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ นอกจากนี้ยังคัดเลือกถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการแช่สารละลายเกลือแกงหรือกระตุ้นด้วยสารเคมีในขั้นตอนใดๆ ซึ่งจากการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านหลังผ่านการเผาจากข้อ 4.1.2.1 พบว่าให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ในระดับที่น่าสนใจ คือ 375 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยจะเป็นถ่านอีก 1 ชนิด ที่จะนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมโดยการดูดติดผิวในการทดลองแบบแบทช์ต่อไป

4.1.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

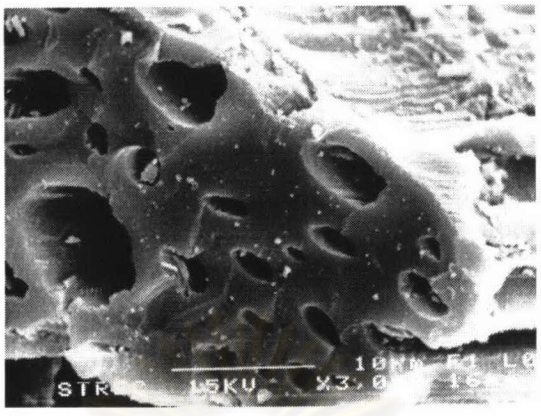
เมื่อทำการคัดเลือกถ่านที่เหมาะสมเพื่อจะนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป จะนำถ่านที่คัดเลือกได้เหล่านั้น ซึ่งในที่นี้มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ ถ่านไม้แดง ถ่านไม้แดงเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นเกลือแกง มาทำการศึกษาทางกายภาพด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer เพื่อศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดโพรงเฉลี่ย โดยแสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

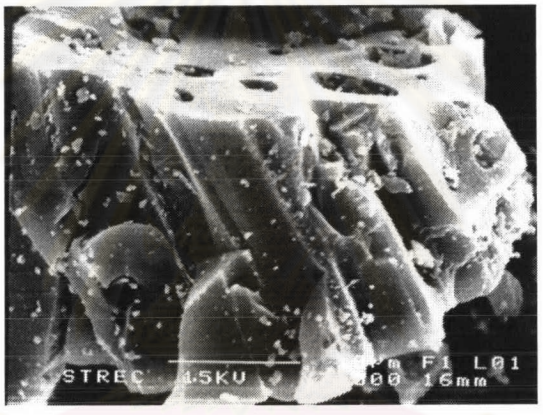
ลักษณะทางกายภาพ	ถ่านไม้แดง (Charcoal)	ถ่านไม้แดงเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (control)	ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้แดง (Activated charcoal)	ถ่านกัมมันต์ (F 300)
พื้นที่ผิว (m^2/g)	256.57	219.37	167.33	955.70
ปริมาตรโพรง (cm^3/g)	0.23	0.19	0.16	0.49
ขนาดโพรงเฉลี่ย (Å)	7659.88	3221.77	1722.12	20.73
ขนาดประสิทธิผล (mm)	0.54	0.58	0.52	0.93
สัมประสิทธิ์ความคงตัว	1.47	1.40	1.42	1.27

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าพื้นที่ผิวของถ่านทั้ง 3 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยถ่านไม้แดงจะมีค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ 256.57 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถ่านไม้แดงเมื่อเผาต่อที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะทำให้พื้นที่ผิวลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 219.37 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านไม้แดงซึ่งกระตุ้นด้วยเกลือแกงที่อุณหภูมิการเผาเดียวกันจะมีค่าพื้นที่ผิวลดลงเล็กน้อย คือ 167.33 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อพิจารณาถึงปริมาตรโพรงทั้งหมด พบว่ามีความสอดคล้องกัน คือ ถ่านไม้แดง มีปริมาตรโพรง 0.23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านไม้แดงเมื่อเผาต่อที่ 400 องศาเซลเซียส ปริมาตรโพรงที่ได้ลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.19 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ มีปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า (F 300) พบว่า มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงกว่าถ่านที่ได้จากถ่านไม้แดงทั้ง 3 ชนิด คือ มีค่าเท่ากับ 955.70 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.49 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อศึกษาถึงขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านทั้ง 3 ชนิด พบว่า ขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านไม้แดงมีค่าสูงมากที่สุด รองลงมา คือ ถ่านไม้แดงที่ผ่านการเผา 400 $^{\circ}C$ และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านไม้แดงมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่า 7659.88, 3221.77 และ 1722.12 อังสตรอม ตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ F 300 มีค่าเท่ากับ 20.73 อังสตรอม แสดงให้เห็นว่าถ่านทั้ง 3 ชนิด มีขนาดโพรงโดยส่วนใหญ่กว้างมาก (รูปที่ 4.3 ถึง 4.5) ซึ่งขนาดโพรงของตัวดูดติดผิวที่ดีควรมีขนาดใหญ่กว่าตัวถูกดูดติดผิวเล็กน้อย สำหรับถ่านทั้ง 3 ชนิดที่ทำการศึกษานี้ มีขนาดโพรงเฉลี่ยกว้างกว่าแคดเมียมอิออนมากทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดติวผิวต่ำ ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยดังกล่าวจัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง หรือ Mesopore ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดติดผิวกับตัวถูกดูดติดผิวที่เป็นสีซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอิออนของโลหะหนัก

