บทที่ 4

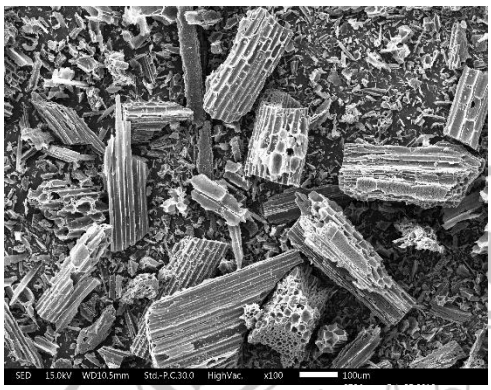
ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

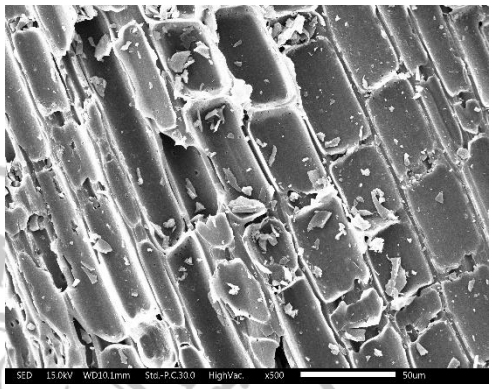
เมื่อนำเศษไม้ไผ่ที่เหลือทิ้งในชุมชนอำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูนไปเผาในเตาเผาชีวมวลจะได้ถ่านไม้ไผ่ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งถ่านไม้ไผ่ที่ได้มีลักษณะสีดำเงา น้ำหนักเบา มีความเปราะ เมื่อนำมาทุบและคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อนตามขนาดที่ต้องการจะได้วัสดุดูดซับชนิดแรกที่เรียกว่า “ถ่านไม้ไผ่” และเมื่อนำถ่านถ่านไม้ไผ่ที่ได้ไปปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีด้วยสารละลายละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) จะได้วัสดุดูดซับชนิดที่สองที่เรียกว่า “ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมี” เมื่อนำวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดไปศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของรูพรุนบนผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าถ่านไม้ไผ่มีลักษณะพื้นผิวภาคตัดขวางมีรูพรุนกระจายทั่วทั้งพื้นผิว ส่วนพื้นผิวด้านนอกมีลักษณะเป็นลำปล้องและมีรูพรุนเล็กๆกระจายในแต่ละปล้อง (ดังแสดงในภาพที่ 4.2) เมื่อนำถ่านไม้ไผ่มาผ่านการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะเห็นได้ว่าพื้นผิวและในรูพรุนถูกเติมเต็มด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ดังแสดงในภาพที่ 4.3)

(ก) (ข) (ค)

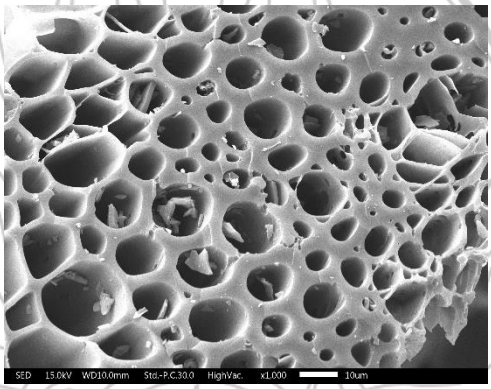
ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของ (ก) เศษไม้ไผ่ (ข) เตาเผาชีวมวล (ค) ถ่านไม้ไผ่



(ก)

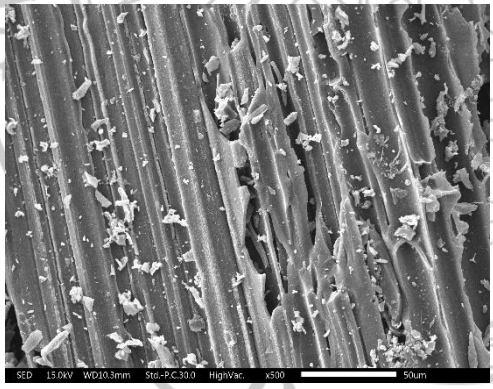


(ข)

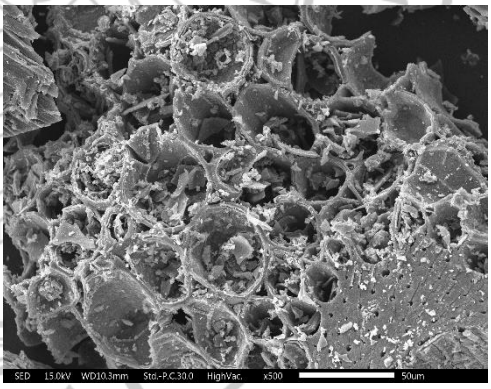


(ค)

ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM ของถ่านไม้ไผ่ (ก) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 500 เท่า และ(ค) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า



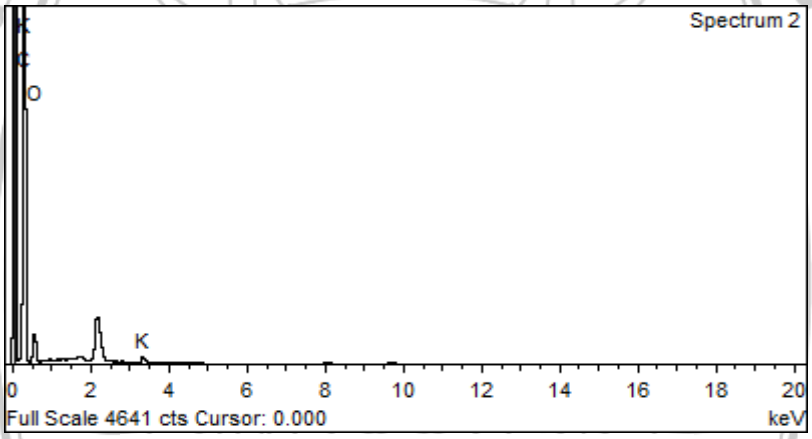
(ก)



(ข)

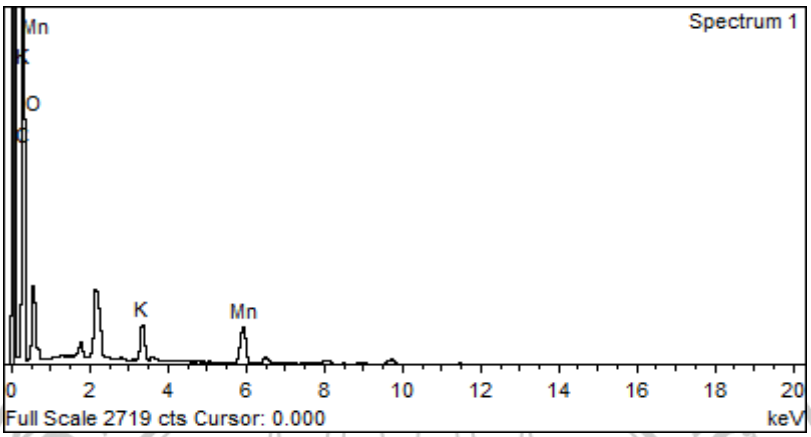
ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM ของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ก) ภาพถ่ายทางยาวที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ภาพถ่ายภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 500 เท่า

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดด้วยเทคนิค Energy dispersive Spectroscopy (EDS) พบว่า บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวของธาตุที่แตกต่างกัน โดยบนพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่นั้นพบว่าส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) แต่บนพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีพบว่ามีองค์ประกอบของธาตุแมงกานีส (Mn) ธาตุโพแทสเซียม (K) และธาตุออกซิเจน (O) การกระจายตัวบนพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ4.5 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องผลการวิจัยของ Wang Y et al. (2012) และ Mopoung and Bunterm (2016) ที่ได้ทำการปรับสภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่และเปลือกสับปะรดด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และจากการตรวจสอบคุณลักษณะด้วยเครื่อง FTIR พบว่าพีกที่ตำแหน่ง 446 cm^{-1} ของ Mn–O stretching แสดงให้เห็นว่า Mn ถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่าน ประกอบกับผล XRD ที่แสดงถึงการเกิด crystalline ของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) บนผิวหน้าของถ่านที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวอีกด้วย



Element	Weight%	Atomic%
C K	81.40	85.81
O K	17.46	13.82
K K	1.14	0.37
Totals	100.00	

ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy dispersive Spectroscopy (EDS)



Element	Weight%	Atomic%
C K	61.21	76.02
O K	19.66	18.33
K K	4.10	1.57
Mn K	15.03	4.08
Totals	100.00	

ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมและองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy dispersive Spectroscopy (EDS)

4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของถ่าน

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของถ่านทั้งหมด 6 ชนิด คือ ถ่านไม้ไผ่ ถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ทางการค้าปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 mm แต่เล็กกว่า 2 mm แทนด้วยอักษรย่อว่า BB BBK Com และComK ตามลำดับ ส่วนถ่านไม้ไผ่ และถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ ที่มีขนาดเล็กกว่า 355 µm แทนด้วยอักษรย่อว่า BS และ BSK ตามลำดับ การศึกษาการดูดซับนี้เป็นแบบ Batch โดยใช้ถ่านหนัก 1 g ในการดูดซับโลหะผสม 7 ชนิด คือ แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cd Cr และ Pb อย่างละ 0.10 ppm ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cu Zn Fe และMn อย่างละ 1.00 ppm ในสารละลายโลหะผสมปริมาตร 50 mL แล้วนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็ว 120 รอบ/นาที ที่เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษา จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับด้วยเทคนิควิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma-optical emission spectrometer ได้ผลการวิจัยดังนี้

4.2.1 ผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทั้ง 7 ชนิดของถ่านที่มีขนาดเท่ากัน (ขนาดใหญ่กว่า 1 mm แต่เล็กกว่า 2 mm) ทั้งหมด 4 ชนิด คือ ถ่านไม้ไผ่ (BB) ถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ (BBK) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ (ComK) โดยทำการศึกษาที่เวลาที่ใช้ในการดูดซับในช่วง 10 ถึง 180 นาที ผลที่ได้จากวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับด้วยเทคนิควิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma-optical emission spectrometer จากนั้นนำมาคำนวณค่าร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1และภาพที่ 4.6-4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านไม้ไผ่ไม่สามารถดูดซับ Cd และ Zn ได้ ขณะที่ถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ทางการค้าปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ สามารถดูดซับ Cd และ Zn ได้ และมีร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที และ 90 นาที สำหรับการดูดซับ Cd และ Zn ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับจะเห็นได้ว่าถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ มีร้อยละการดูดซับสูงถึงร้อยละ 100 เท่ากับประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ทางการค้าปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ นั่นคือหากต้องการดูดซับ Cd ในน้ำด้วยถ่านไม้ไผ่จะต้องนำถ่านไม้ไผ่ไปปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ ซึ่งในการปรับสภาพพื้นผิวนี้เมื่อ $KMnO_4$ ละลายน้ำจะเกิดการแตกตัว ดังสมการ (4.1)

$$KMnO_4 \rightarrow K^+ + MnO_4^- \qquad (4.1)$$

เปอร์แมงกาเนตไอออน (MnO_4^-) จะถูกดูดติดบนพื้นผิวของถ่านพร้อมๆกับโพแทสเซียมไอออน (K^+) เนื่องจากบนพื้นผิวของถ่านจะมีกลุ่มฟังก์ชันนอลที่อยู่ในรูปของ C_xO และ C_xO_2 เมื่อสัมผัสกับน้ำในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกลางหรือกรด กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวถ่านเหล่านี้ จะไปออกซิไดส์โมเลกุลของน้ำที่อยู่รอบๆถ่าน ทำให้ประจุบนผิวของถ่านเป็นประจุบวก (Huang and Wu, 1977 อ้างถึงใน วรพจน์ กนกกันฑพงษ์, 2544) ดังสมการ (4.2) และ (4.3)

$$C_xO + H_2O \leftrightarrow C_x^{2+} + 2OH^- \qquad (4.2)$$

$$C_xO_2 + H_2O \leftrightarrow C_xO^{2+} + 2OH^- \qquad (4.3)$$

ดังนั้นเปอร์แมงกาเนตไอออนที่มีประจุลบจะถูกดูดติดผิวของถ่านก่อนจนเมื่อเปอร์แมงกาเนตไอออนถูกดูดติดผิวบนผิวและภายในรูพรุนของถ่านที่มีประจุบวกจนหมด โพแทสเซียมไอออนที่มีประจุบวกจะถูกดูดติดผิวต่อจนกระทั่งถ่านมีทั้งเปอร์แมงกาเนตไอออนและโพแทสเซียมไอออนอิ่มตัว ไอออนทั้งสองตัวจะไม่กลับมารวมกันอีก เพราะปฏิกิริยาการแตกตัวของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นแบบไม่ผันกลับ ดังสมการ (4.1) นั่นคือถ่านไม้ไผ่ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ นั้นพื้นผิวจะมีทั้งประจุบวกและประจุลบ

เมื่อพิจารณาการดูดซับ Cr พบว่าถ่านทั้ง 4 ชนิด สามารถดูดซับ Cr ได้ โดยมีร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที การปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ ไม่มีผลต่อการดูดซับ Cr แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านไม้ไผ่มีค่าน้อย

มากเมื่อเทียบกับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 90 แต่เมื่อพิจารณาผลประสิทธิภาพการดูดซับ Pb พบว่าถ่านไม้ไผ่สามารถดูดซับ Pb ได้ดี และมีแนวโน้มของร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับจะผ่านไปแล้ว 180 นาที และเมื่อนำถ่านไม้ไผ่มาปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ จะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับ Pb สูงถึงร้อยละ 90 เทียบเท่าประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้า นอกจากนี้การดูดซับ Pb ของถ่านไม้ไผ่ที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ เกิดขึ้นเร็วมากตั้งแต่ช่วงเวลา 10 นาทีแรก

ประสิทธิภาพการดูดซับ Cu และ Fe ของถ่านทั้ง 4 ชนิด มีลักษณะคล้ายกัน คือ ประสิทธิภาพการดูดซับ Cu และ Fe ของถ่านไม้ไผ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นและมีร้อยละในการดูดซับประมาณร้อยละ 20 แต่เมื่อเปลี่ยนวัสดุดูดซับเป็นถ่านไม้ไผ่มาปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ ถ่านกัมมันต์ทางการค้าทั้งแบบที่ไม่ปรับและปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับ Cu และ Fe ดีมากเช่นเดียวกันโดยมีร้อยละในการดูดซับเท่ากับ 100

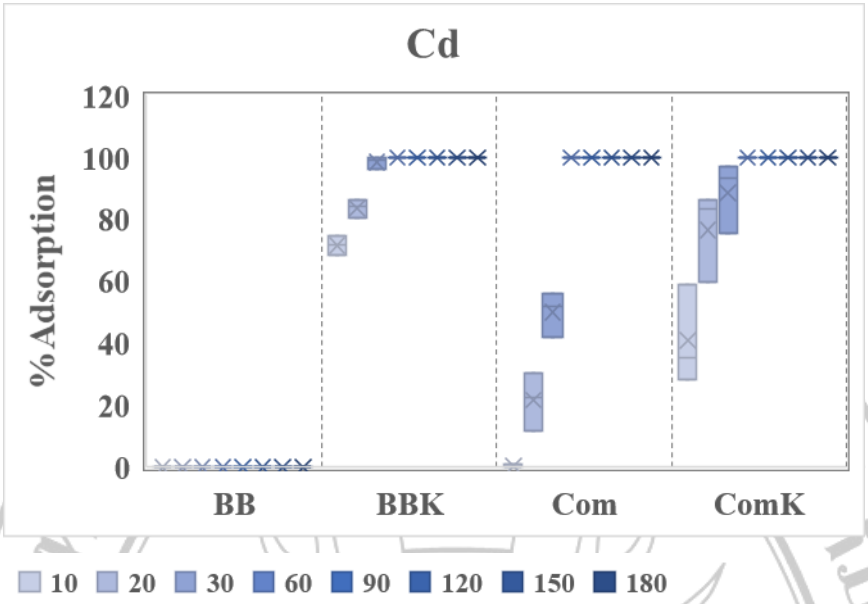
ส่วนการดูดซับ Mn จะเห็นได้ว่าถ่านไม้ไผ่และถ่านกัมมันต์ทางการค้าไม่สามารถดูดซับ Mn ได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้หากนำถ่านทั้งสองชนิดมาปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ แล้วนำไปดูดซับ Mn ในสารละลายโลหะผสม พบว่าเมื่อในช่วงเวลาเริ่มต้นของการดูดซับมีปริมาณ Mn เพิ่มขึ้นอย่างมากและลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณ Mn ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการปรับสภาพวัสดุดูดซับด้วย $KMnO_4$

ตารางที่ 4.1 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของถ่านชนิดต่างๆ