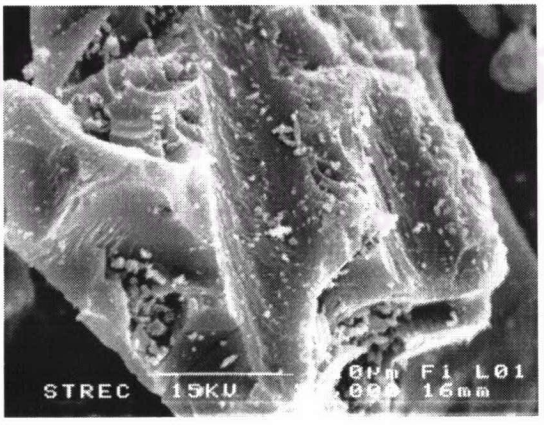
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของถ่านไม้แดง เมื่อใช้กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของถ่านไม้แดงเมื่อเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว และรูพรุนของถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเกลือแกงและเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กำลังขยาย 3,000 เท่า

4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

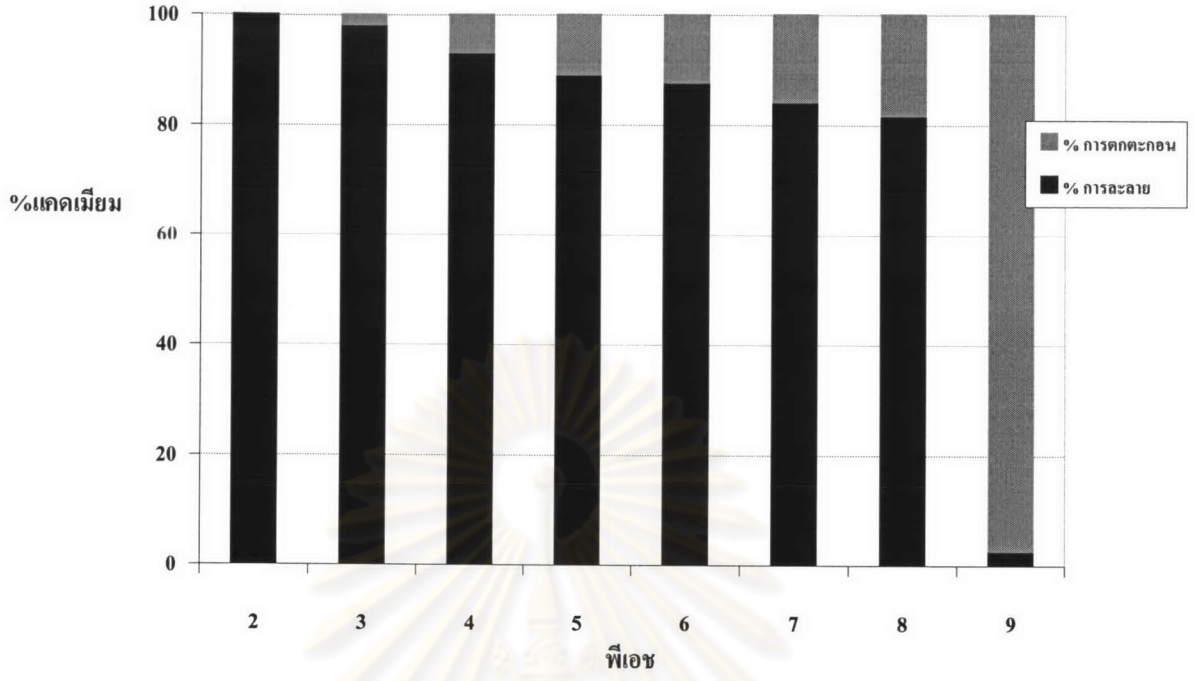
ในขั้นตอนต่อไปนี้ เป็นการนำถ่านที่ได้คัดเลือกจากขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์มาทำการศึกษาในขั้นต่อไป ซึ่งจะเป็นการศึกษาการดูดติดผิวแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่องในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านทั้ง 3 ชนิด

4.2.1 อิทธิพลของค่าพีเอชต่อการดูดติดผิว

จากการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อการดูดติดผิว พบว่าค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการดูดติดผิวแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยที่พีเอชต่างกันความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของแคดเมียมก็จะเปลี่ยนแปลงไป จึงทำการทดลองปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 9 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นกรองเอาตะกอนออก แล้วทำการวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ เพื่อดูเปอร์เซ็นต์การละลายและการตกตะกอนของแคดเมียม ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การละลายและตกตะกอนของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

พีเอช	% การละลาย	% การตกตะกอน
2	100	0
3	98.3	1.7
4	93.2	6.8
5	89.2	10.8
6	87.8	12.2
7	84.3	15.7
8	81.8	18.2
9	2.8	97.2



รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การละลายและการตกตะกอนของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

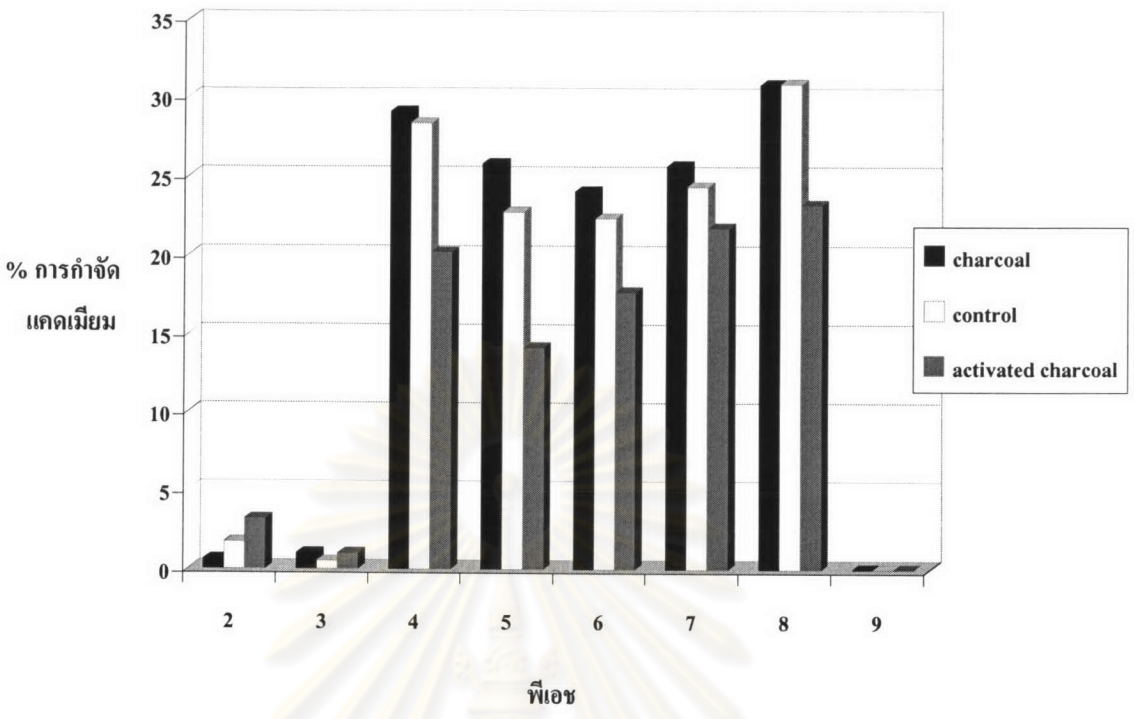
จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับค่าพีเอช เท่ากับ 2 ไม่มีการตกตะกอนของแคดเมียมเลย โดยมีค่าการละลายมากที่สุดเป็น 100 % และเมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3 แคดเมียมจะเริ่มตกตะกอนเล็กน้อย และที่ค่าพีเอช 4 ถึง 8 จะมีการตกตะกอนมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 9 จะมีการตกตะกอนของแคดเมียมสูงมากถึง 97.2 %

จากนั้นทำการศึกษาการดูดติดผิวแคดเมียมที่ค่าพีเอช 2 ถึง 9 ของถ่านที่ได้จากถ่านไม้แดงทั้ง 3 ชนิด โดยการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร และเติมผงถ่าน 0.1 มิลลิกรัม เขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกรองเอาตะกอนออก แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ และวัดค่าพีเอชของสารละลายที่เปลี่ยนไป ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านทั้ง 3 ชนิด

ค่าพีเอช	ชนิดของถ่าน	ค่าพีเอช หลังเขย่า	ความเข้มข้นแคดเมียม ที่เหลือ (มก/ล)	% การกำจัด
2	Charcoal	2.00	10.00	0.000
2	Control	2.00	9.96	1.718
2	Activated Charcoal	2.00	9.81	3.188
3	Charcoal	3.12	9.73	1.017
3	Control	3.13	9.78	0.509
3	Activated Charcoal	3.11	9.73	1.017
4	Charcoal	6.22	6.61	29.077
4	Control	6.22	6.68	28.326
4	Activated Charcoal	6.11	7.44	20.172
5	Charcoal	5.72	6.62	25.785
5	Control	5.70	6.89	22.724
5	Activated Charcoal	5.20	7.66	14.126
6	Charcoal	6.02	6.67	24.032
6	Control	6.12	6.82	22.323
6	Activated Charcoal	5.95	7.23	17.654
7	Charcoal	6.44	6.27	25.623
7	Control	6.44	6.38	24.318
7	Activated Charcoal	6.44	6.60	21.708
8	Charcoal	6.24	5.66	30.807
8	Control	6.39	5.66	30.844
8	Activated Charcoal	6.25	6.28	23.178
9	Charcoal	7.08	1.23	-
9	Control	7.18	0.68	-
9	Activated Charcoal	7.12	1.43	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านทั้ง 3 ชนิด

จากตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.7 จะเห็นว่าที่ค่าพีเอช 2 และ 3 ถ่านทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้น้อยมาก คือ 0.5-3.188% ซึ่งเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 4, 5 และ 6 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมของถ่านทั้ง 3 ชนิด เพิ่มสูงขึ้นอย่างเด่นชัด โดยจะสูงที่สุดในถ่านไม้แดง คือ 29.077 25.785 และ 24.032 % รองลงมา คือ ถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความสามารถในการกำจัด เท่ากับ 28.326, 22.724 และ 22.323 % และถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้น มีความสามารถในการกำจัดน้อยที่สุด คือ 20.172 14.126 และ 17.654 % ตามลำดับ และเมื่อศึกษาที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7 และ 8 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมของถ่านไม้แดงและถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ก็เพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียงกัน คือ 25.623 และ 24.318 % ที่พีเอช 7 และ 30.807 และ 30.844 ที่พีเอช 8 ซึ่งสูงกว่าถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถกำจัดได้ 21.708 และ 23.178 %