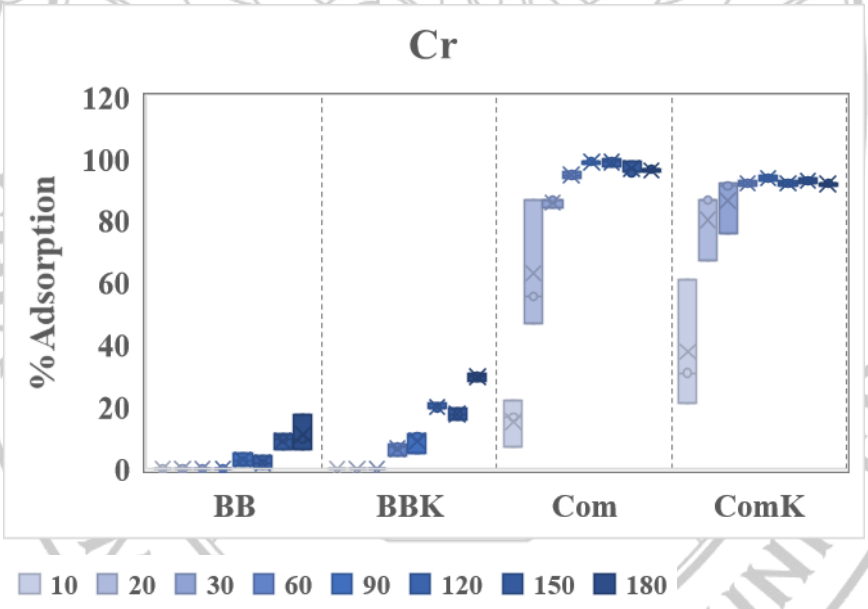
ชนิดของถ่าน	% ประสิทธิภาพการดูดซับ ($\bar{x} \pm sd$)						
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
BB							
10	0±0	0±0	6±1	11±1	0±0	5±1	-25±0
20	0±0	0±0	10±1	22±5	0±0	1±0	-36±5
30	0±0	0±0	12±1	30±4	0±0	3±2	-42±0
60	0±0	0±0	12±0	26±7	0±0	8±1	-42±0
90	0±0	3±2	18±0	40±2	0±0	9±1	-44±5
120	0±0	2±2	17±2	46±9	0±0	12±2	-42±0
150	0±0	9±3	22±1	51±5	0±0	12±1	-47±5
180	0±0	11±6	23±2	56±5	0±0	19±2	-42±0
BBK							
10	72±3	0±0	92±1	92±2	14±5	100±0	-2289±127
20	84±3	0±0	97±0	95±1	22±3	100±0	-1956±96
30	98±2	0±0	100±0	92±3	47±5	100±0	-1706±173
60	100±0	6±2	100±0	92±3	69±5	100±0	-1622±96
90	100±0	9±3	100±0	95±0	83±9	100±0	-944±393
120	100±0	20±1	100±0	93±4	90±2	100±0	-983±83
150	100±0	18±2	100±0	92±1	90±2	100±0	-750±142
180	100±0	30±1	100±0	92±3	94±2	100±0	-753±111

ตารางที่ 4.1 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของถ่านชนิดต่างๆ (ต่อ)

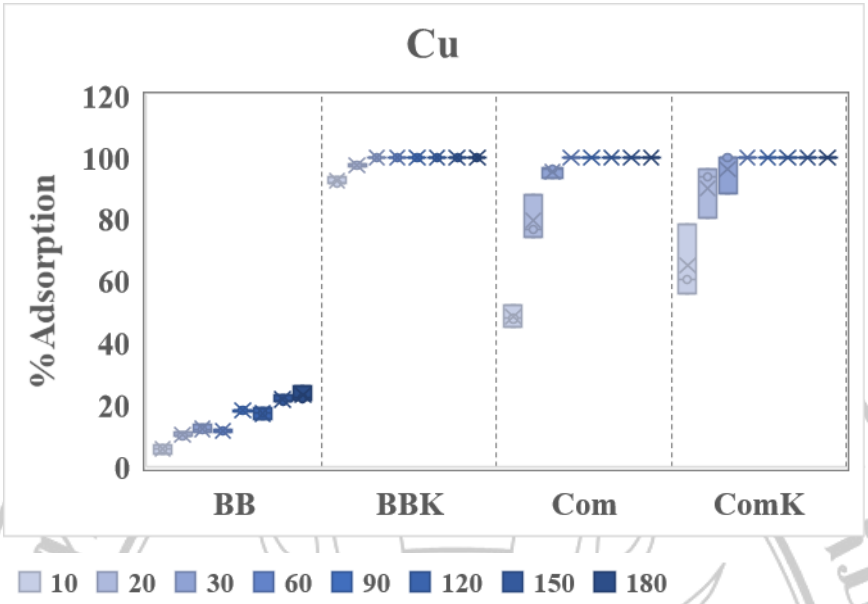
ชนิดของถ่าน	% ประสิทธิภาพการดูดซับ ($\bar{x} \pm sd$)						
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
Com							
10	0±1	15±8	49±3	46±3	3±2	68±8	±3±5
20	22±9	63±21	80±7	88±5	18±9	100±0	14±5
30	50±7	86±2	95±2	94±0	41±5	100±0	30±2
60	100±0	95±1	100±0	88±0	90±1	99±1	61±3
90	100±0	99±1	100±0	94±2	96±1	100±0	70±2
120	100±0	99±1	100±0	95±3	99±1	100±0	80±3
150	100±0	97±2	100±0	92±2	100±0	99±1	90±2
180	100±0	96±1	100±0	94±2	100±0	99±1	90±2
ComK							
10	41±16	38±21	65±12	75±9	27±11	96±6	-2706±48
20	76±15	80±11	90±8	90±5	58±14	100±0	-1928±914
30	89±11	86±9	96±7	90±7	69±10	100±0	-1900±220
60	100±0	92±1	100±0	95±2	95±2	100±0	-872±48
90	100±0	94±1	100±0	96±4	100±0	100±0	-408±90
120	100±0	92±1	100±0	94±2	100±0	100±0	-353±142
150	100±0	93±1	100±0	92±1	100±0	100±0	-103±17
180	100±0	92±1	100±0	98±3	100±0	100±0	-36±21



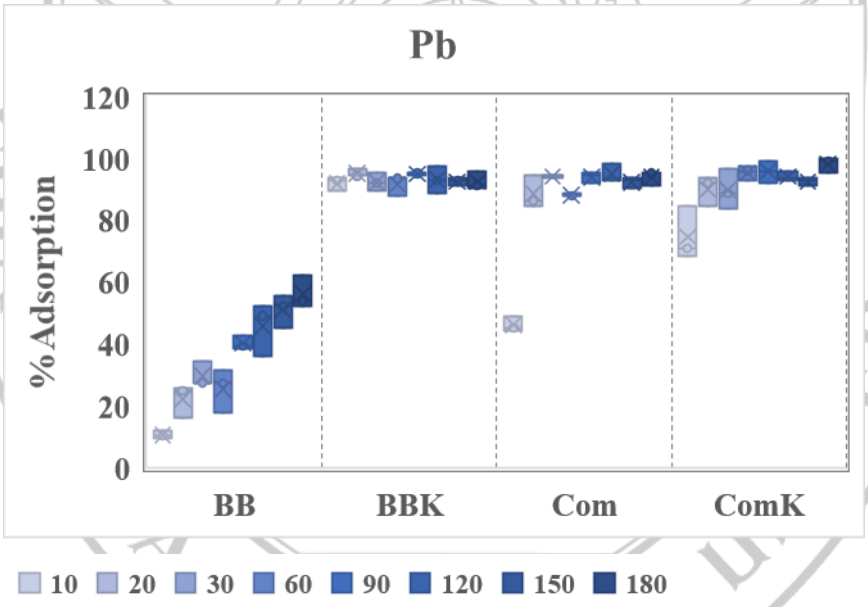
ภาพที่ 4.6 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Cd ของถ่าน BB BBK Com และ ComK



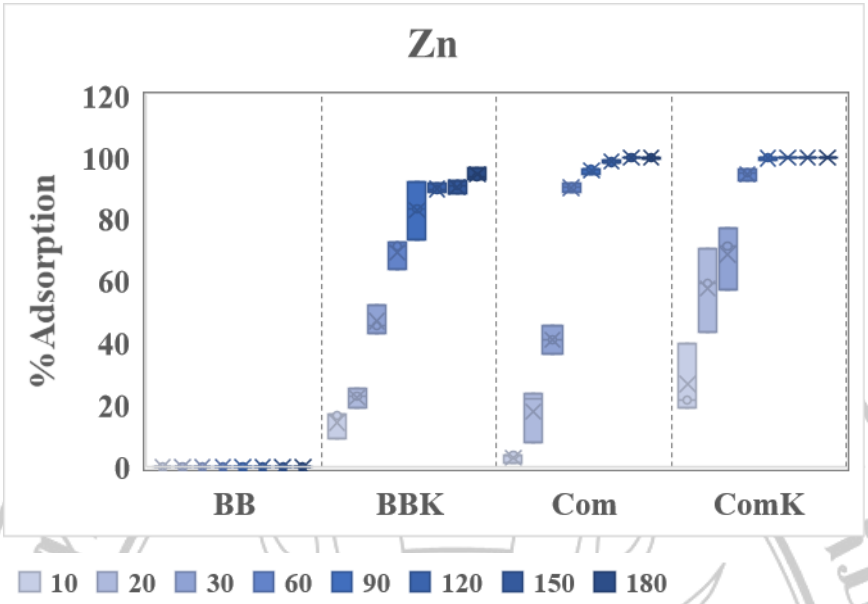
ภาพที่ 4.7 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Cr ของถ่าน BB BBK Com และ ComK



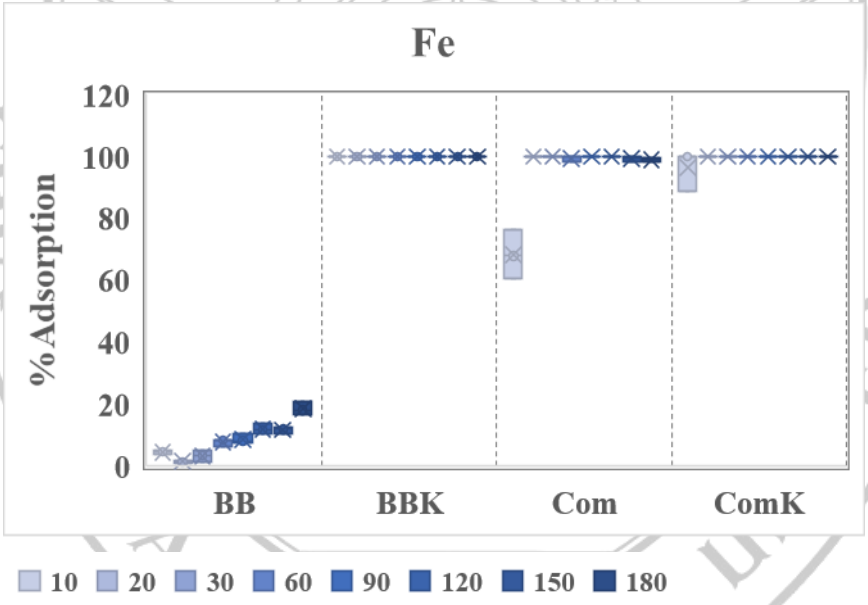
ภาพที่ 4.8 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Cu ของถ่าน BB BBK Com และ ComK



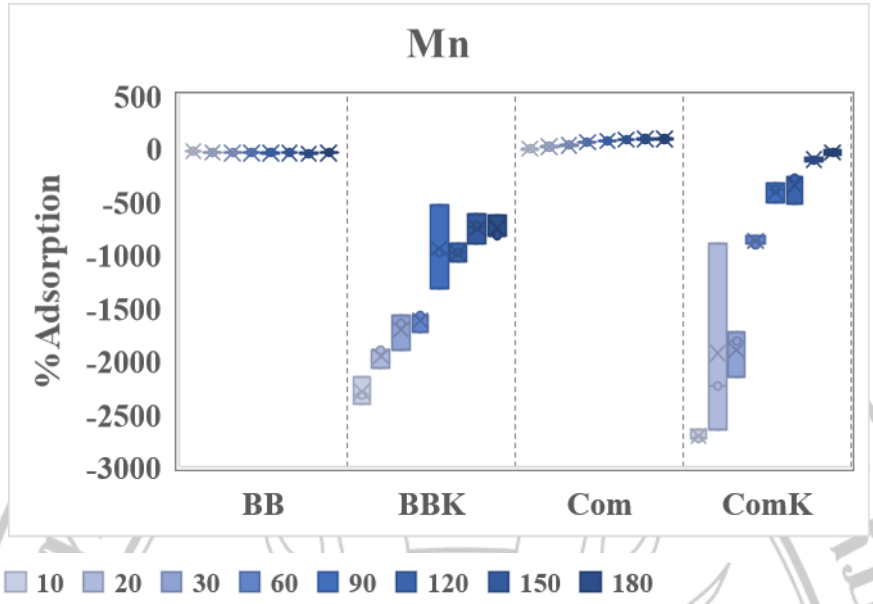
ภาพที่ 4.9 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Pb ของถ่าน BB BBK Com และ ComK



ภาพที่ 4.10 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Zn ของถ่าน BB BBK Com และ ComK



ภาพที่ 4.11 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Fe ของถ่าน BB BBK Com และ ComK



ภาพที่ 4.12 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Mn ของถ่าน BB BBK Com และComK

4.2.2ผลของอุณหภูมิในการดูดซับ

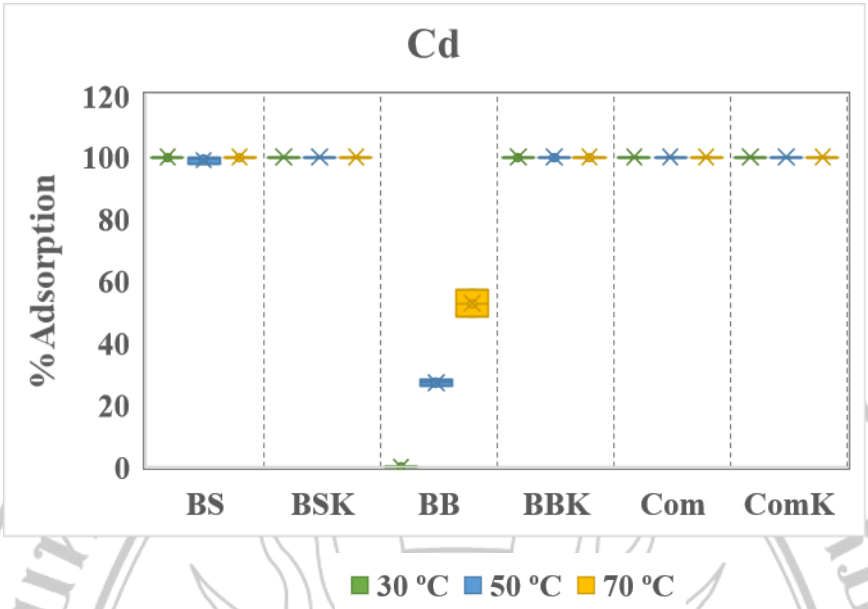
การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทั้ง 7 ชนิดของถ่านที่มีขนาดเท่ากัน (ขนาดใหญ่กว่า 1 mm แต่เล็กกว่า 2 mm) ทั้งหมด 4 ชนิด คือ ถ่านไม้ไผ่ (BB) ถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ (BBK) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ (ComK) และถ่านที่มีขนาดเล็กกว่า 355 µm จำนวน 2 ชนิด คือ ถ่านไม้ไผ่ (BS) ถ่านไม้ไผ่ปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ (BSK) โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือ 30 50 และ 70°C ตามลำดับ ผลที่ได้จากวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับด้วยเทคนิควิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma-optical emission spectrometer จากนั้นนำมาคำนวณค่าร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.13-4.19 ซึ่งพบว่า ถ่าน BS มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะทุกชนิด และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับมีผลน้อยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ยกเว้นการดูดซับ Mn จะเห็นได้ว่า ถ่าน BS สามารถดูดซับ Mn ได้ดีมากที่อุณหภูมิ 30°C และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น นั่นคือกระบวนการดูดซับนี้เป็นแบบคายความร้อน (Exothermic process) เมื่อนำถ่านไม้ไผ่ขนาดเล็กนี้มาปรับสภาพด้วย $KMnO_4$ แล้วนำไปดูดซับโลหะในสารละลายผสม พบว่าถ่าน BSK มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะทุกชนิด และประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลการดูดซับ Mn พบว่าถ่าน BSK ไม่สามารถดูดซับ Mn ได้ อีกทั้งปริมาณ Mn ในสารละลายผสมหลังการดูดซับเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันทุกๆอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับและมีผลเหมือนกับการใช้ถ่าน BBK และ ComK เป็นวัสดุดูดซับ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะ Cd Cr Pb Cu Zn และ Fe ของถ่าน BBK Com และComK พบว่าถ่าน 3 ชนิดนี้สามารถดูดซับโลหะทั้ง 6 ชนิดได้อย่างดีมาก และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ ถ่าน BB เป็นวัสดุดูดซับ พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะ Cd Cr Pb Cu Zn และ Fe ได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น นั่นคือ การดูดซับโละด้วยถ่าน BB เป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อน (Endothermic process)