สำหรับที่พีเอช 9 ซึ่งเป็นพีเอชสูง จะมีไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งเป็นประจุลบอยู่เป็นจำนวนมาก จะไปจับกับแคดเมียมซึ่งมีค่าประจุเป็นบวก แล้วตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์แทน

การทดลองในขั้นตอนนี้เพื่อศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมของถ่านทั้ง 3 ชนิด ซึ่งที่ค่าพีเอช 4 ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมจะเพิ่มสูงขึ้นกว่าการกำจัดที่ค่าพีเอช 3

อย่างชัดเจน ดังนั้นจะใช้ค่าพีเอช 4 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวในการศึกษาขั้นต่อไป และนอกจากนี้ยังเลือกศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมที่ค่าพีเอช 7 อีกหนึ่งค่าพีเอชเพื่อเป็นตัวแทนของค่าพีเอชของน้ำเสียจริงจากลำน้ำแม่ตาว ซึ่งวัดค่าพีเอชได้ในช่วง 6.8-8.3

4.2.2 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิวแคดเมียม ศึกษาโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับค่าที่ได้จากการศึกษา 4.2.1 เติมผงถ่านแต่ละชนิด ปริมาณ 0.1 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าที่เวลา 5, 10 15, 30, 60 และ 120 นาที หลังจากนั้นกรองเอาสารละลายไปวัดค่าพีเอชและหาปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 4 หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านไม้แดง

เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชน้ำเสียหลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก/ล)	%การกำจัด
0	4.00	9.32	0
5	6.02	7.48	19.742
10	6.28	7.49	19.635
15	6.16	7.32	23.176
30	6.04	7.28	21.888
60	6.30	7.35	21.137
120	6.21	7.21	22.639

ตารางที่ 4.7 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 4 หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส

เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชน้ำเสียหลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก/ล)	%การกำจัด
0	4.00	9.32	0
5	6.25	7.65	17.918
10	6.05	8.03	13.841
15	6.05	7.77	16.631
30	6.18	7.93	14.914
60	6.17	7.56	18.884
120	6.02	7.40	20.601

ตารางที่ 4.8 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 4 หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้น

เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชน้ำเสียหลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก/ล)	%การกำจัด
0	4.00	9.32	0
5	6.05	5.85	30.605
10	6.03	5.90	30.012
15	6.03	5.56	34.045
30	5.93	5.94	29.537
60	6.04	5.85	30.605
120	6.25	5.31	37.011

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 7 หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านไม้แดง

เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชน้ำเสียหลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก/ล)	%การกำจัด
0	7.00	8.43	0
5	6.76	5.85	30.605
10	6.76	5.90	30.012
15	6.76	5.56	34.045
30	6.65	5.94	29.537
60	6.72	5.85	30.605
120	6.57	5.31	37.011

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 7 หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส

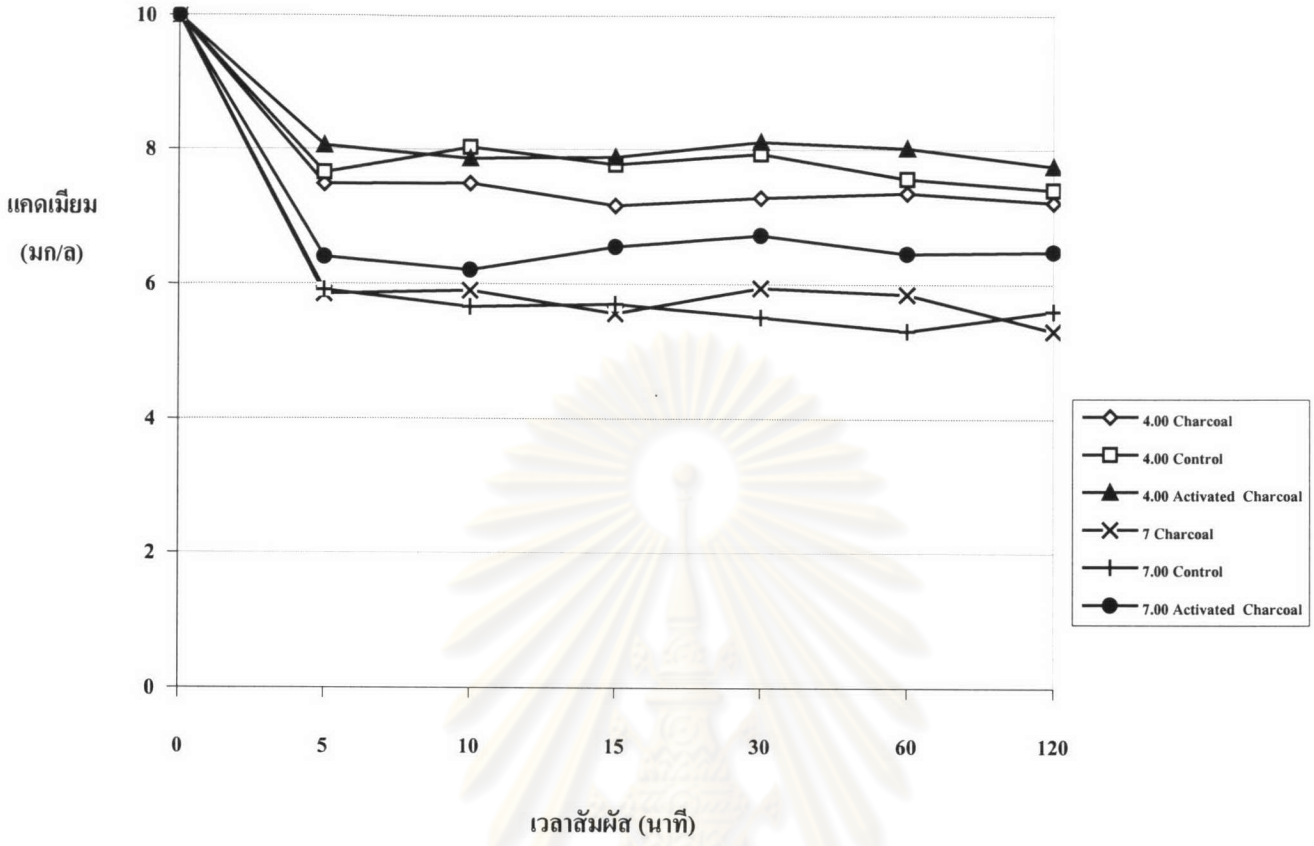
เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชน้ำเสียหลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก/ล)	%การกำจัด
0	7.00	8.43	0
5	6.83	5.91	29.893
10	6.84	5.66	32.859
15	6.82	5.70	32.384
30	6.83	5.51	34.638
60	6.72	5.31	37.011
120	6.88	5.60	33.570

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอช 7 หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้น

เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชน้ำเสียหลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก/ล)	%การกำจัด
0	7	8.43	0
5	6.76	6.40	24.081
10	6.76	6.20	26.453
15	6.85	6.55	22.301
30	6.84	6.72	20.285
60	6.80	6.45	23.488
120	6.83	6.48	23.132

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

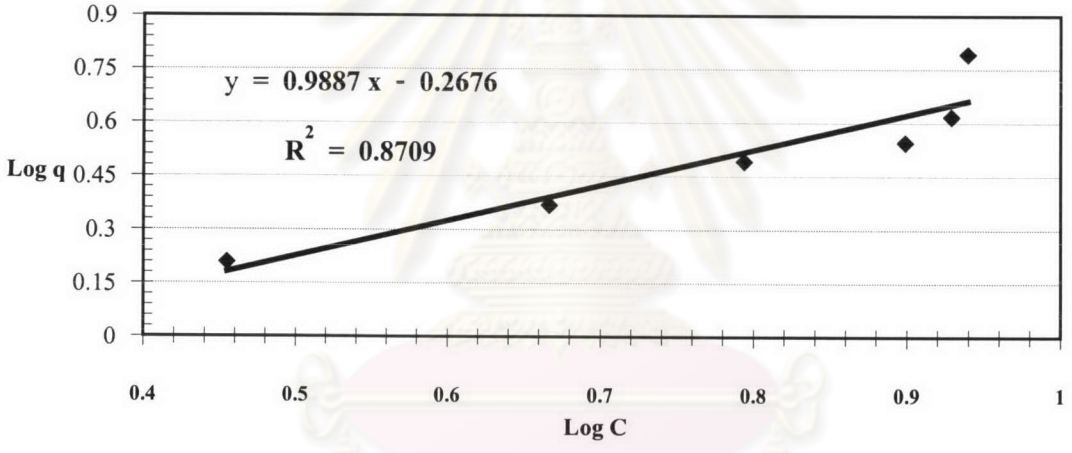


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านทั้ง 3 ชนิด ที่ค่าพีเอช 4 และ 7

จากการศึกษาเวลาสัมผัสในการดูดติดผิวแคดเมียมของถ่านทั้ง 3 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 และ 7 จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ถ่านทั้ง 3 ชนิด มีอัตราการดูดติดผิวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการกำจัดจะมีแนวโน้วที่จะเริ่มคงที่ขึ้นเรื่อยๆ เหมือนกันทั้งสองค่าพีเอช โดยที่ค่าพีเอช 7 จะมี เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมของถ่านทั้ง 3 ชนิด สูงกว่าที่ค่าพีเอช 4 โดยถ่านไม้แดงมีค่าการกำจัดสูงสุด คือ 30.605 – 37.011 % รองลงมา คือถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าการกำจัดอยู่ในช่วง 29.893 – 37.011 % และถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าการกำจัดน้อยที่สุด คืออยู่ในช่วง 22.301 – 26.453 % สำหรับที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ถ่านทั้ง 3 ชนิดมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 12.983 – 23.176 % ซึ่งเวลาที่ใช้ในการศึกษาการดูดติดผิวแคดเมียมโดยถ่านจากถ่านไม้แดงทั้ง 3 ชนิด ที่ 120 นาที ก็เพียงพอสำหรับการเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดติดผิว