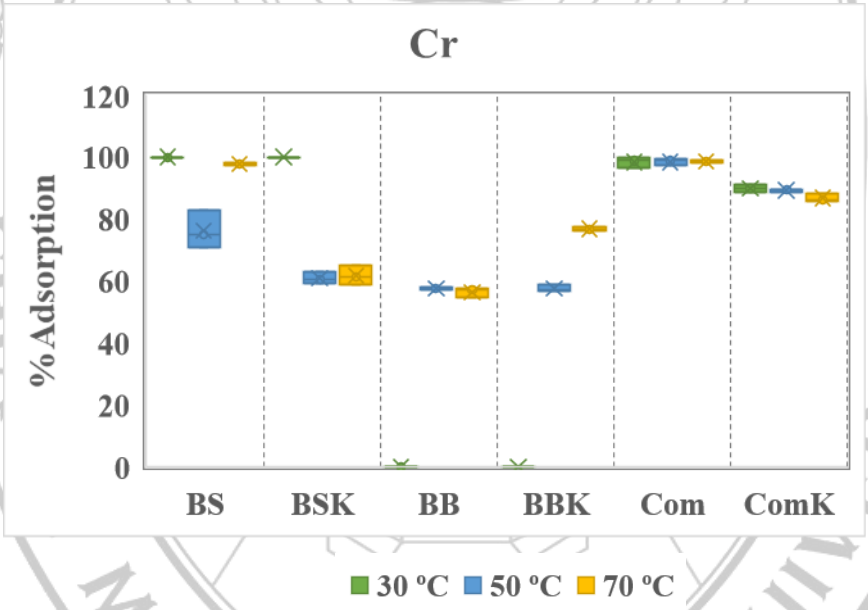
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับข้างต้น หากต้องการนำถ่านไม้ไผ่ไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะในน้ำ สามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ต้องปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ แม้ว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วย $KMnO_4$ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับ Cd Pb Cu Zn และ Fe เนื่องจากการใช้ $KMnO_4$ ในการปรับสภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ทำให้มีปริมาณ Mn ในน้ำเพิ่มขึ้นได้ ส่วนขนาดของถ่านไม้ไผ่ที่จะนำไปใช้จริงนั้น ควรทำการคัดขนาดให้มีทั้งแบบขนาดใหญ่และขนาดเล็กผสมกัน เนื่องจากถ่านไม้ไผ่ขนาดใหญ่ไม่สามารถการดูดซับ Cd และ Zn แต่ถ่านไม้ไผ่ขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการดูดซับโละได้ทั้ง 7 ชนิด (Cd Cr Pb Cu Zn Fe และ Mn)

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของถ่านชนิดต่างๆ

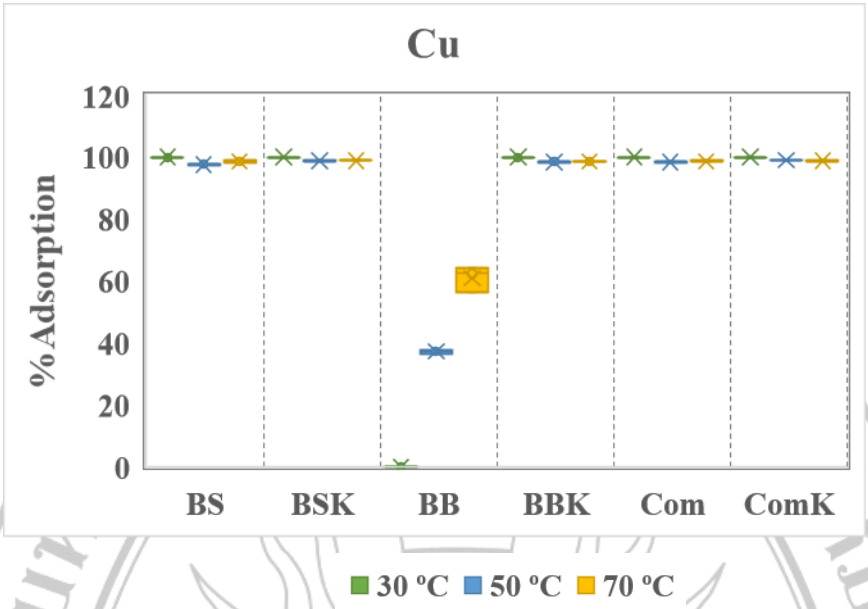
Type	%Adsorption ($\bar{x} \pm sd$)						
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
BS							
30	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0
50	99±1	76±6	98±0	100±0	84±5	85±7	20±7
70	100±0	98±0	99±0	100±0	95±2	100±0	55±7
BSK							
30	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0	100±0
50	100±0	61±2	99±0	100±0	99±0	100±0	-64±2
70	100±0	62±3	99±0	100±0	100±0	100±0	-85±66
BB							
30	0±0	0±0	0±0	15±13	0±0	0±0	-140±0
50	27±1	58±0	37±1	91±2	14±1	35±0	-2±2
70	53±4	56±2	61±4	100±0	33±3	60±5	10±3
BBK							
30	100±0	0±0	100±0	89±7	86±2	100±0	-1733±141
50	100±0	58±1	99±0	100±0	95±0	100±0	-768±88
70	100±0	77±1	99±0	100±0	99±0	100±0	-453±68
Com							
30	100±0	99±2	100±0	92±5	98±1	100±0	67±5
50	100±0	99±1	98±0	100±0	99±0	99±1	92±0
70	100±0	99±0	99±0	100±0	99±0	100±0	98±1
ComK							
30	100±0	90±1	100±0	91±3	100±0	100±0	-666±240
50	100±0	89±1	99±0	100±0	100±0	100±0	54±3
70	100±0	87±1	99±0	100±0	100±0	100±0	86±1



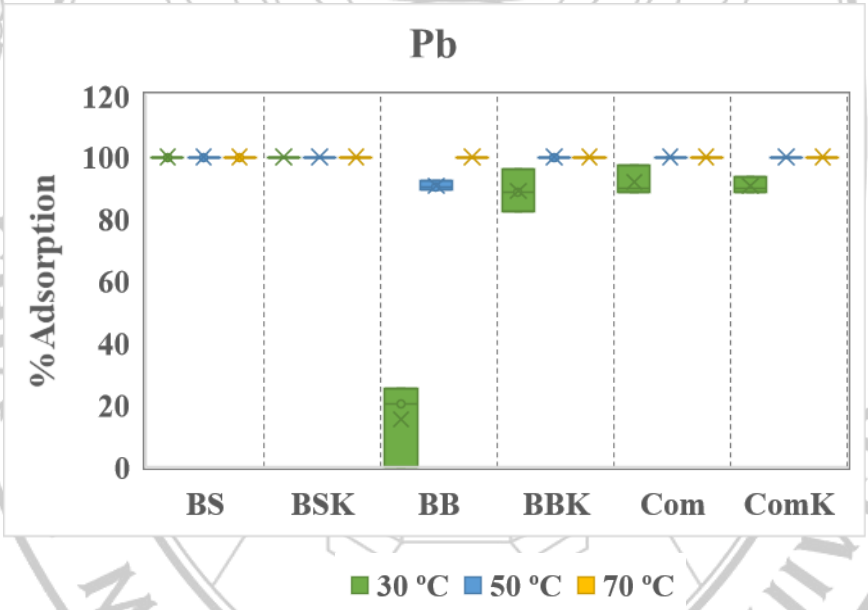
ภาพที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Cd ของถ่าน 6 ชนิด



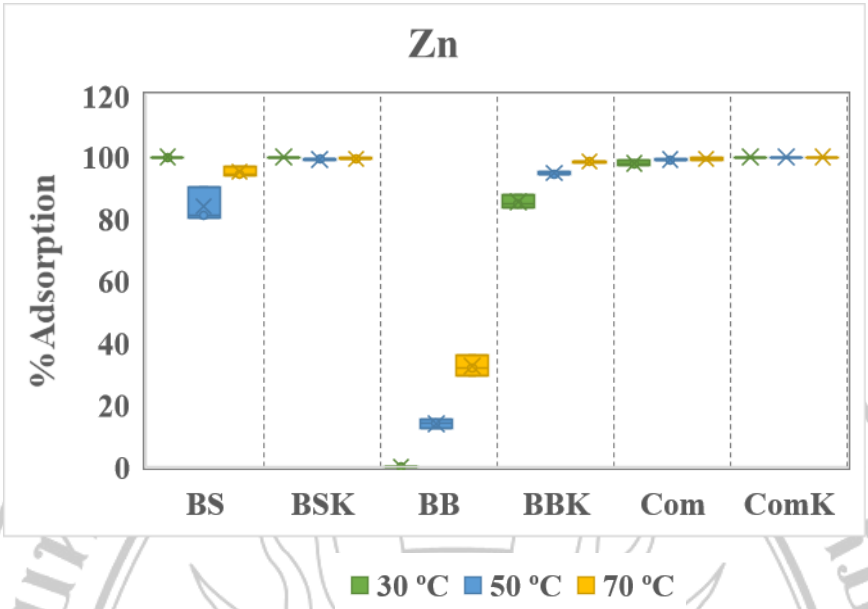
ภาพที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Cr ของถ่าน 6 ชนิด



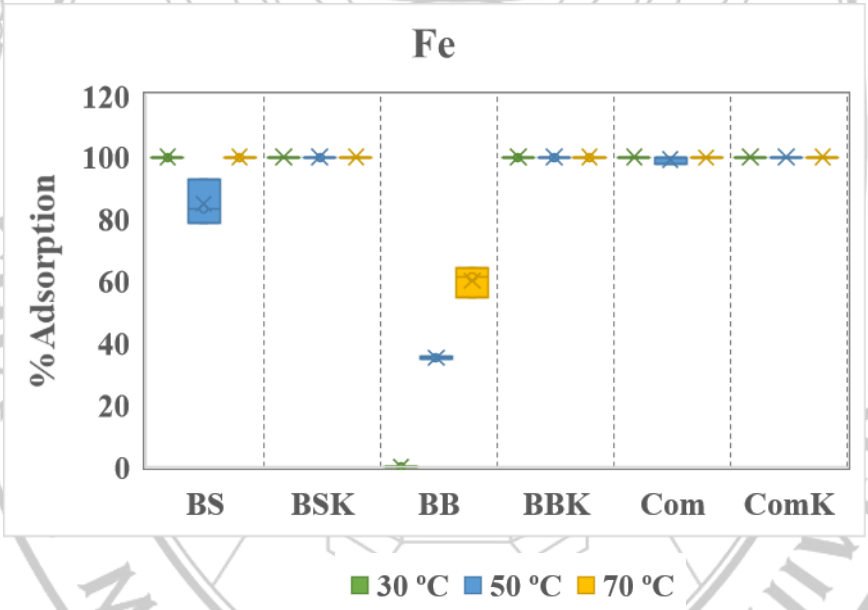
ภาพที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Cu ของถ่าน 6 ชนิด



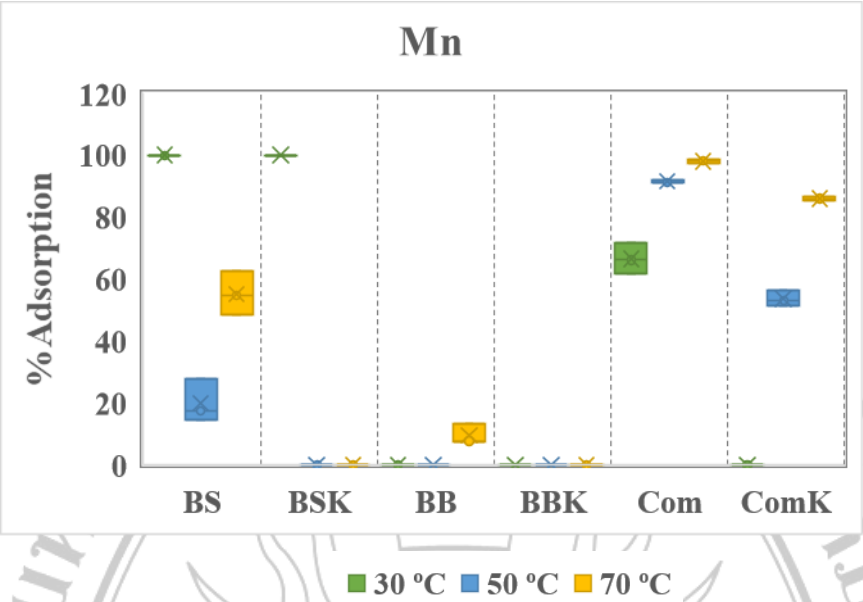
ภาพที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Pb ของถ่าน 6 ชนิด



ภาพที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Zn ของถ่าน 6 ชนิด



ภาพที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Fe ของถ่าน 6 ชนิด



ภาพที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ Mn ของถ่าน 6 ชนิด

4.3 การหาลักษณะเฉพาะสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์เจือถ่านไม้ไผ่($Ca(OH)_2$/Charcoal)

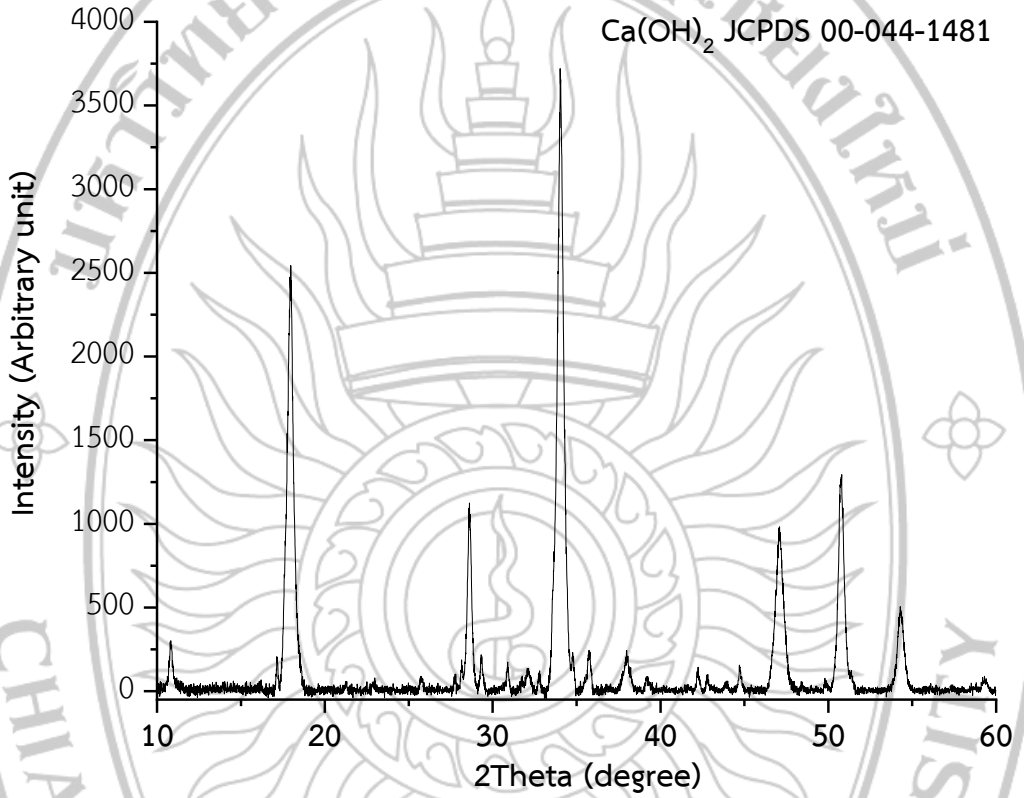
สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) สามารถสังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ด้วยเทคนิค Sonochemistry ที่อุณหภูมิห้อง ร่วมกับการเผาที่อุณหภูมิ 800 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำ $Ca(OH)_2$ปริมาณต่างๆ ไปเจือในผงถ่านไม้ไผ่โดยการคนในน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์เจือถ่านไม้ไผ่ ($Ca(OH)_2$/Charcoal) จำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ 0, 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 %w ของ $Ca(OH)_2$/Charcoal

4.3.1ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction (XRD)