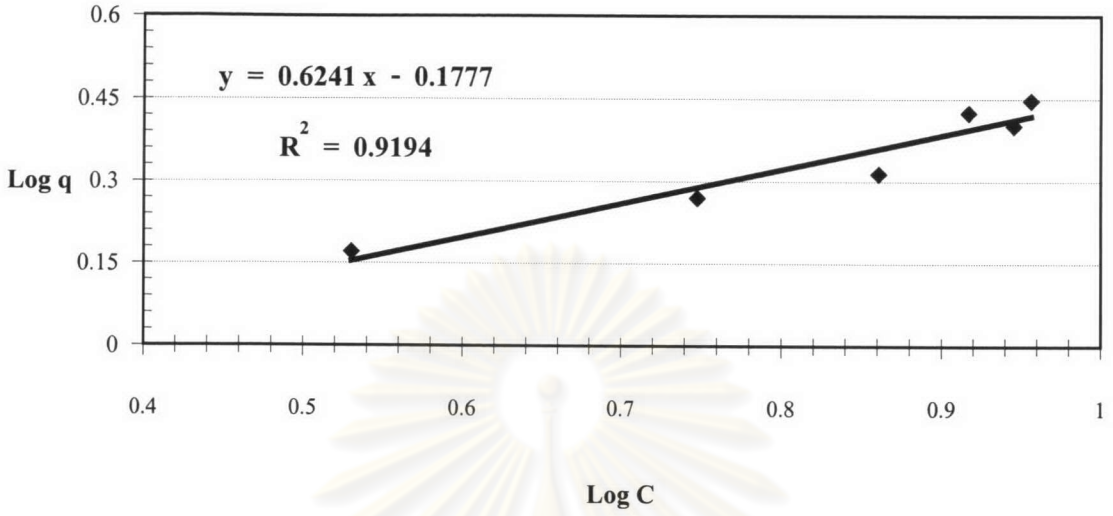
4.2.3 อิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการดูดติดผิว

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการดูดติดผิวแคดเมียม ศึกษาโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับค่าที่ได้จากการศึกษา 4.2.1 และปริมาณถ่านที่ทำการศึกษา ได้แก่ 0.01 0.02 0.04 0.1 0.2 และ 0.4 กรัม หลังจากเขย่าเป็นเวลา 120 นาที จะกรองเอาสารละลายไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ จากนั้นจะนำค่าที่ได้มาเขียนสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.14

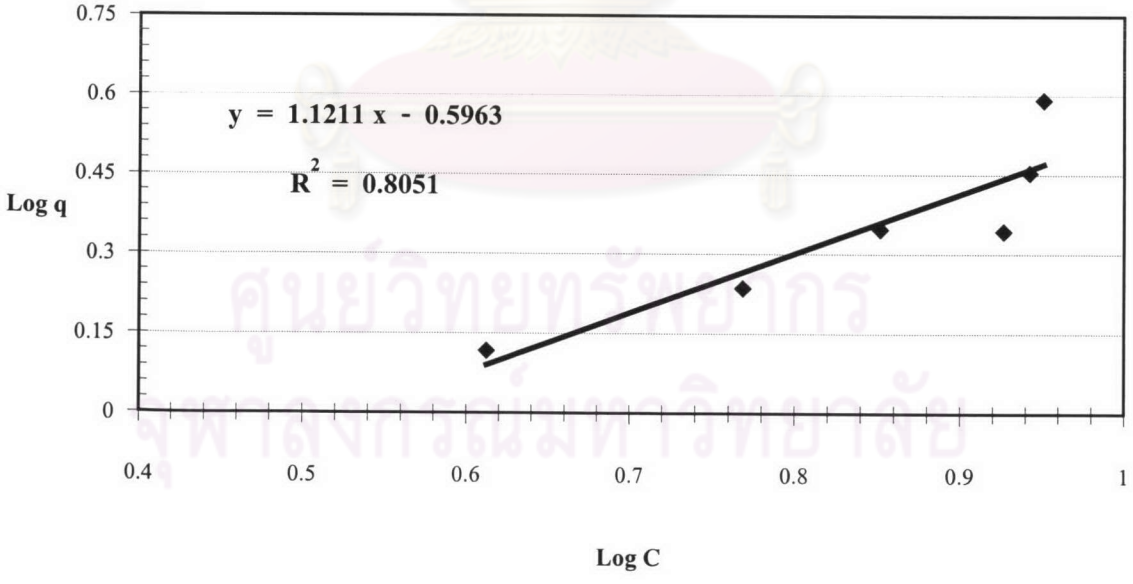


รูปที่ 4.9 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของถ่านไม้แดงที่ค่าพีเอช 4

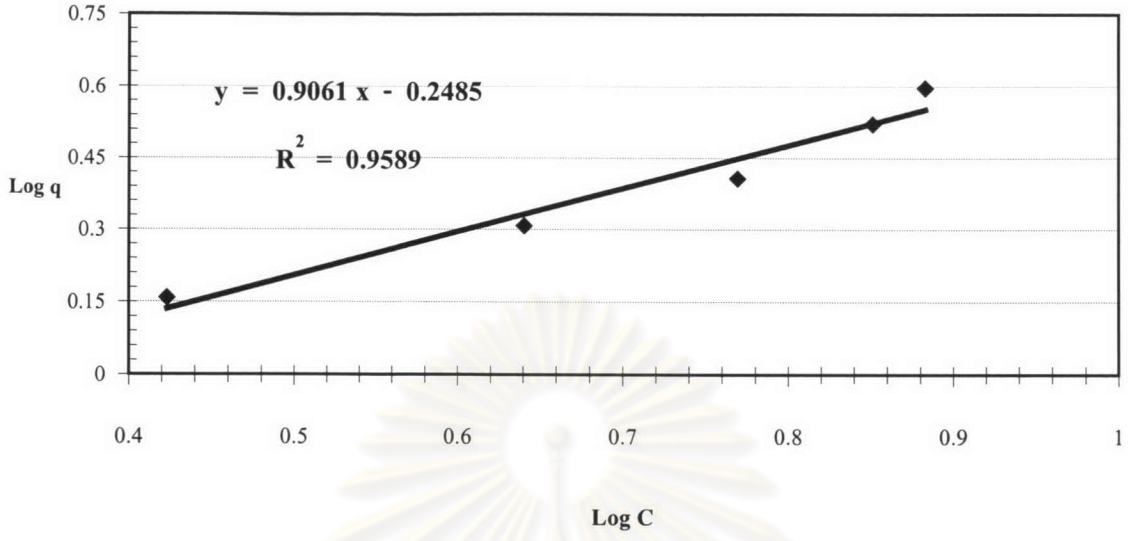
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



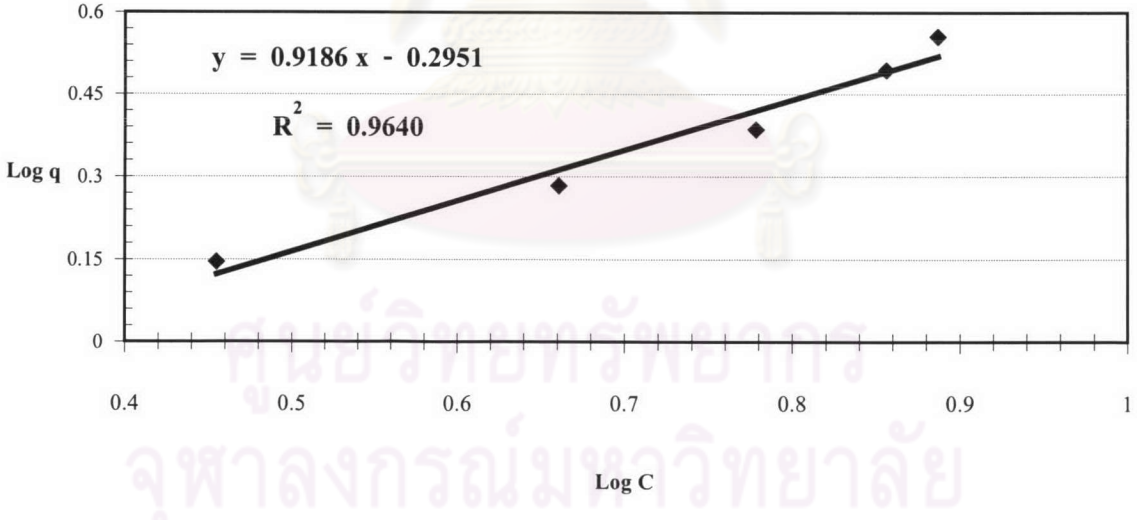
รูปที่ 4.10 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 4



รูปที่ 4.11 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้นที่ค่าพีเอช 4

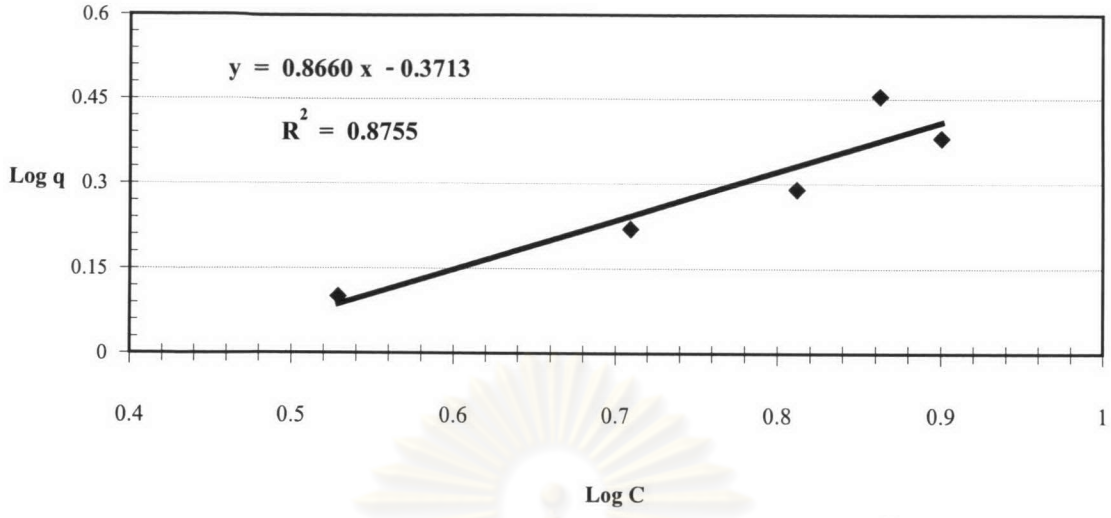


รูปที่ 4.12 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของถ่านไม้แดงที่ค่าพีเอช 7