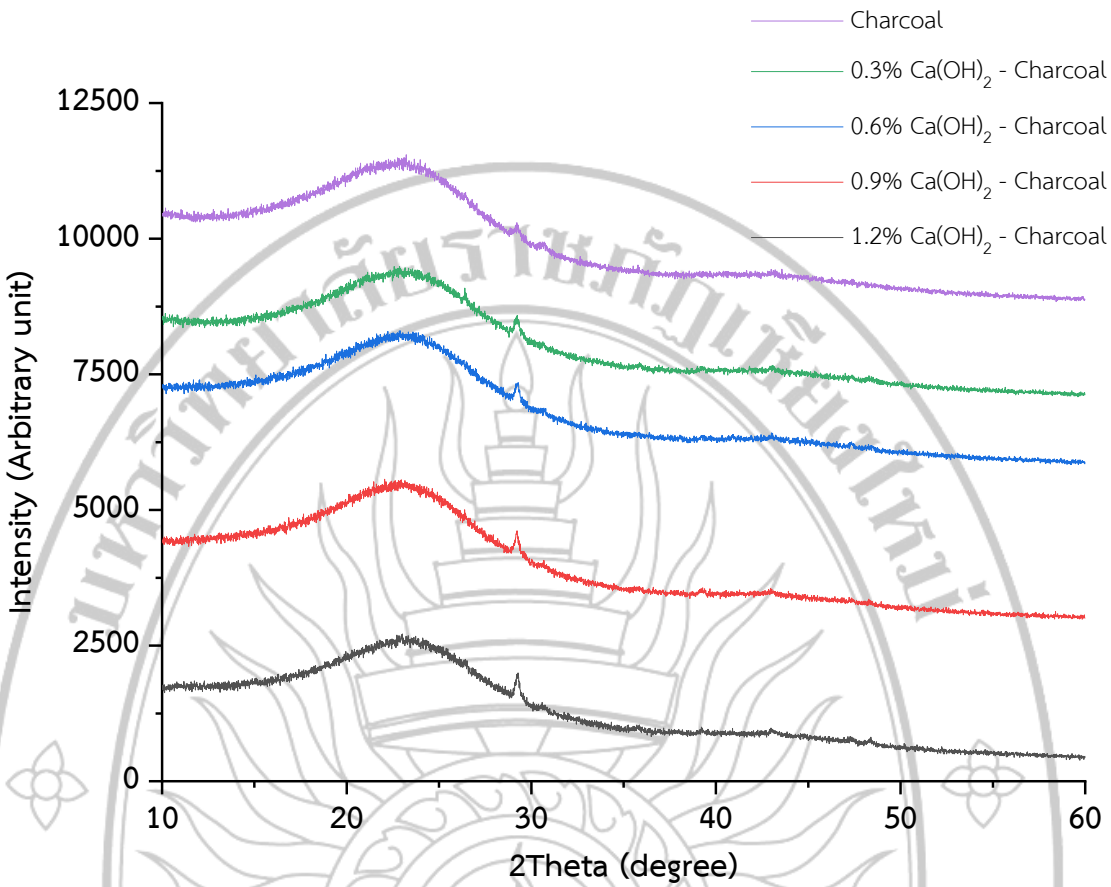
จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบ $Ca(OH)_2$จากเปลือกไข่ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ในช่วงมุม 2θ (degree) ตั้งแต่ 10-60 องศา พบว่า XRD pattern ของ $Ca(OH)_2$ มีความเข้มและตำแหน่งของพีกสอดคล้องกับ $Ca(OH)_2$ ที่ปรากฏใน JCPDS file หมายเลข 00-044-1481 ที่มีโครงสร้างแบบ Hexagonal ที่ปรากฏตรงกับระนาบ (001), (100), (101), (102), (110) และ (111) ตามลำดับ และพบสารอื่นๆ เจือปนอยู่เล็กน้อย ได้แก่ CaO_2 ตรงกับสารอ้างอิงหมายเลข JCPDS file 01-085-0514 มีโครงสร้างแบบ Tetragonal นอกจากนี้ยังพบพีกของสาร $CaCO_3$ ที่สอดคล้องกับสารอ้างอิงหมายเลข JCPDS file 00-047-1743 มีโครงสร้างแบบ Rhombohedral

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ในช่วงมุม 2θ

(degree) ตั้งแต่ 10-60 องศา ปรากฏ XRD pattern ลักษณะค่อนข้างกว้างของผลึกคาร์บอนอสันฐาน ในตำแหน่งช่วง 20-24 องศา (Kalyani & Anitha, 2013) ส่วนสารตัวอย่างที่เจือ $Ca(OH)_2$ จะพบตำแหน่งของพีกของ $Ca(OH)_2$ ที่ปรากฏใน JCPDS file หมายเลข 00-044-1481 ที่มีโครงสร้างแบบ Hexagonal ที่ปรากฏตรงกับระนาบ (001), (100), (101), (102), (110) และ (111) ตามลำดับ เจืออยู่ในพีกของคาร์บอนของถ่านไม้ไผ่



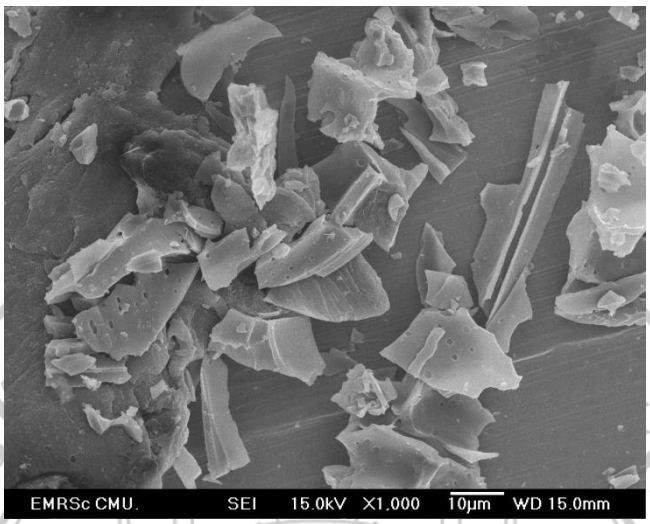
ภาพที่ 4.20 XRD Pattern ของสารประกอบ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่



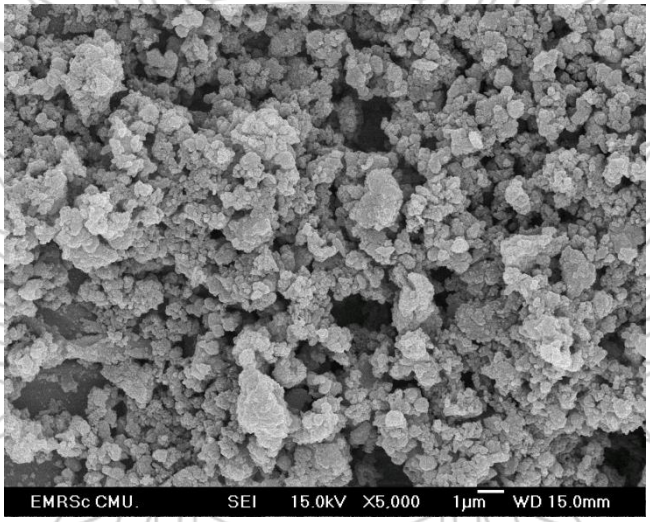
ภาพที่ 4.21 XRD patterns ของถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ ที่ปริมาณต่างๆ

4.3.2 การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy; SEM)

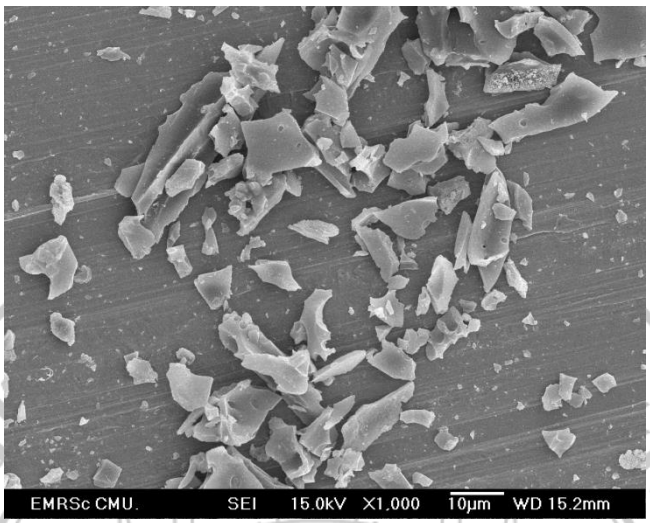
จากการศึกษาลักษณะรูปร่างของสารสังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope-SEM) พบว่าถ่านไม้ไผ่มีลักษณะเป็นรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) และมีรูพรุ่นบนผิวเป็นบางส่วน นอกจากนี้เมื่อเจือสารประกอบ $Ca(OH)_2$ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม (Spherical particle) ขนาดประมาณ 30 nm ลงไปในถ่านไม้ไผ่ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าเทคนิคนี้ไม่สามารถระบุตำแหน่งและปริมาณของอนุภาค $Ca(OH)_2$บนถ่านไม้ไผ่ได้ จึงต้องนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray *Spectroscopy* (EDS) ต่อไป



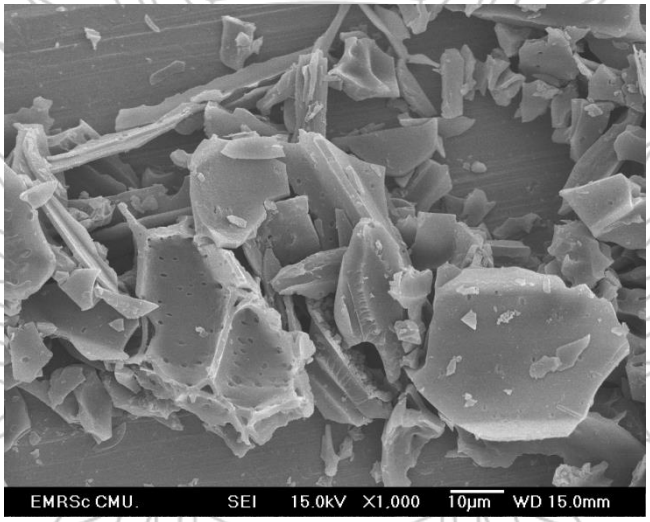
ภาพที่ 4.22 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของถ่านไม้ไผ่



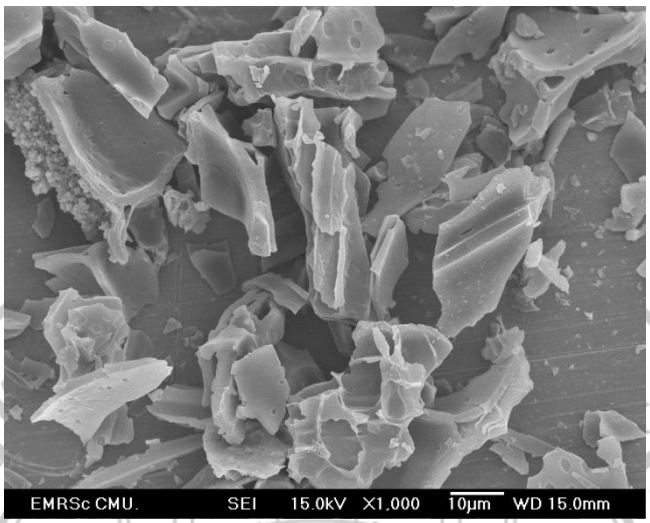
ภาพที่ 4.23 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของ $Ca(OH)_2$จากเปลือกไข่



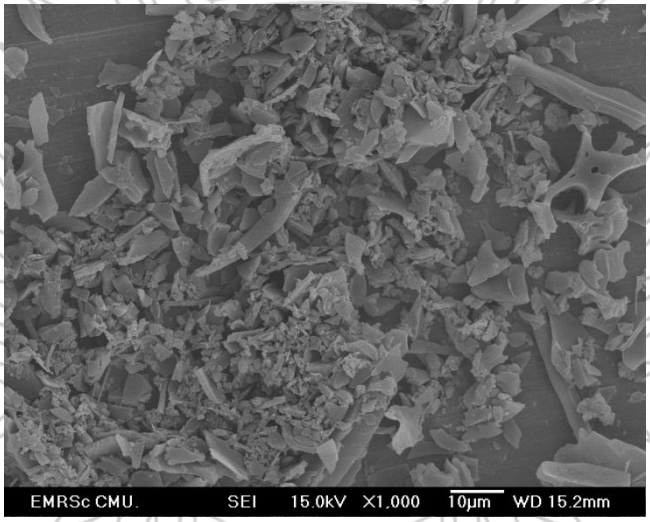
ภาพที่ 4.24 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$จากเปลือกไข่ 0.3%w



ภาพที่ 4.25 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$จากเปลือกไข่ 0.6%w



ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ 0.9%w



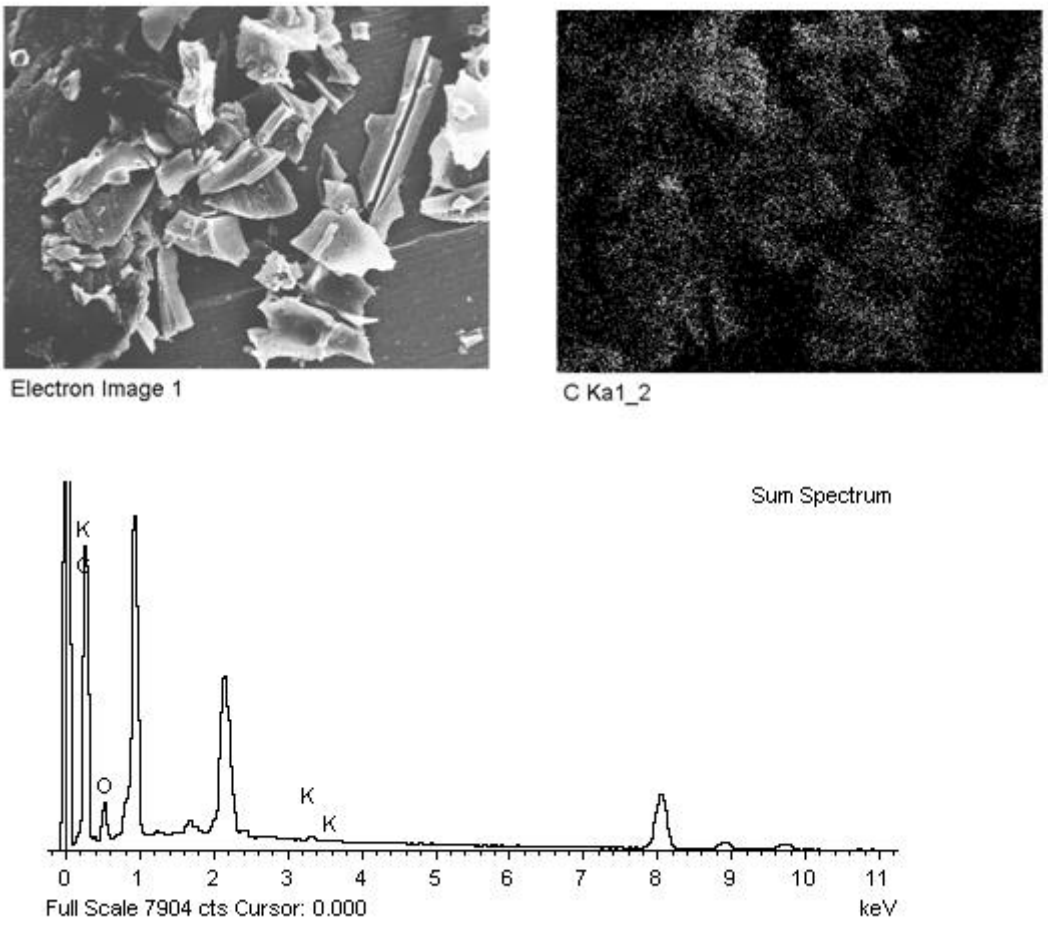
ภาพที่ 4.27 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ 1.2%w

4.3.3 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray ***Spectroscopy*** (EDS)

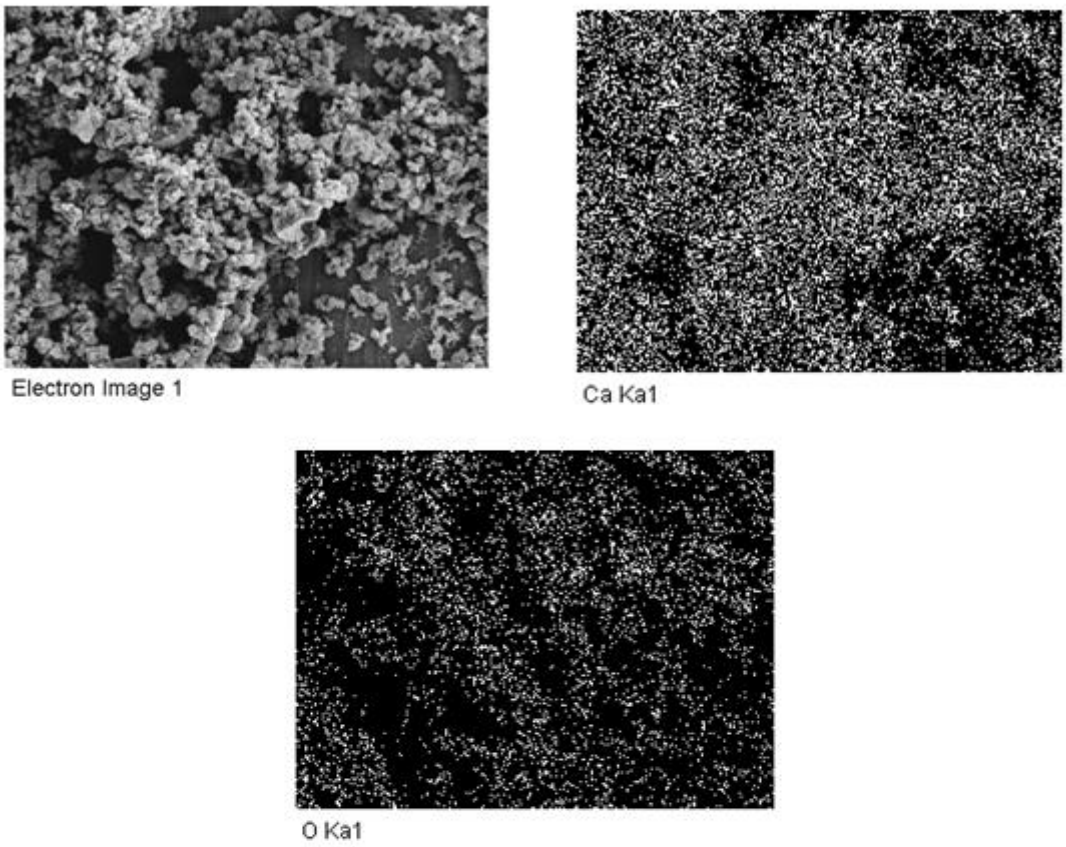
จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่าในสารสังเคราะห์พบการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบของ $Ca(OH)_2$ได้แก่ ธาตุแคลเซียม (Ca) และธาตุออกซิเจน (O) และถ่านไม้ไผ่จะพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ทั่วพื้นที่ที่เลือกศึกษาของสารตัวอย่าง ส่วนธาตุไฮโดรเจน (H) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่างไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคนี้ นอกจากนี้ข้อมูลปริมาณของธาตุในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก แสดงดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงปริมาณธาตุในสารสังเคราะห์ ถ่านไม้ไผ่เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่

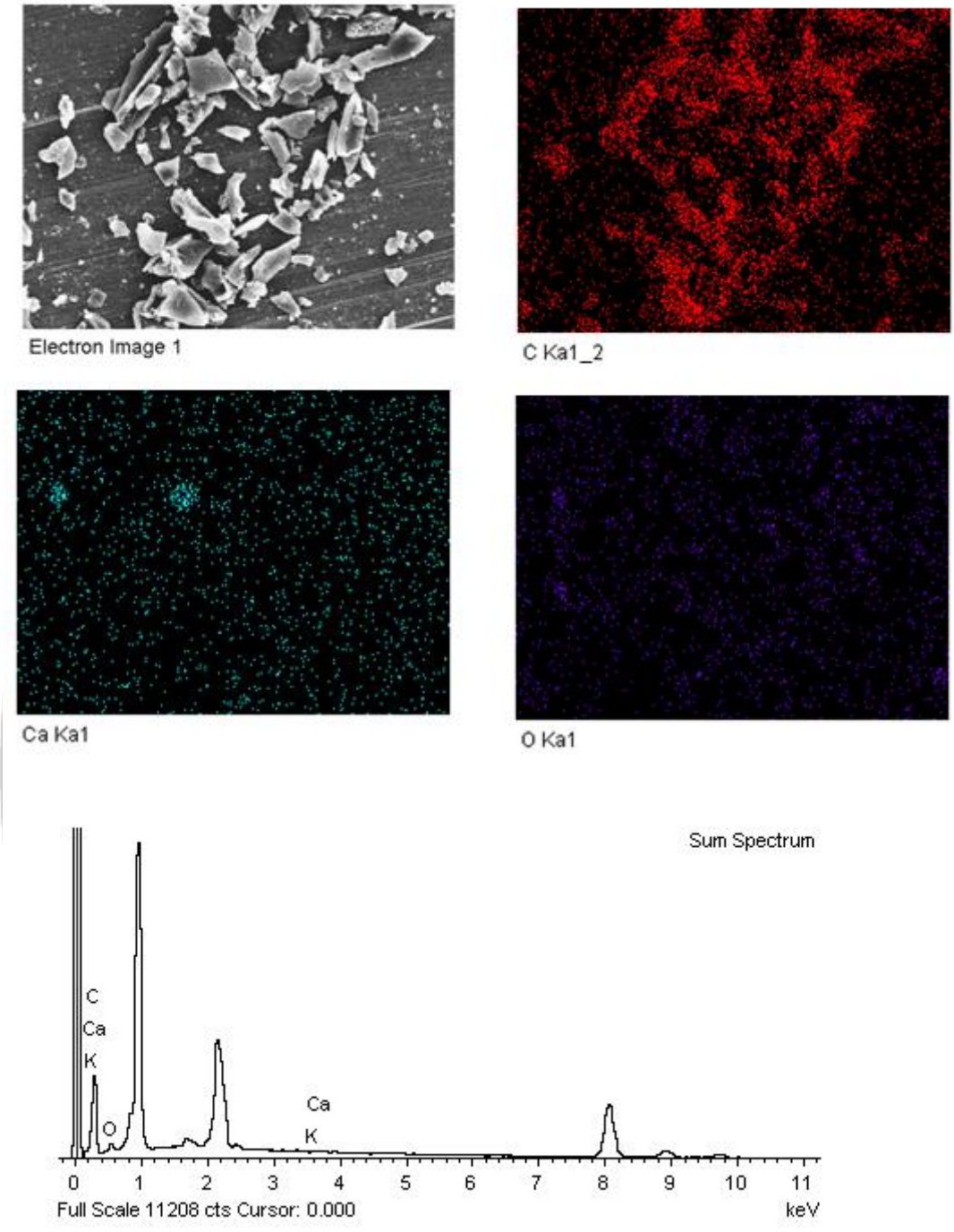
ตัวอย่าง	**% น้ำหนักของธาตุ**		
	Ca	O	C
$Ca(OH)_2$	41.54	58.46	
0.3%$Ca(OH)_2$/Charcoal	1.27	23.38	73.69
0.6%$Ca(OH)_2$/Charcoal	0.80	20.10	77.55
0.9%$Ca(OH)_2$/Charcoal	0.91	18.15	76.76
1.2%$Ca(OH)_2$/Charcoal	2.00	22.23	74.67



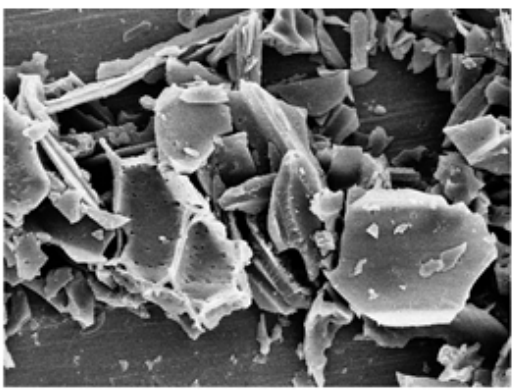
ภาพที่ 4.28 ภาพการกระจายของธาตุและกราฟแสดงปริมาณธาตุของถ่านไม้ไผ่



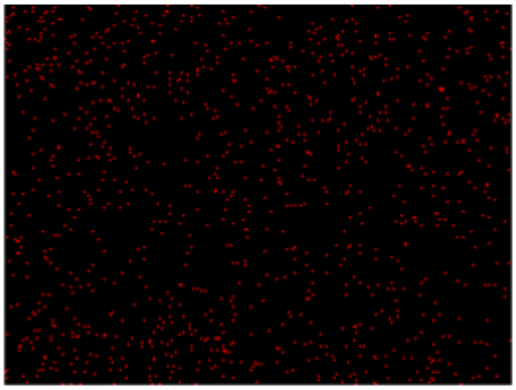
ภาพที่ 4.29 ภาพการกระจายของธาตุและกราฟแสดงปริมาณธาตุของ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่



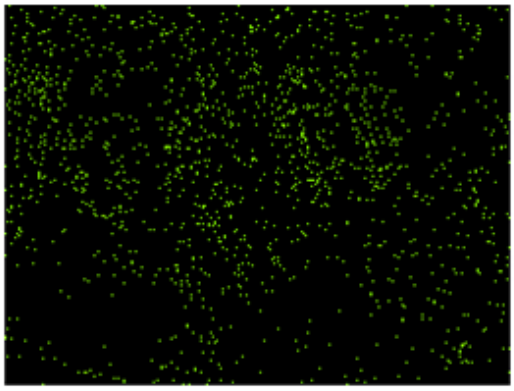
ภาพที่ 4.30 ภาพการกระจายของธาตุและกราฟแสดงปริมาณธาตุของถ่านไม้ไผ่ เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ 0.3%w



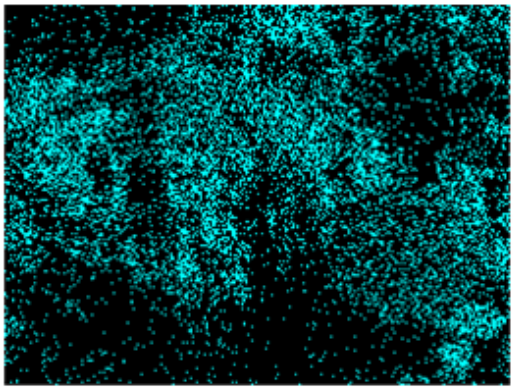
Electron Image 1



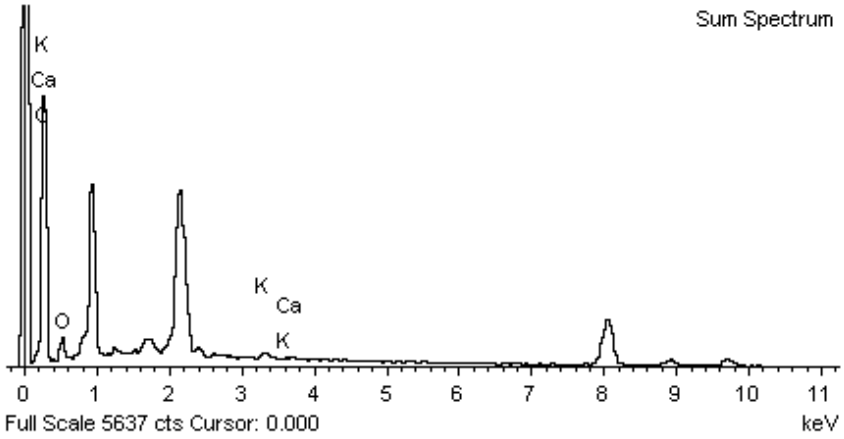
Ca Ka1



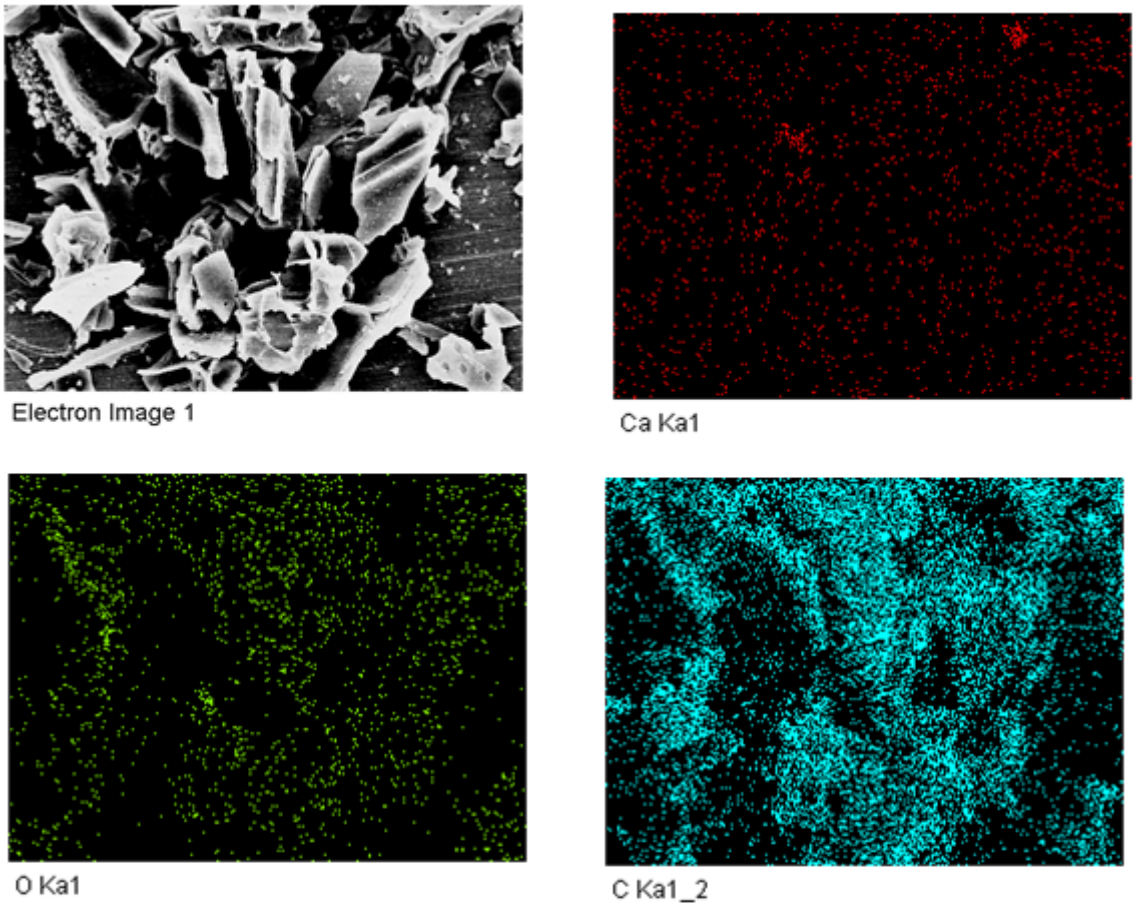
O Ka1



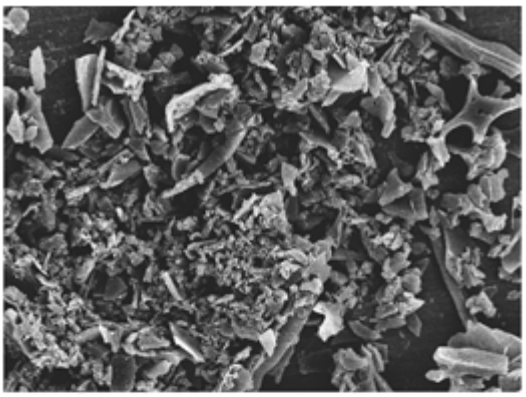
C Ka1_2



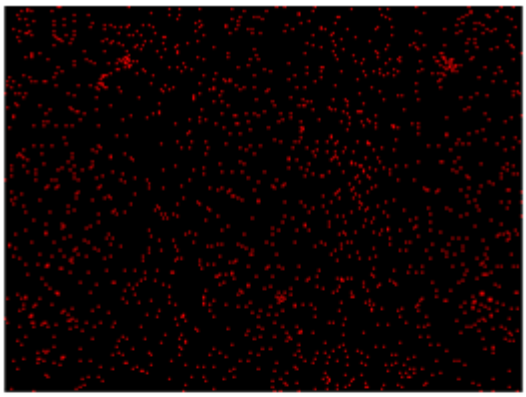
ภาพที่ 4.31 ภาพการกระจายของธาตุและกราฟแสดงปริมาณธาตุของถ่านไม้ไผ่ เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ 0.6%w



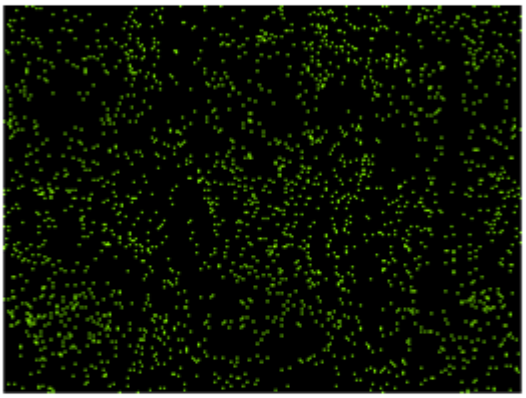
ภาพที่ 4.32 ภาพการกระจายของธาตุและกราฟแสดงปริมาณธาตุของถ่านไม้ไผ่ เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ 0.9%w



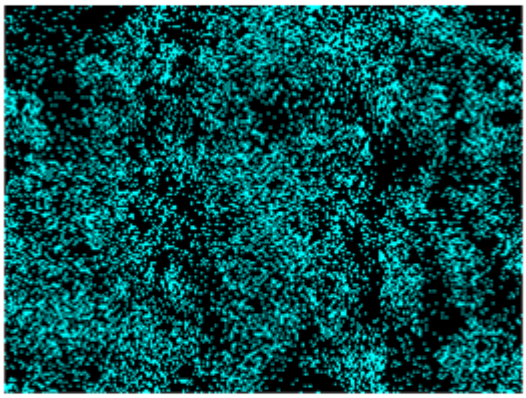
Electron Image 1



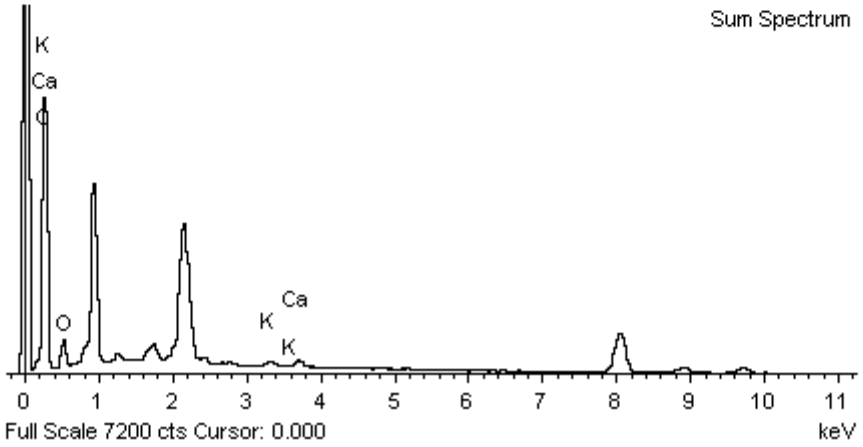
Ca Ka1



O Ka1



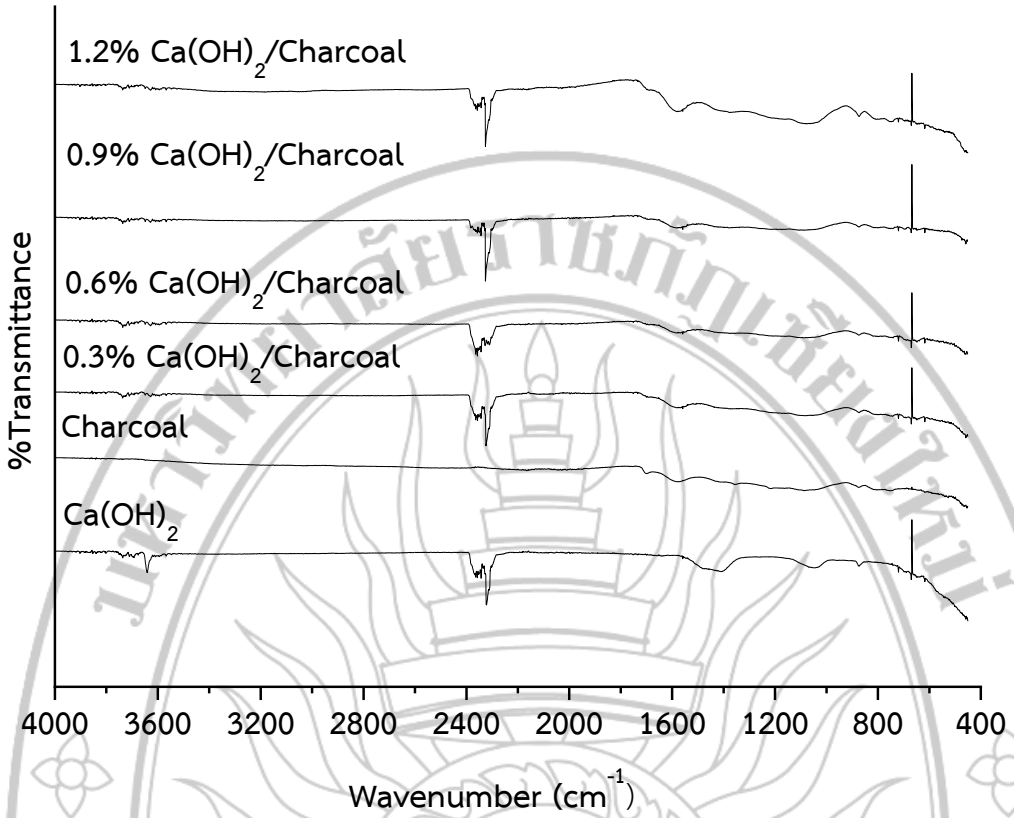
C Ka1_2



ภาพที่ 4.33 ภาพการกระจายของธาตุและกราฟแสดงปริมาณธาตุของถ่านไม้ไผ่ เจือ $Ca(OH)_2$ จากเปลือกไข่ 1.2%w

4.2.4 ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared (***FTIR***) Spectroscopy)

จากการศึกษาพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชั่นในโมเลกุลของสารสังเคราะห์ ด้วย เครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโทรไมโครสโคป (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ในช่วงความยาวคลื่น 4000-400 cm^{-1} พบว่า พันธะของสารที่พบสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ปรากฏตำแหน่งสเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสาร $Ca(OH)_2$ ได้แก่ พีกตำแหน่ง 3647 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H ของสารประกอบ $Ca(OH)_2$ (Khachani al., 2014; Cavallaro al., 2017; Zi al., 2018) พีกขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งประมาณ 510 cm^{-1} สอดคล้องกับโหมดการสั่นของพันธะCa-O (Nyquist & Kagel, 1971; Habte al., 2019; Martinez al., 2011; Nagaraju al., 2017) และที่ตำแหน่ง 1440, 1068 และ 874 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C-O ของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และพบพีคการดูดกลืนแสงในช่วงแคบที่ตำแหน่ง 2327 cm^{-1} ซึ่งคาดว่าเกิดจากแก๊ส CO_2 ทั้งนี้จากผลดังกล่าวทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า $Ca(OH)_2$ เกิดการปนเปื้อน CO_2 ในบรรยากาศเล็กน้อย ทำให้พบโมเลกุลของคาร์บอเนตปนอยู่ด้วย ซึ่งสาร $CaCO_3$ ที่เกิดขึ้นนั้น ไม่สามารถวิเคราะห์พบด้วยเทคนิค XRD (Khachani al., 2014) และปรากฏตำแหน่งสเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของถ่าน ได้แก่ พีกตำแหน่ง 2,919 cm^{-1} และ 2,851 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ symmetric stretchingและ asymmetric stretching ของพันธะ C-H ของ aliphatic acid พีกตำแหน่ง 1,698 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ stretching ของหมู่คาร์บอนิล (–COOH, $–COOCH_3$) พีกตำแหน่ง 1,590 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ stretching ของพันธะ C=C ในพันธะ aromatic C-C พีกตำแหน่งประมาณ 1430 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ symmetric bending ของโมเลกุล CH_3 ตำแหน่งพีกประมาณ 1,262 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ stretchingของพันธะ C-N ในโครงสร้าง aromatic tertiary amines และพบพีกตำแหน่ง ประมาณ 880และ750 cm^{-1} ที่เกิดจากการสั่นแบบ out-of-planebending ของพันธะ C-H ในโมเลกุลวงแหวน aromatic (Rajak al., 2018) และสำหรับสเปกตรัมของ 0.3%, 0.6%, 0.9% และ 1.2% $Ca(OH)_2$/Charcoal จะเห็นว่า พบตำแหน่งพีกของ $Ca(OH)_2$ ที่เจือปนอยู่กับตำแหน่งพีกของถ่าน โดยตำแหน่งพีกที่พบสรุปดังตาราง...



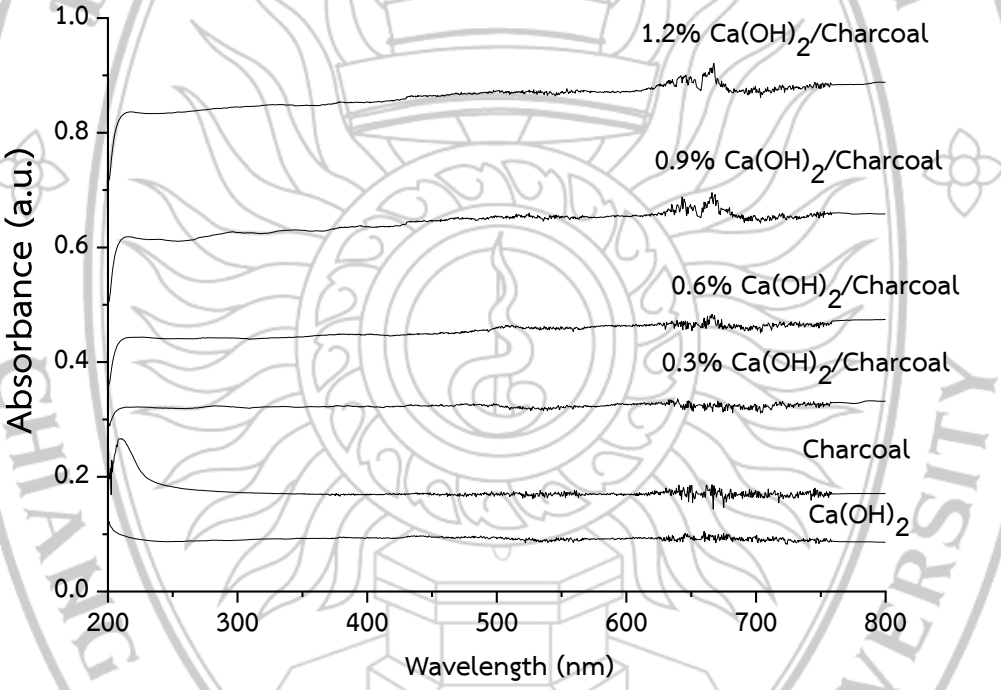
ภาพที่ 4.34 FT-IR spectra ของ Ca(OH)2, Charcoal และCa(OH)2/Charcoal

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค FT-IR

สารสังเคราะห์	ชนิดพันธะ	ตำแหน่ง (cm^{-1})
$Ca(OH)_2$	Ca-O O-H C-O	510 cm^{-1} 3647 cm^{-1} 2327, 1445, 1060, 874 และ 2327 cm^{-1}
Charcoal	C-H –COOH, $–COOCH_3$ C=C CH_3 C-N C-H	2,919และ 2,851 cm^{-1} 1698 cm^{-1} 1590 cm^{-1} 1430 cm^{-1} 1262 cm^{-1} 880และ750 cm^{-1}

4.3.5 ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy)

ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) ได้สเปกตราการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm โดยปกติวัสดุจำพวกคาร์บอนจะปรากฏการแทรนซิชันของอิเล็กตรอนของพันธะ $\pi \rightarrow \pi^*$ ในช่วงความความคลื่น 180-260 nm และสำหรับสารตัวอย่าง ได้แก่ Charcoal, 0.5%, 1.0%, และ 1.5% Ag/$Ca(OH)_2$/Charcoal ปรากฏพีกการดูดกลืนแสงสูงสุดของถ่าน (Charcoal) ที่ตำแหน่ง 209 nm (Kumar al., 2012) และเมื่อเจือ $Ca(OH)_2$ ลงไปในถ่าน พบว่าถ่านจะมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 4.35 UV-visible spectra ของCa(OH)2, Charcoal และCa(OH)2/Charcoal

4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์เจือถ่านไม้ไผ่ ($Ca(OH)_2$/Charcoal)

วิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรีย*Escherichia coli*และ*Staphylococcus aureus* ของสารประกอบ$Ca(OH)_2$/Charcoal, pure $Ca(OH)_2$และยา Tetracycline ภายใต้แสงยูวีเอ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการยับยั้งแบคทีเรีย ชนิด Escherichia coli และ Staphylococcus aureus ของ 0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2% $Ca(OH)_2$/Charcoal และ pure $Ca(OH)_2$

Samples	Inhibition rate (%)*	
	Escherichia coli	*Staphylococcus aureus*
Control (Tetracycline)	99.4 ±0.02	97.5 ±0.05
0 % $Ca(OH)_2$/Charcoal	24.8 ±0.10	15.4 ±0.20
0.3 % $Ca(OH)_2$/Charcoal	32.5 ±0.06	22.8 ±0.05
0.6 % $Ca(OH)_2$/Charcoal	35.2 ±0.07	25.1 ±0.10
0.9 % $Ca(OH)_2$/Charcoal	50.7 ±0.20	34.0 ±0.15
1.2 % $Ca(OH)_2$/Charcoal	68.6 ±0.10	54.5 ±0.05
Pure $Ca(OH)_2$	99.0 ±0.00	96.4 ±0.00

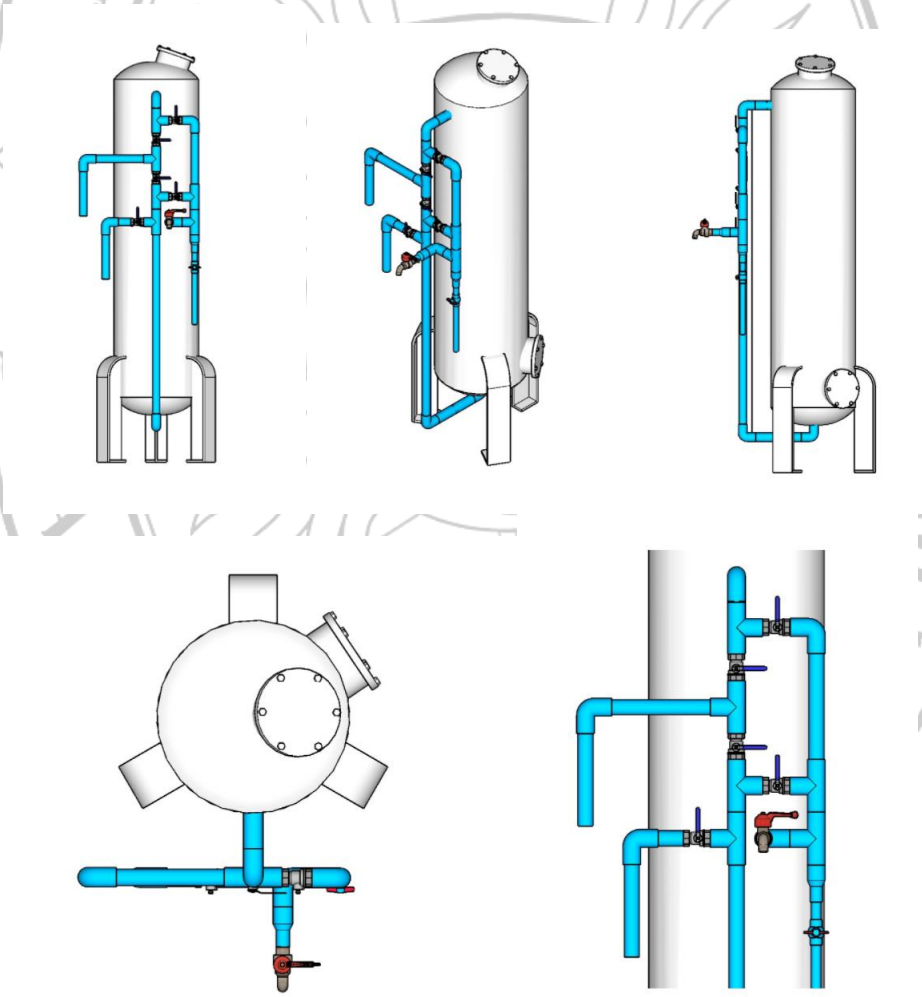
***** All experiments were performed in triplicate.

พบว่า Pure $Ca(OH)_2$ สามารถยับยั้งเชื้อทั้งสองชนิดได้เกือบ 100% เทียบเท่ากับการยับยั้งแบคทีเรียด้วยยา Tetracycline และเมื่อนำ $Ca(OH)_2$มาเจือในผงถ่านไม้ไผ่ พบว่าสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ดีขึ้นเมื่อเจือ $Ca(OH)_2$ ในปริมาณที่มากขึ้น และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันในแบคทีเรียทั้งสองชนิดที่ทำการศึกษาแต่จะสามารถยับยั้งแบคทีเรีย *Escherichia coli* ได้ดีกว่า *Staphylococcus aureus*

4.5 ระบบบำบัดน้ำ

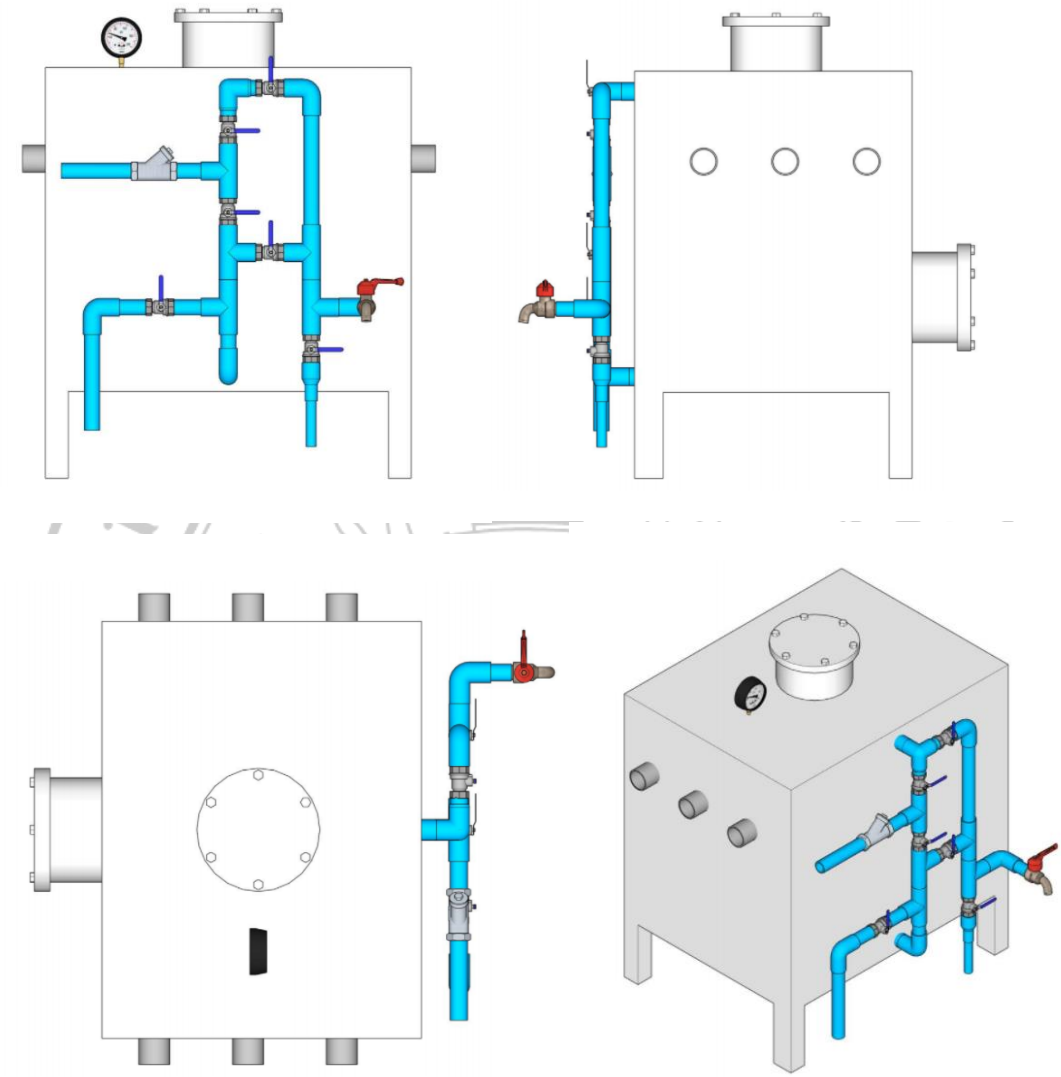
การออกแบบระบบบำบัดน้ำบาดาลนั้นทางคณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจพื้นที่การใช้งานจริงที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนพัฒนาผลิตภัณฑ์พืชผักสมุนไพรและผลไม้ ตำบลบ้านโฮ่ง อำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน รวมทั้งสอบถามข้อมูลความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ พบว่าทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ มีความต้องการระบบบำบัดน้ำบาดาลที่ทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ ได้ขุดเจาะไว้ใช้สำหรับแปลงเกษตร

เพื่อนำน้ำที่ได้จากการบำบัดไปใช้ทดแทนน้ำประปาที่ต้องใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ ที่มีอัตราการใช้น้ำประปาเฉลี่ยวันละ 500 ลิตร ดังนั้นจากผลการวิจัยข้างต้นพบว่าถ่านไม้ไผ่สามารถดูดซับโลหะบางชนิดในน้ำได้ จึงได้ออกแบบถังกรองสำหรับบรรจุถ่านไม้ไผ่ที่ทำจากเหล็กความหนา 3 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ความสูง 1.2 m (ไม่รวมขาตั้ง) ด้านในตัวถังเคลือบด้วยอีพ็อกซี่เพื่อป้องกันการเกิดสนิม ได้ทำการติดตั้งระบบวาล์วน้ำเข้า/น้ำออก ที่สามารถใช้ได้ทั้งระบบการกรอง ระบบการล้างถังและวัสดุดูดซับ รวมทั้งสามารถเปิดเก็บน้ำตัวอย่างสำหรับนำมาวิเคราะห์ได้ ถังกรองมีฝาเปิด/ปิดด้านบนถังไว้สำหรับใส่วัสดุดูดซับ ส่วนด้านล่างของถังกรองมีฝาเปิด/ปิดสำหรับนำวัสดุดูดซับออก แสดงดังภาพที่ 4.36 การบรรจุวัสดุดูดซับลงในถังกรองเรียงลำดับจากล่างขึ้นบนดังนี้ 1) กรวดหยาบเพื่อป้องกันถ่านไม้ไผ่หลุดออกผ่านช่องของสเตนเนอร์ 2) ถ่านไม้ไผ่ และ 3) ทรายละเอียดเพื่อป้องกันไม่ให้ถ่านไม้ไผ่ลอย โดยก่อนการใช้งานจริงต้องเปิดน้ำเข้าระบบเพื่อล้างฝุ่นละอองกระทั่งน้ำขาออกใสจึงจะสามารถเชื่อมต่อระบบเข้ากับถังกรองตัวถัดไปได้



ภาพที่ 4.36 ถังกรองสำหรับบรรจุถ่านไม้ไผ่

นอกจากนี้จากผลการวิจัยข้างต้นยังพบว่า สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่นั้นสามารถยับยั้งการเกิดเชื้อจุลินทรีย์ได้และจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นหากทำงานภายใต้แสง Black light ดังนั้นจึงได้ออกแบบถังกรองที่บรรจุสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ทำจากเหล็กความหนา 4 mm ขนาด 80 cm x 80 cm x 80 cm (กว้างx ยาวxสูง) ซึ่งมีช่องสำหรับใส่หลอดไฟ Black light จำนวน 3 ช่อง ที่ตำแหน่งตามความสูงของถังวัดจากด้านบนลงมา 20 cm ด้านในตัวถังเคลือบด้วยอีพ็อกซี่เพื่อป้องกันการเกิดสนิม และได้ทำการติดตั้งระบบวาล์วน้ำเข้า/น้ำออก ที่สามารถใช้ได้ทั้งระบบกรอง ระบบการล้างวัสดุดูดซับ และสามารถเปิดเก็บน้ำตัวอย่างสำหรับนำไปวิเคราะห์ได้ ด้านบนของถังกรองมีฝาเปิด/ปิดสำหรับใส่วัสดุดูดซับ นอกจากนี้มีการติดตั้งวาล์วลดแรงดันไว้ที่ชุดของระบบวาล์ว และติดตั้งเกจวัดแรงดันภายในตัวถังที่ตำแหน่งด้านบนของตัวถัง เนื่องจากเมื่อมีการเดินระบบจะเกิดแรงดันสะสมที่ถังใบนี้อาจทำให้การเดินระบบบำบัดไม่สมบูรณ์หรือเกิดความเสียหายได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.37 ส่วนด้านล่างของถังกรองมีฝาเปิด/ปิดสำหรับนำวัสดุดูดซับออก การบรรจุวัสดุดูดซับลงในถังกรองเรียงลำดับจากล่างขึ้นบนดังนี้ 1) กรวดหยาบเพื่อป้องกันถ่านไม้ไผ่หลุดออกผ่านช่องของสเตนเนอร์ 2) สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่ โดยก่อนการใช้งานจริงต้องเปิดน้ำเข้าระบบเพื่อล้างฝุ่นละอองกระทั่งน้ำขาออกใสจึงจะสามารถเชื่อมต่อระบบเข้ากับถังกรองตัวถัดไปได้ จากนั้นติดตั้งหลอดไฟ Black light ขนาด 36 W ความยาว 120 cm จำนวน 3 หลอด เพื่อให้การทำงานของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่นั้นสามารถยับยั้งเกิดเชื้อจุลินทรีย์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

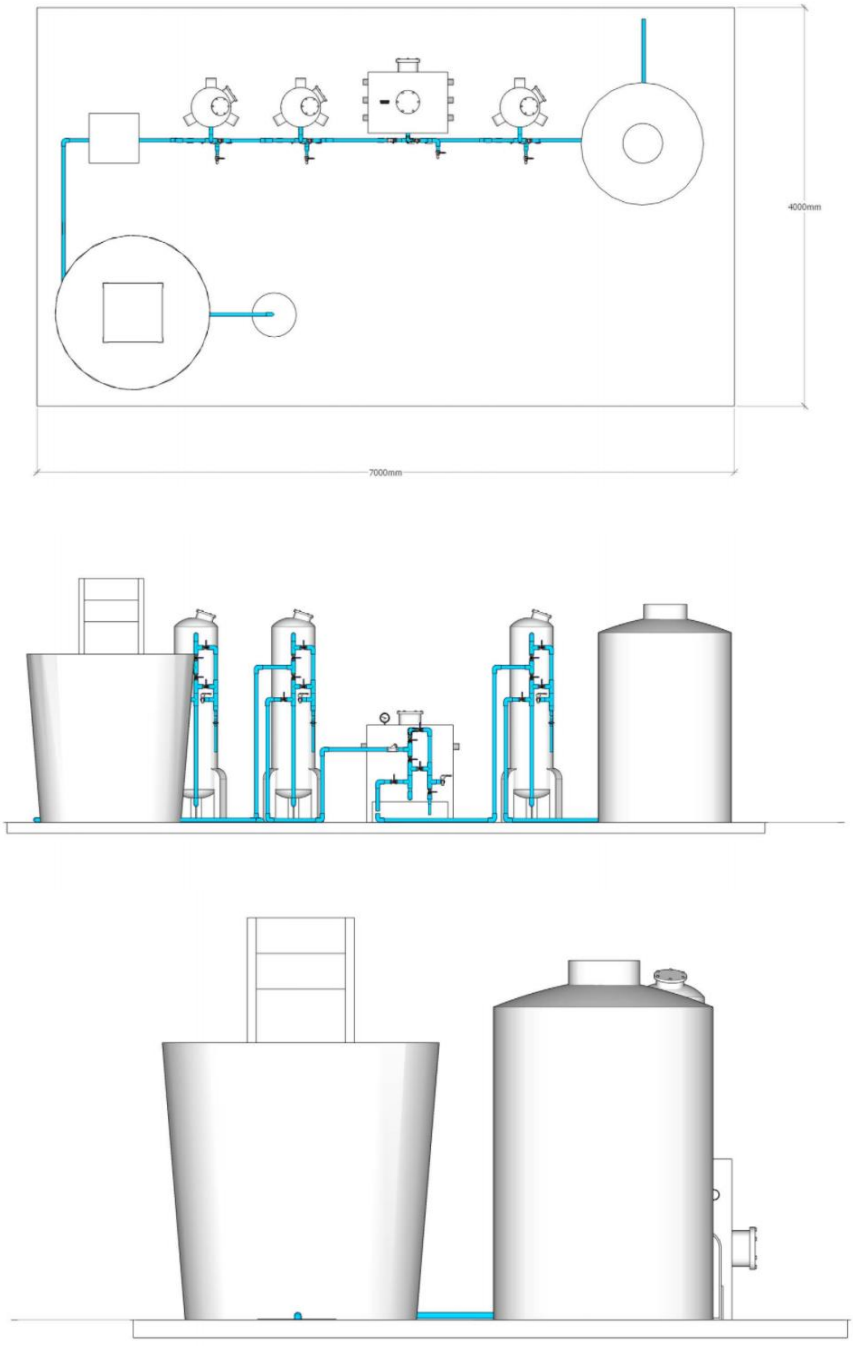


ภาพที่ 4.37 ถังกรองสำหรับบรรจุสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่

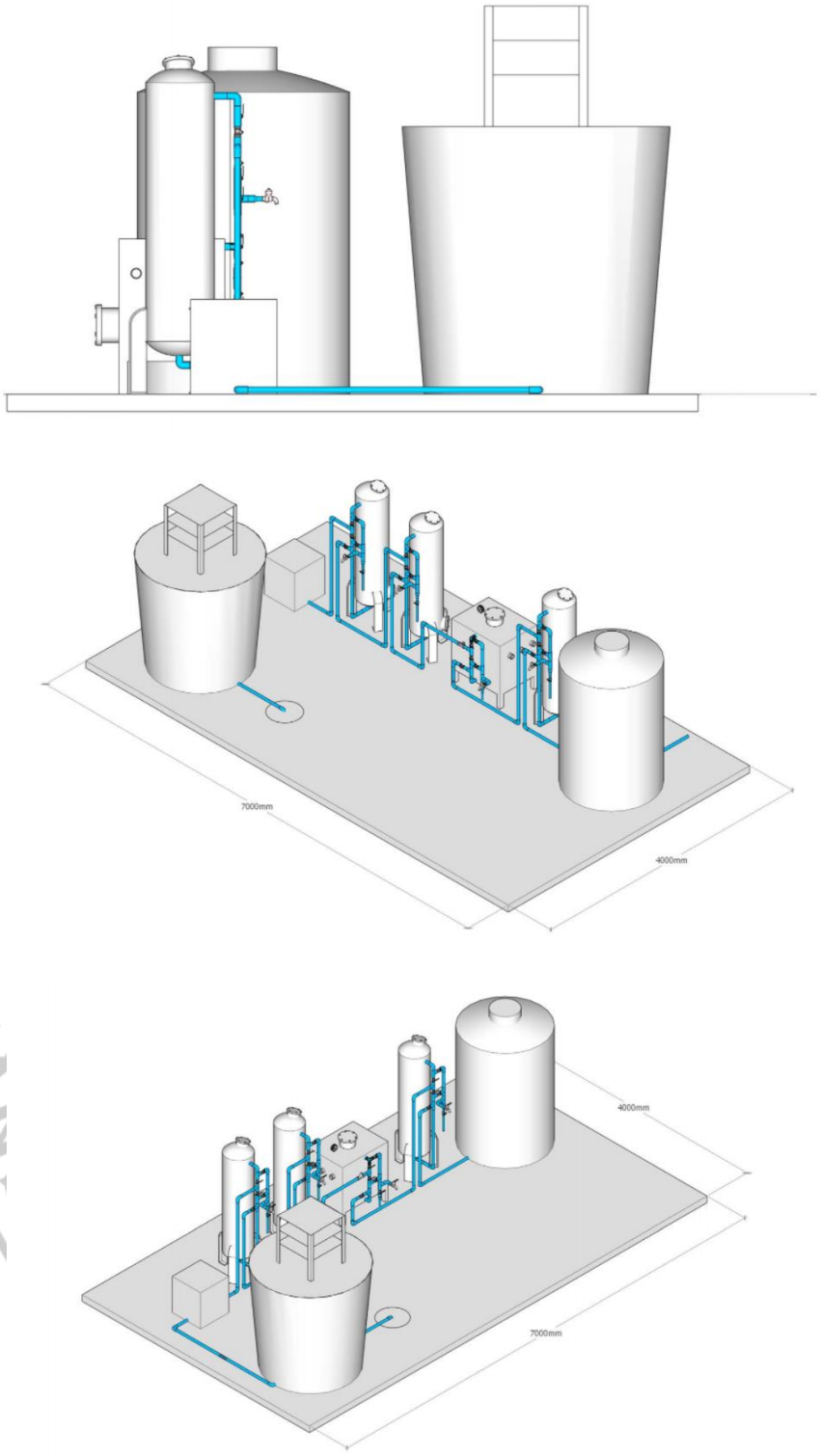
เมื่อทางคณะผู้วิจัยได้ถังกรองทั้งสองแบบข้างต้นแล้ว ได้ออกแบบและติดตั้งต้นแบบระบบบำบัดน้ำบาดาลเพื่อการบริโภคที่ใช้วัสดุบำบัดน้ำบาดาลที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งเศษไม้ไผ่และเปลือกไข่ที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนพัฒนาผลิตภัณฑ์พืชผักสมุนไพร และผลไม้ ต.บ้านโฮ่ง อ.บ้านโฮ่ง จ.ลำพูน ซึ่งประกอบด้วย 1) ปั๊มอัตโนมัติสำหรับปั๊มน้ำจากจุดจ่ายน้ำบาดาลเข้าถังเก็บน้ำ 2) ถังเก็บน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด พร้อมติดตั้งชั้นกรองอากาศสแตนเลส 3) ปั๊มอัตโนมัติสำหรับดันกรอง 4) ถังกรองที่บรรจุถ่านไม้ไผ่ จำนวน 2 ถัง 5) ถังกรองที่บรรจุสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่ พร้อมระบบแสงไฟจากหลอด Black light 3 หลอด จำนวน 1 ถัง 6) ถังกรองที่บรรจุถ่านไม้ไผ่ จำนวน 1 ถัง 7) ถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดพร้อมติดตั้งระบบลูกลอยไฟฟ้าตัด

ต่อการทำงานเต็ม-แห้ง 8) ปั๊มอัตโนมัติจ่ายเข้าอาคารแปรรูปผัก ผลไม้ และสมุนไพรของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ ดังแสดงในภาพที่ 4.38

หลักการในการทำงานของต้นแบบระบบบำบัดน้ำบาดาลนี้เริ่มจากปั๊มอัตโนมัติจะปั๊มน้ำจากจุดจ่ายน้ำบาดาลผ่านชั้นกรองอากาศสแตนเลสเข้าถังเก็บน้ำ จากนั้นปั๊มอัตโนมัติจะปั๊มน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าถังกรองที่บรรจุถ่านไม้ไผ่ใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แล้วน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถ่านไม้ไผ่ในถังกรองทั้ง 2 ถังนี้จะไหลเข้าสู่ถังกรองที่บรรจุสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเปลือกไข่ที่ผสมกับถ่านไม้ไผ่ เปิดระบบแสงไฟจากหลอด Black light จากนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังใบนี้จะไหลเข้าสู่ถังกรองที่บรรจุถ่านไม้ไผ่ใบสุดท้าย แล้วน้ำที่ผ่านการบำบัดจะไหลเข้าเก็บในถังเก็บน้ำกระทั้งน้ำเต็มถังระบบลูกลอยทำงานจากนั้นปั๊มอัตโนมัติจะหยุด และจะทำงานอีกครั้งเมื่อระดับน้ำในถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วลดลง ซึ่งหลักการนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ถ่ายทอดให้กับผู้ดูแลและตัวแทนกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ



ภาพที่ 4.38 แบบต้นแบบระบบบำบัดน้ำบาดาลเพื่อการบริโภค



ภาพที่ 4.38 แบบต้นแบบระบบบำบัดน้ำบาดาลเพื่อการบริโภค (ต่อ)

ภาพที่ 4.39 ต้นแบบระบบบำบัดน้ำบาดาลเพื่อการบริโภค

4.6 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะในน้ำตัวอย่าง

หลังจากติดตั้งระบบบำบัดน้ำพร้อมทั้งเปิดระบบใช้งานแล้ว มีการเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 3 ครั้ง ห่างกันเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยเก็บครั้งละ 5 จุด ดังนี้

จุดที่ 1 ตัวอย่างน้ำก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด

จุดที่ 2 ตัวอย่างน้ำหลังจากการบำบัดในถังใบที่ 1 (ถังที่บรรจุ bamboo charcoal)

จุดที่ 3 ตัวอย่างน้ำหลังจากการบำบัดในถังใบที่ 2 (ถังที่บรรจุ activated bamboo charcoal)

จุดที่ 4 ตัวอย่างน้ำหลังจากการบำบัดในถังใบที่ 3 (ถังที่บรรจุสารยับยั้งแบคทีเรีย $Ca(OH)_2$/charcoal)

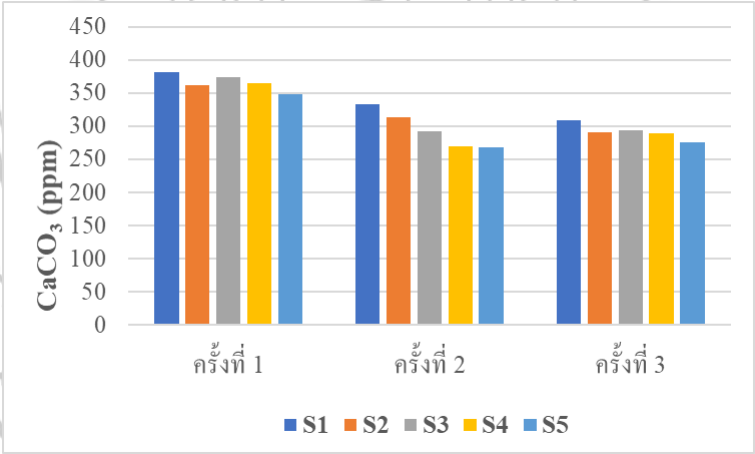
จุดที่ 5 ตัวอย่างน้ำหลังจากการบำบัดในถังใบที่ 4 (น้ำที่เสร็จสิ้นการบำบัดในระบบทั้งหมด)

นำน้ำตัวอย่างที่เก็บมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง ICP-OES ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะของน้ำตัวอย่างที่เก็บ 5 จุด จำนวน 3 ครั้ง แสดงดังตารางที่ xxx ซึ่งพบว่าน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะเกือบทุกชนิดไม่เกินมาตรฐานกล่าวคือ ต้องไม่พบ แคดเมียม (Cd), โคบอลท์ (Cr), ตะกั่ว (Pb) ปริมาณของทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และ แมงกานีส (Mn) พบได้ไม่เกิน 1.0, 5.0, และ 0.3 ppm ตามลำดับ ยกเว้นเหล็ก (Fe) ที่มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 0.5 ppm แต่เมื่อน้ำผ่านระบบกรองมีผลทำให้ความเข้มข้นของเหล็ก ลดลงจนผ่านค่ามาตรฐาน ในกรณีของแมงกานีสกลับพบว่า น้ำหลังผ่านระบบบำบัดที่ค่าสูงขึ้นและสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวัสดุดูดซับที่เติมในถังบำบัดเป็นแมงกานีสซีโอไลท์ แต่แนวโน้มของแมงกานีสน่าจะลดลงเมื่อน้ำผ่านระบบกรองในปริมาณที่มากเพียงพอ

นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำดิบที่นำเข้าระบบบำบัดมีค่าความเข้มข้นของแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สูงมาก ทั้งนี้หากคำนวณโดยประมาณเป็นความกระด้างที่คำนวณให้อยู่ในหน่วยของ ppm $CaCO_3$ พบว่าน้ำก่อนเข้าระบบมีความกระด้างสูง ประมาณ 300-380 ppm $CaCO_3$ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกิน 300 ppm $CaCO_3$) แต่เมื่อตรวจวัดน้ำผ่านระบบกรองในแต่ละจุดแล้วเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าความกระด้างของน้ำลดลงอยู่ในระดับ 270-340 ppm $CaCO_3$ แสดงดังภาพที่ 4.40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำที่ติดตั้งนี้ สามารถบำบัดน้ำให้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานน้ำบาดาลสำหรับอุปโภคได้ โดยเฉพาะพารามิเตอร์ที่มีปัญหาคือเหล็กและความกระด้างของน้ำ

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำตัวอย่างที่เก็บ 3 ครั้ง ใน 5 จุดเก็บน้ำของระบบบำบัด

เก็บครั้งที่	ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ppm)									
		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	Ca	Mg	Na
1	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.025	1.30	0.21	153	30	12
	2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.032	0.23	0.05	145	28	12
	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.027	0.09	0.15	150	30	12
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.039	0.08	0.17	146	31	14
	5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.016	0.27	0.35	139	30	15
2	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.015	0.13	0.03	133	27	12
	2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.016	0.05	1.82	125	36	14
	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.018	0.01	0.16	117	37	13
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.013	0.04	0.41	108	32	21
	5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.011	0.13	1.40	107	34	29
3	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003	0.03	0.01	124	28	12
	2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.021	0.49	0.59	116	29	12
	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.009	0.06	0.62	117	29	12
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.024	0.02	0.84	116	38	15
	5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.016	0.21	0.82	110	38	15



ภาพที่ 4.40 แสดงการลดลงของค่าความกระด้างของน้ำ เมื่อน้ำผ่านไปยังจุดต่างๆของระบบ

4.7 การวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง

4.7.1 การวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำบาดาลก่อนการบำบัด

การตรวจสอบจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง เป็นการตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria) ซึ่งเป็นกลุ่มเชื้อแบคทีเรียที่จัดอยู่ใน Family Enterobacteriaceae ในการตรวจคุณภาพน้ำดื่ม จะทำการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย เรียกว่า การตรวจวิเคราะห์หาค่า MPN (Most Probable Number index) ซึ่งนิยมใช้การทดสอบระบบหลายหลอด (Multiple tubes fermentation technique) แบบระบบ 3 หลอด หรือ 5 หลอด โดยอาศัยหลักการความสามารถในการย่อยสารอาหารให้เกิดแก๊สในหลอดทดลอง จากจำนวนหลอดที่ให้ผลบวก (positive) ของแต่ละการเจือจาง แล้วจึงนำไปอ่านค่าในตารางดัชนี MPN (Most Probable Number index)

ค่า MPN คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria)ที่ตรวจพบได้มากที่สุดในน้ำตัวอย่าง ซึ่งกำหนดมาตรฐานน้ำบริโภคตามเกณฑ์สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.322) ได้กำหนดดังนี้

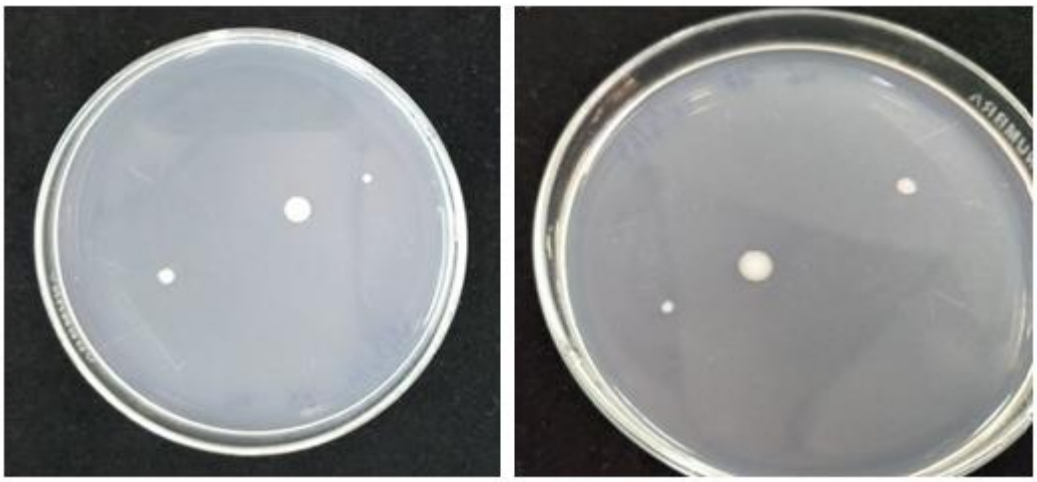
ตารางที่ 4.7 มาตรฐานน้ำบริโภคตามเกณฑ์สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.322)

รายการ	**เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด**
Standard plate count	500
MPN (Coliform/ 100 ml)	น้อยกว่า 2.2
Escherichia coli	ไม่มี

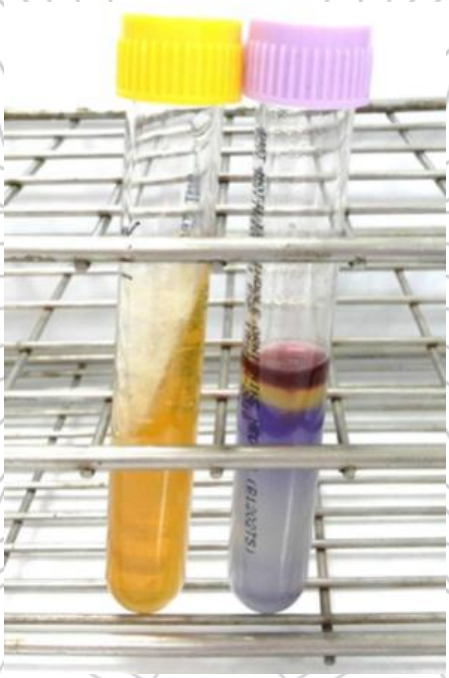
ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลตัวอย่างก่อนการบำบัด จำนวน 1 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการตรวจหาค่า MPN ระบบ 3 หลอดและการนับจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและรายงานผลเทียบตามมาตรฐานน้ำบริโภคตามเกณฑ์สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.322) ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.8 ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำด้วยวิธีการตรวจหาค่า MPN ระบบ 3 หลอดและการนับจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด

รายการ	**ผลการทดลอง**
ค่า MPN	0.0(น้อยกว่า 3)
Standard plate count	3.2×10^2CFU/ml
Escherichia coli	ไม่มี
เชื้อจุลินทรีย์ที่พบในน้ำตัวอย่าง	*Enterobacter* sp.



ภาพที่ 4.41 โคโลนีของเชื้อแบคทีเรียจากการตรวจหาจำนวนจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง บนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA



ภาพที่ 4.42 การตรวจสอบชนิดของจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง จากอาหารเลี้ยงเชื้อ TSI และ MIL medium

จากผลการวิเคราะห์หาเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำบาดาลก่อนการบำบัด พบเชื้อจุลินทรีย์จำพวก *Enterobacter* sp.จำนวน 3.2 x 10^2 CFU/ml และในจำนวนนี้ไม่พบ *Escherichia coli*ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค ดังนั้นจึงถือว่าคุณภาพของน้ำบาดาลก่อนการบำบัดยังคงอยู่ในมาตรฐานน้ำบริโภคตามเกณฑ์สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.322)

4.7.2 การวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่างในระบบบำบัดน้ำ

ในการวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่างในระบบบำบัดน้ำ มีการเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 3 ครั้ง ห่างกันเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยเก็บครั้งละ 5 จุด จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์เหมือนกับการวิเคราะห์หาเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่างก่อนการบำบัด และนำผลการวิเคราะห์มาเทียบตามเกณฑ์ของ WHO ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ค่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี MPN ต่อ ml เมื่อใช้ตัวอย่างน้ำ 10, 1, 0.1 ml ปริมาตรละ 3 หลอด (ระบบ 3 หลอด)

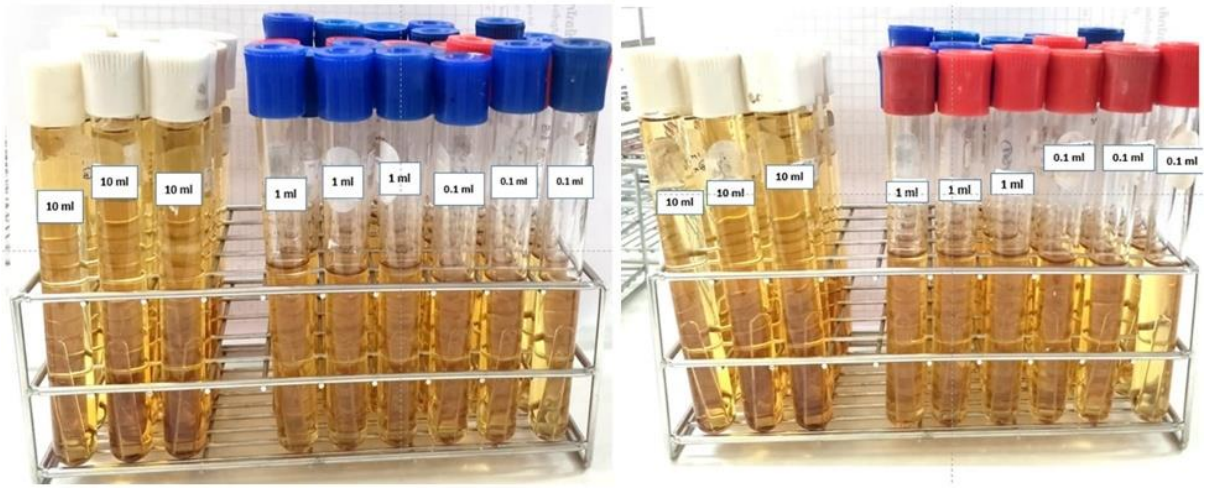
Number of tubes giving a positive reaction from			MPN
3 of 10 ml each	3 of 1 ml each	3 of 0.1 ml each	
0	0	0	<3
0	0	1	3
0	1	0	3
1	0	0	4
1	0	1	7
1	1	0	7
1	1	1	11
1	2	0	11
2	0	0	9
2	0	1	14

ที่มา: WHO. 1985. Guidelines for Drinking-water Quality. Volume 3: Drinking-water Control in SmallCommunity Supplies. World Health Organization, Geneva.

ตัวอย่างน้ำทั้ง 5 จุดที่ทำการเก็บ 3 ครั้ง ได้ถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ด้วยวิธีการตรวจหาค่า MPN ระบบ 3 หลอด และรายงานผลเทียบตามเกณฑ์ของ WHO ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4.10 ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ด้วยวิธีการตรวจหาค่า MPN ระบบ 3 หลอด จากตัวอย่างน้ำ 5 ตัวอย่าง และทำการเก็บ 3 ครั้ง

เก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่	ตัวอย่าง	ผลการทดลองค่า MPN
1	01	< 3
	02	<3
	03	<3
	04	<3
	05	<3
2	01	<3
	02	<3
	03	<3
	04	<3
	05	<3
3	01	<3
	02	<3
	03	<3
	04	<3
	05	<3



ภาพที่ 4.43 การตรวจสอบจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง เป็นการทดสอบ 3 ซ้ำ (triplicate) ในแต่ละตัวอย่างน้ำด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ Lauryl sulfate tryptose (LST) broth

ภาพที่ 4.44 ตัวอย่างการอ่านผลการวิเคราะห์ในขั้นแรกด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ Lauryl sulfate tryptose (LST) broth ของน้ำตัวอย่างกรณีให้ผลหลอดใส คือไม่พบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และไม่พบฟองก๊าซในหลอดดักก๊าซ (durham tube)

การวิเคราะห์ผลการวิจัยครั้งนี้ ใช้วิธี Multiple tubes fermentation ด้วยวิธีการตรวจหาค่า MPN ระบบ 3 หลอด โดยทำการตรวจวิเคราะห์ในขั้นแรกด้วยอาหาร Lauryl sulfate tryptose (LST) broth บ่มที่อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส 24-28 ชั่วโมง ตรวจสอบผลบวก คือหลอดที่มีการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย (ขุ่น) และมีฟองก๊าซในหลอดดักก๊าซ (durham tube) หากพบหลอดที่ให้ผลบวก ให้นำหลอดที่ให้ผลบวกขั้นแรกมาวิเคราะห์ขั้นยืนยันต่อไป

ผลการวิเคราะห์โคลิฟอร์มแบคทีเรียจากตัวอย่างน้ำ 5 ตัวอย่าง ทำการเก็บ 3 ครั้ง พบว่า ไม่มีการเจริญของเชื้อในการวิเคราะห์ในขั้นแรกด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ Lauryl sulfate tryptose (LST) broth ให้ผลหลอดใส คือไม่พบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และไม่พบฟองก๊าซในหลอดดักก๊าซ (durham tube) จึงสรุปได้ว่า ตัวอย่างน้ำ 5 ตัวอย่าง จากการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง ให้ผลค่า MPN เท่ากับ <3และไม่พบแบคทีเรียโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำตัวอย่างจึงไม่ต้องนำน้ำตัวอย่างไปตรวจหาจำนวนจุลินทรีย์ในขั้นตอนต่อไป

.