รูปที่ 4.13 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของถ่านไม้แดงเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ที่ค่าพีเอช 7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของถ่านไม้แดงที่ผ่านการกระตุ้นที่ค่าพีเอช 7

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดติดผิวได้สูงสุดต่อปริมาณถ่านไม้แดงทั้ง 3 ชนิด (q_{max}) ที่ค่าพีเอช 4 และ 7

ค่าพีเอช	ชนิดของถ่าน	C_0(มก/ล)	R^2	1/n	K_F	q_{max}
4	Charcoal	9.32	0.8709	0.9887	0.5400	4.9075
4	Control	9.32	0.9194	0.6241	0.6642	2.6749
4	Activated Charcoal	9.32	0.8051	1.1211	0.2533	3.0940
7	Charcoal	8.43	0.9589	0.9061	0.5643	3.8940
7	Control	8.43	0.9640	0.9186	0.5069	3.5922
7	Activated Charcoal	8.43	0.8755	0.8660	0.4253	2.6944

จากสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิช จะได้ค่าคงที่ K_F และ 1/n จากนั้นนำค่าที่ได้เข้าสมการ $q = K_F C^{1/n}$ เมื่อ $C = C_0$ ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณแคดเมียมที่สามารถดูดติดผิวสูงสุดต่อ 1 กรัมของสารดูดติดผิว ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่าพีเอช 4 และ 7 ถ่านไม้แดงให้ค่า q_{max} มากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 4.9075 และ 3.8940 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อ 1 กรัมของถ่านไม้แดงตามลำดับ จากการศึกษาของ เกสินี ตันติสุวรรณกุล (2547) ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมใน

น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 โดยใช้ดินเหนียวผสมกับกากขี้แป้ง พบว่า ได้ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ 47.195 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ และถ่านกัมมันต์ F300 ให้ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ 177.17 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านไม้แดงมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ F300 และดินเหนียวผสมกากขี้แป้งเป็นอย่างมาก นอกจากนี้จากการศึกษาของ กิตตินันท์ คงสืบชาติ (2546) ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ โดยใช้สารดูดซับซึ่งเตรียมจากดินเหนียวผสมกับขี้เลื่อย พบว่า ได้ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุดที่ค่าพีเอช 9 คือมีค่าเท่ากับ 6.3 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ และที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3.28 พบว่าดินเหนียวผสมกับขี้เลื่อยและถ่านกัมมันต์ F300 ให้ค่าการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 4.079 และ 3.516 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ ตามลำดับ สำหรับการศึกษาที่ค่าพีเอช 7 พบว่า ดินเหนียวผสมกับขี้เลื่อย มีค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุด เท่ากับ 1.724 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวเป็นการยืนยันว่าที่ค่าพีเอชของน้ำเสียต่างกัน จะให้ค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุดของสารดูดซับชนิดเดียวกันแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของผู้วิจัยในครั้งนี้ พบว่า ที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน ถ่านไม้แดงจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมสูงสุดได้มากกว่าดินเหนียวผสมขี้เลื่อย

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพหรือความสามารถในการใช้งานของถ่านไม้แดงที่พบว่ามีความเหมาะสมในการดูดติดผิวแคดเมียมจากการทดลองแบบแบชท์ โดยเป็นการทดสอบโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง (column test) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร โดยที่ระดับความสูงของถ่านไม้แดงที่ใช้ในบรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง คือ 90 เซนติเมตร จากนั้นนำถ่านไม้แดงบรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ซึ่งพบว่าถ่านไม้แดง มีน้ำหนักเฉลี่ย 138.36 กรัม/คอลัมน์ การทดลองจะใช้ทิศทางการไหลของน้ำแบบไหลลง (down flow) การทดลองจะนำน้ำจากลำน้ำแม่ตาวมาทำการทดลองให้ไหลผ่านคอลัมน์ที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ลิตร/ชั่วโมง การเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บที่ปลายท่อออกของน้ำในทุกๆ คอลัมน์ คือ ที่ความสูง 30 60 และ 90 เซนติเมตร จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม สำหรับน้ำทิ้งจากลำน้ำแม่ตาวนั้น โดยปกติแล้วพบว่ามีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.8 - 8.3 แต่เนื่องจากต้องนำน้ำมาทำการทดลองที่หน่วยวิจัยการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเป็นการศึกษาเฉพาะคุณสมบัติใน

การดูดติดผิวโดยให้มีปฏิกิริยาของการตกตะกอนมาเกี่ยวข้องด้วยน้อยที่สุด จึงได้ทำการหยดกรดไนตริกลงในน้ำทิ้งตัวอย่าง จนมีค่า pH ต่ำกว่า 2

ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการศึกษาไปได้ระยะหนึ่ง คอลัมน์เกิดการอุดตันเนื่องจากในน้ำตัวอย่างมีปริมาณตะกอนเป็นจำนวนมาก จึงไม่สามารถศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวในถังดูดติดผิวแบบแท่งในการศึกษาครั้งนี้ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย