การรีไซเคิลเปลือกหอยตลับเพื่อผลิตปูนขาวสำหรับการบำบัดน้ำและน้ำเสีย

Recycling oriental hard clam shell waste to lime product for Water and Wastewater Treatment

เอนก สาวะอินทร์[1] และ ชุตินุช สุจริต[2]
[1] สาขาสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย (ตรัง)
[2] สาขาอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์ประมง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย (ตรัง)
179 ม.3 ต.ไม้ฝาด อ.สิเกา จ.ตรัง 92150 โทรศัพท์: 0810934495 E-mail: aneak.ene@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะสมบัติของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับและศักยภาพการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับงานทางด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสียเทียบกับปูนขาวจากหินปูน สำหรับเป็นแนวทางการนำเปลือกหอยตลับจากอุตสาหกรรมการประมงและการแปรรูปกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงปูนขาวจากเปลือกหอยตลับมีคุณลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับปูนขาวจากหินปูน (Limestone) องค์ประกอบของปูนขาวเตรียมจากเปลือกหอยตลับมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 60.1 และสารประกอบอื่นๆ ปริมาณน้อย ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสามารถใช้เป็นสารปรับค่าพีเอชและสารสำหรับควบคุมค่าพีเอชของน้ำในการควบคุมกลไกการบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสามารถใช้ทดแทนปูนขาวจากหินปูนได้ จึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยตลับ งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการจัดการของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง อุตสาหกรรมการประมง นำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับใช้ในงานทางด้านการบำบัดน้ำและน้ำเสีย

คำสำคัญ: ปูนขาว, เปลือกหอยตลับ, การบำบัด, โคแอกกูเลชัน

Abstract

This research is to study characteristic of lime production from oriental hard clam shell (*Meretrix. Meretrix.sp*) and the potential of lime from oriental hard clam shell for water and wastewater treatment compare with lime from limestone for alternative to recycle the oriental hard clam shell from coastal aquaculture and fishery industry to lime for use in other work. The composition of lime prepared by pyrolysis from oriental hard clam shell mainly contained 60.1 % calcium oxide (CaO) and a minor content of other compound. It can use to pH adjustment and pH control for coagulation process in water and wastewater treatment. The result show the oriental hard clam shell is renewable material to lime production substitute for limestone. This research show the alternative of waste management in coastal aquaculture and fishery industry to recycling the renewable materials for water and wastewater treatment.

Keywords: Lime, Oriental hard clam shell, Treatment, Coagulation

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมประมงมีความก้าวหน้าทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและกระบวนการจัดส่งสินค่าอันมีความหลากหลายของประเภทสินค้า อุตสาหกรรมประมงหนึ่งที่มีความก้าวหน้าของรูปแบบการดำเนินการมากขึ้น คือ อุตสาหกรรมการจับและเพาะเลี้ยงหอยรวมทั้งอุตสาหกรรมการแปรรูป ซึ่งหอยเป็นอาหารทะเลที่ได้ความนิยมเป็นอย่างมากจากผู้บริโภค การจับและการเพาะเลี้ยงหอยส่งต่อให้กับร้านอาหารและอุตสาหกรรมการแปรรูปก่อให้เกิดการขยายตัวของกลไกทางการตลาด ทั้งในรูปแบบของการแปรรูปหอยปรุงเป็นอาหารตามร้านอาหารทั่วไป และอุตสาหกรรมการแปรรูปหอยในรูปแบบของการปรุงและบรรจุกระป๋อง อย่างไรก็ตามจากการดำเนินกิจการของอุตสาหกรรมดังกล่าวก่อให้เกิดของเสียประเภทหนึ่ง คือ เปลือกหอย ซึ่งเป็นของเสียที่มีองค์ประกอบของสารที่ก่อเกิดจากการเจริญเติบโตจากกระบวนการทางธรรมชาติ ของเสียดังกล่าวจึงอาจสามารถนำมารีไซเคิลเป็นวัสดุใหม่ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จากองค์ประกอบของเปลือกหอยหลายชนิดที่ประกอบด้วยธาตุแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงจะกลายเป็นสารประกอบ แคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และอื่นๆ อย่างเช่นการเผาเปลือกหอยแมลงภู่เพื่อการผลิตปูนขาวในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยจะมีผลต่อองค์ประกอบของผลผลิต โดยหากทำการควบคุมเผาอุณหภูมิที่ 500 – 600 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้จะเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ถ้าหากควบคุมอุณหภูมิการเผาที่ 700 – 900 องศาเซลเซียส แคลเซียมคาร์บอเนตจะแตกสลายกลายเป็น แคลเซียมออกไซด์ [1] หรือ ปูนขาว (Lime) ซึ่งการศึกษาการผลิตปูนขาวจากเปลือกหอยเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตปูนขาวจากเปลือกหอยแครง (Cockle shell) [2]

การศึกษาการรีไซเคิลเปลือกหอยนางรม (Oyster shells) เพื่อใช้สำหรับงานทางด้านการบำบัดน้ำเสียในการควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) [3] การศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตปูนขาวจากเปลือกหอยทะเล

อุตสาหกรรมประมงการจับและเพาะเลี้ยงหอยชนิดหนึ่งที่หน้าสนใจ คือ หอยตลับ หรือหอยหวาน เนื่องจากเป็นหอยที่มีความนิยมในการนำมาบริโภคเป็นอาหาร จึงก่อให้เกิดเปลือกหอยตลับเป็นจำนวนมากจากร้านอาหารและอุตสาหกรรมแปรรูปหอยตลับ ซึ่งจากคุณลักษณะสมบัติของเปลือกหอยชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาผลิตเป็นปูนขาวได้ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจการศึกษาการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับงานทางด้านการบำบัดน้ำและน้ำเสีย เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำปูนขาวที่ผลิตได้จากเปลือกหอยตลับไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียหลายแหล่งที่มีการใช้ปูนขาวเป็นสารเคมีสำหรับการบำบัดน้ำ และมีการปล่อยน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดแล้วสู่แหล่งสิ่งแวดล้อมหรือแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป เช่น คู คลอง แม่น้ำ สาธารณะที่มีการไหลของน้ำในแหล่งน้ำดังกล่าวลงสู่ทะเลในที่สุด เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่มีการใช้ปูนขาวเพื่อปรับสภาพบ่อก่อนทำการเพาะเลี้ยง และมีการปล่อยน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงหลังจากจับสัตว์น้ำแล้วเสร็จลงสู่ทะเลเช่นเดียวกัน ดังนั้นการผลิตและใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยในการบำบัดน้ำและน้ำเสียหรือในงานทางด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง จึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งที่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนแร่ธาตุในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งแร่ธาตุแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบของน้ำทะเล ก่อให้เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรแร่ธาตุในระบบนิเวศของแหล่งน้ำธรรมชาติ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเทียบกับปูนขาวจากหินปูน

2.2 เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับงานทางด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย

2.3 เพื่อศึกษาแนวทางการนำเปลือกหอยตลับจากอุตสาหกรรมการประมงและการแปรรูปกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

3. ทฤษฎี กรอบแนวคิดการวิจัยและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบการจัดการของเสียในลักษณะที่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรในธรรมชาติ เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมและการอุปโภคบริโภค การทำฟาร์มเลี้ยงหอย การจับหอยจากธรรมชาติเป็นอุตสาหกรรมทางการประมงที่มีการเจริญเติมโตทางการตลาดอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสัตว์น้ำที่นิยมนำมาบริโภค ของเสียที่เหลือจากอุตสาหกรรมการแปรรูปและการบริโภคหอยประเภทหนึ่ง คือ เปลือกหอยซึ่งในธรรมชาติจะมีการย่อยสลายได้เองในบริเวณใกล้เคียงที่อยู่อาศัย แต่การจับหรือเพาะเลี้ยงหอยแล้วนำมาแปรรูปหรือบริโภคในปริมาณมากอาจก่อให้เกิดความไม่สมดุลของแร่ธาตุในแหล่งน้ำธรรมชาติ

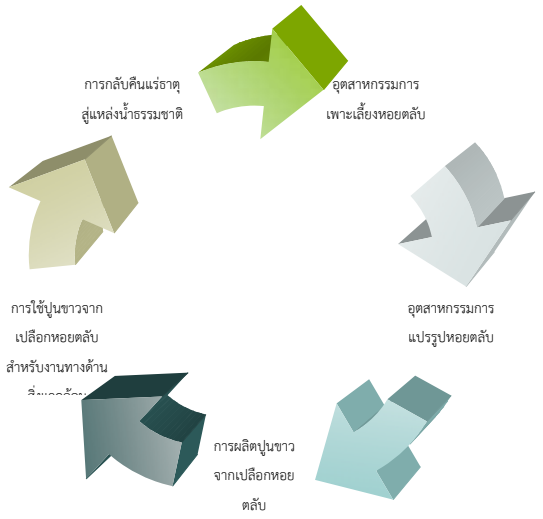
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเปลือกหอยทะเลและหินปูน [4]

Sample	CaO
MV Shell	52.41
Mussel shell	50.45
Scallop shell	54.53
MM limestone	48.83
JN limestone	50.28

MV: *Mactra Veneriformis*, MM: Moaming, JN: Jining

จากการศึกษางานวิจัยที่มีผลการศึกษาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเปลือกหอยทะเลบางชนิดเปรียบเทียบกับตัวอย่างหินปูนที่นำมาจากพื้นที่ในประเทศจีน [4] แสดงดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของเปลือกหอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงและมีปริมาณใกล้เคียงกับหินปูนที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปูนขาว ดังนั้นเปลือกหอยจึงอาจสามารถนำมาผลิตเป็นปูนขาวเพื่อใช้ประโยชน์ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อมทางด้านต่างๆ ได้เช่นเดียวกับหินปูนที่ได้มาจากการระเบิดภูเขาหินปูนในธรรมชาติ ซึ่งมีส่วนในการทำลายทรัพยากรป่าไม้ในบริเวณนั้น เป็นการทำลายระบบนิเวศ และสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านอื่นๆ ตามมา

งานวิจัยนี้จึงเป็นการหาแนวทางหรือกลไกที่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรธรรมชาติ สำหรับอุตสาหกรรมการประมงการจับหรือเพาะเลี้ยงหอยตลับมาปริโภคหรือแปรรูป โดยมีกรอบแนวคิดสำหรับงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 1 และอาจเป็นแนวทางในการนำของเสียประเภทอื่นๆ ในอุตสาหกรรมประมงกลับมาใช้ประโยชน์และก่อให้เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรแร่ธาตุในธรรมชาติ



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดสำหรับงานวิจัย

4. วิธีดำเนินงาน

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนของการเตรียมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของปูนขาว และการทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดำเนินงานดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ

ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับถูกผลิตขึ้นจากเปลือกหอยที่ได้มาจากอุสาหรรมการประมงในเขตพื้นที่จังหวัดตรัง ประเทศไทย ทำการล้างทำความสะอาดเปลือกหอยก่อนทำการเผาด้วยเตาเผาควบคุมการเผาเปลือกหอยเพื่อผลิตเป็นปูนขาวด้วยการเผาภายใต้สภาวะออกซิเจนต่ำ (pyrolysis) อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเผาไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง [1, 2, 3]

4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและองค์ประกอบของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของปูนขาวโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง ทดสอบด้วยตะแกรงร่อนขนาด 75, 150, 250, 300, 710 และ 1,000 µm เพื่อวิเคราะห์ Passing percentage (Sieve Analysis) [5, 6] และวิเคราะห์องค์ประกอบของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับโดยเทคนิคการทดสอบ X – ray fluorescence spectrometry โดยใช้เครื่อง X – ray fluorescence spectrometer, PW2400, PHILIPS, Netherlands

4.3 การทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย

ทดสอบศักยภาพของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับการบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) โดยการทดสอบจาร์เทส (jar test) [7, 8] ทำการทดสอบเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับปรับค่าพีเอช (pH Adjustment) การทดสอบใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเป็นสารควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มเพื่อบำบัดค่าความขุ่นของน้ำ และการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่ออกจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มแบบเปียกและผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ และระบบบ่อธรรมชาติแล้วซึ่งเป็นน้ำเสียบ่อสุดท้ายที่ยังมีสิ่งปนเปื้อนและมีสีน้ำตาลเข้ม วิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของน้ำและน้ำเสียก่อนและหลังการทดลองตามวิธีวิเคราะห์ที่ปรากฏใน Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater [9] คำนวณผลการทดลองและแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ จากผลการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

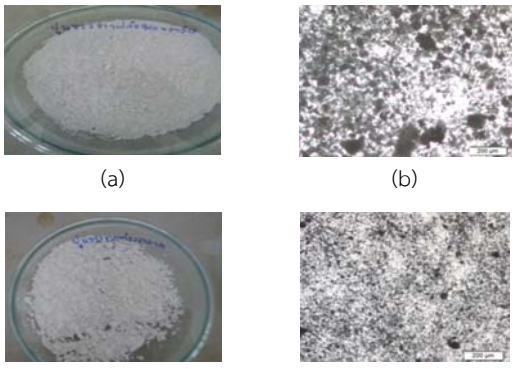
5. ผลการศึกษา/การทดลอง

จากการเผาเปลือกหอยตลับที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นกระบวนการเผาเปลือกหอยตลับให้เป็นผงปูนขาว (calcination) [3] และนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติ และทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

5.1 คุณลักษณะสมบัติ ขนาดอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ

ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายกับปูนขาวจากท้องตลาดที่ผลิตจากหินปูน แสดงดังภาพที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ พบว่าขนาดอนุภาคของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 150 µm แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับปูนขาวจากท้องตลาดที่ผลิตจากหินปูน

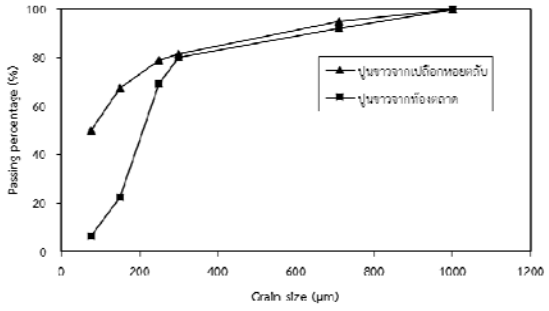
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับที่ผ่านการเผาให้เป็นผง แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าสารประกอบที่มีปริมาณมากที่สุด คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 60.1 และมีสารประกอบอื่นๆ ปริมาณน้อย ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวจากเปลือกหอยแมลงภู่ หอยเชลล์ และหอยแครง และปูนขาวที่ผลิตจากหินปูน ที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่องค์ประกอบแร่ธาตุของเปลือกหอยส่วนใหญ่เป็นแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้เมื่อทำการเผาเปลือกหอยที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นผง เปลือกหอยตลับจะกลายสภาพเป็นปูนขาวที่มีปริมาณร้อยละขององค์ประกอบแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าองค์ประกอบอื่นๆ [1, 2, 3, 4] ทั้งนี้องค์ประกอบของปูนขาวดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับปูนขาวที่ผลิตจากหินปูน



(a) (b)

(c) (d)

ภาพที่ 2 ภาพถ่ายปูนขาวด้วยกล้องดิจิตอล: (a) ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ, (c) ปูนขาวจากท้องตลาด และภาพถ่ายแสดงขนาดอนุภาคปูนขาวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: (b) ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ, (d) ปูนขาวจากท้องตลาด



ภาพที่ 3 ขนาดของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับและปูนขาวจากท้องตลาด

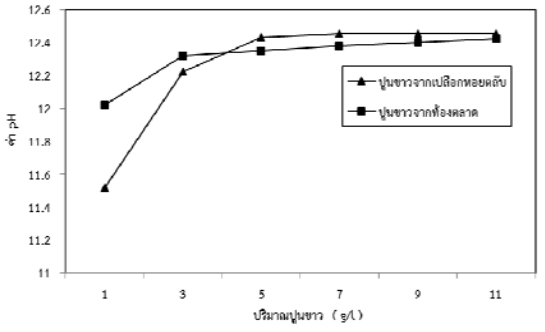
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงเปลือกหอยตลับมีศักยภาพสำหรับการผลิตปูนขาว ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ ได้ ซึ่งเป็นการใช้วัสดุทดแทนวัตถุดิบที่ใช้สำหรับการผลิตปูนขาวในปัจจุบันซึ่งก็คือการใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบ และอาจเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการใช้เปลือกหอยตลับเป็นวัสดุทดแทนหินปูนในภาคอุตสาหกรรมต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวมีประโยชน์สำหรับนำไปใช้งานได้หลายด้าน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการใช้งานปูนขาวจากเปลือกหอยตลับในด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย เพื่อเป็นการตรวจสอบความสามารถในการนำปูนขาวจากเปลือกหอยตลับไปใช้งานจริง

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ

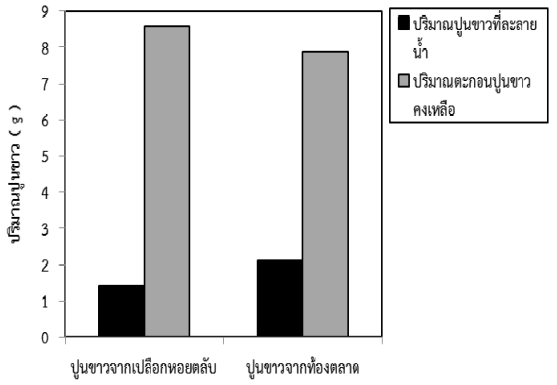
Na_2O (%)	SiO_2 (%)	SO_3 (%)	CaO (%)	SrO (%)
1.61	0.06	0.13	60.1	0.24

5.2 ผลการทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

สำหรับการใช้ประโยชน์ปูนขาวสำหรับงานทางด้านสิ่งแวดล้อมมีความหลากหลายอย่างมากสำหรับการใช้งาน เช่น การใช้ปูนขาวสำหรับควบคุมค่าพีเอชของน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา การควบคุมค่าพีเอชในการบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Treatment) กระบวนการทางเคมี ทั้งนี้ค่าพีเอชของน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสีย เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการนำปูนขาวจากเปลือกหอยตลับไปใช้ประโยชน์ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากการทดสอบใช้ปูนขาวจากหอยตลับปรับค่าพีเอชของน้ำ พบว่าปูนขาวจากเปลือกหอยตลับมีศักยภาพการปรับค่าพีเอชของน้ำได้คล้ายกับปูนขาวจากท้องตลาดที่ผลิตจากหินปูน แสดงดังภาพที่ 4 อีกทั้งความสามารถละลายน้ำได้ ของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับก็มีค่าใกล้เคียงกับปูนขาวจากท้องตลาดด้วยเช่นเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 5 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำปูนขาวจากเปลือกหอยตลับไปใช้งานทางด้านปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ต้องการปรับค่าพีเอชของน้ำเพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมกับการเกิดกลไกการบำบัดของสารช่วยรวมตะกอน (Coagulant)

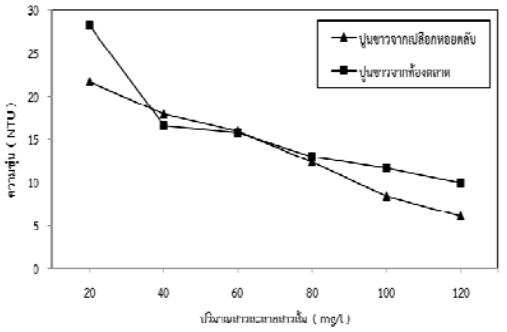


ภาพที่ 4 ศักยภาพการปรับค่าพีเอชของน้ำด้วยปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาด



ภาพที่ 5 ความสามารถละลายน้ำได้ ของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาด (ปริมาณปูนขาว 10 g)

จากผลการทดลองศักยภาพการปรับค่าพีเอชของน้ำทำให้ทราบว่าปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสามารถใช้ปรับค่าพีเอชของน้ำได้ งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบการปรับค่าพีเอชของน้ำสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยสารส้ม (Alum) ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตน้ำประปา โดยมุ่งเน้นการกำจัดค่าความขุ่น (Turbidity) เป็นหลัก ทั้งนี้การปรับค่าพีเอชของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม เนื่องจากสารส้มจะกำจัดตะกอนหรือสารแขวนลอยในน้ำด้วยการเกิดกลไก Sweep Coagulation ได้ดีที่พีเอชเป็นกลาง [10, 11] แสดงดังภาพที่ 6 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและควบคุมค่าพีเอชด้วยปูนขาวจากเปลือกหอยตลับมีค่าความขุ่นลดน้อยลงมากกว่าร้อยละ 99.0 เช่นเดียวกับการควบคุมค่าพีเอชด้วยปูนขาวจากท้องตลาด ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับแทนปูนขาวจากหินปูนสำหรับกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับควบคุมค่าพีเอชของน้ำได้ ซึ่งอาจเป็นแนวทางเลือกหนึ่งสำหรับโรงผลิตน้ำประปา หรือโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำหรือน้ำเสีย



ภาพที่ 6 การทดสอบการปรับค่าพีเอชของน้ำ ของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาดเพื่อกำจัดค่าความขุ่นของน้ำ สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ด้วยสารส้ม (ตัวอย่างน้ำดิบมีค่าความขุ่น 1100 NTU)

5.3 ผลการทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

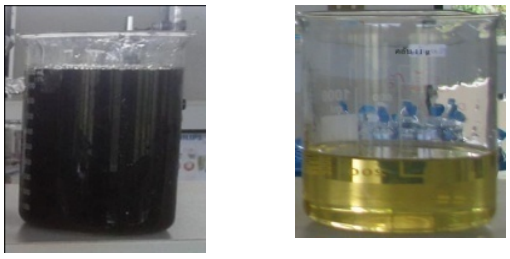
จากผลการทดสอบสามารถใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเป็นสารสำหรับปรับค่าพีเอชของน้ำได้ งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเป็นสารที่ใช้สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานดังกล่าวมีสีน้ำตาลเข้มมาก ซึ่งเป็นลักษณะที่พึงรังเกียจของน้ำเสียที่ก่อเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทนี้ คุณลักษณะสมบัติบางอย่างของน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม

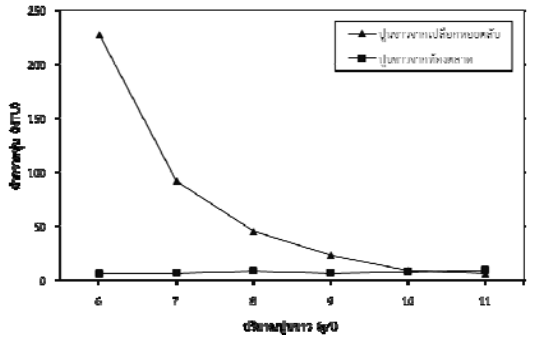
พารามิเตอร์	หน่วยวัด	ค่าที่วัดได้
พีเอช (pH)		8.57
สี (Color)	Unit	302
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	113
ของแข็งละลาย (Dissolved solids)	mg/L	3,570

*หมายเหตุ ตัวอย่างน้ำทิ้งเป็นตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานแห่งหนึ่งใน จังหวัดตรัง ประเทศไทย

จากการทดสอบใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม พบว่าหลังจากเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ก่อให้เกิดการกำจัดสารตะกอน สารแขวนลอย และสีของน้ำทิ้ง ส่งผลให้น้ำทิ้งมีลักษณะที่ใสขึ้นกว่าเดิม แต่น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังคงมีเหลืองอ่อน แสดงดังภาพที่ 7 ผลจากการวิเคราะห์ค่าความขุ่นของน้ำแสดงดังภาพที่ 8 พบว่าปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสามารถกำจัดค่าความขุ่นของน้ำได้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่นสูงสุดจากการเติมปูนขาวจากปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ และปูนขาวจากท้องตลาดเท่ากับร้อยละ 94.52 และ 94.44 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ พบว่าจะต้องใช้ปริมาณความเข้มข้นถึง 10 กรัม/ลิตร จึงจะมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันกับปูนขาวจากท้องตลาด

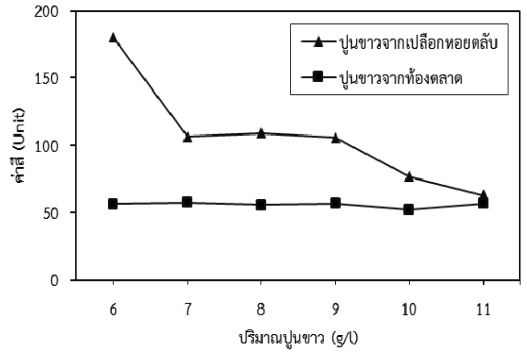


ภาพที่ 7 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอลของตัวอย่างน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม; (a) ก่อนการบำบัด (b) หลังการบำบัด



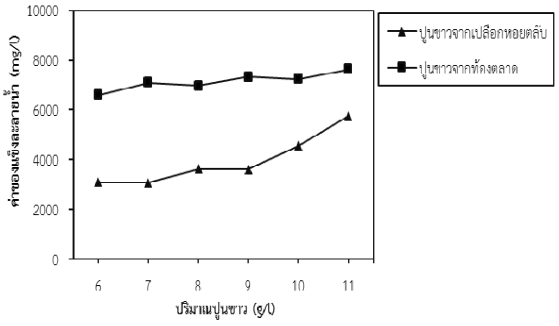
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาด (ตัวอย่างน้ำดิบมีค่าค่าความขุ่น 113 NTU)

ผลจากการลดลงของค่าความขุ่นของน้ำที่เกิดจากกลไกการกำจัดตะกอน สารแขวนลอย และสารอื่นๆ ในน้ำส่งผลให้สีของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีความเข้มสีของน้ำเสียมีค่าลดลง แสดงดังภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของตัวอย่างน้ำดิบที่มีค่าเท่ากับ 302 Unit เมื่อมีการเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับและปูนและปูนขาวจากท้องตลาด ทำให้น้ำตัวอย่างมีค่าสีลดน้อยลง ประสิทธิภาพการบำบัดค่าสีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 79.1 และ 82.8 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ พบว่าจะต้องใช้ปริมาณความเข้มข้นถึง 11 กรัม/ลิตร จึงจะมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันกับปูนขาวจากท้องตลาด เป็นการแสดงถึงปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสามารถกำจัดความสกปรกของน้ำเสียในรูปของตะกอน สารแขวนลอย และสีของน้ำได้ อย่างไรก็ตาม การบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานปาล์มน้ำมันด้วยปูนขาวจากเปลือกหอยสามารถบำบัดได้เพียงสีปรากฏ ซึ่งลักษณะน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดยังคงมีสีเหลืองอ่อน เนื่องจากสีแท้ซึ่งเป็นสีของน้ำทิ้งที่มีลักษณะจำเพาะของน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มที่กำจัดได้ยาก



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่าสี (Color) ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาด (ตัวอย่างน้ำดิบที่มีค่า 302 Unit)

ทั้งนี้ถึงแม้ว่าการบำบัดน้ำทิ้งจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับแต่การบำบัดน้ำทิ้งยังต้องพิจารณาถึงค่าอื่นๆ เพิ่มเติม เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำทิ้ง ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาถึงค่าของแข็งละลายน้ำและค่าพีเอชของน้ำและหลังผ่านการบำบัดด้วยปูนขาว เนื่องจากพารามิเตอร์ทั้งสองมักมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการบำบัดด้วยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อเป็นการตรวจสอบศักยภาพในการใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับในการบำบัดน้ำเสียโดยตรง

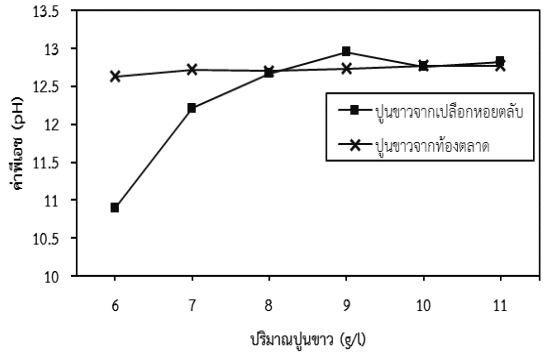


ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาด

ผลจากการเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ ส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 10 ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายน้ำ จากตัวอย่างน้ำดิบที่มีค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 3,870 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อมีการเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับ และปูนขาวจากท้องตลาด มีค่าของแข็งละลายน้ำหลังเติมปูนที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 6 กรัม/ลิตร เท่ากับ 3,080 และ 6,600 ตามลำดับ และในระดับความเข้มข้นสุดท้ายที่ 11 กรัม/ลิตร

คือ 5,750 และ 7,640 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งอาจส่งผลทำให้คุณภาพน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จากการวิเคราะห์ค่าพีเอชของน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัด พบว่าการเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับยังส่งผลต่อค่าพีเอชของน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมมากแสดงดังภาพที่ 11 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำดิบที่มีค่าเท่ากับ 8.57 เปลี่ยนเป็นค่าความพีเอชของน้ำทิ้งหลังการบำบัด เมื่อมีการเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับมีค่าพีเอชเพิ่มเช่นเดียวกับการใช้ปูนขาวจากท้องตลาดที่ผลิตจากหินปูน ซึ่งผลการทดลองเติมปูนขาวจากเปลือกหอยตลับที่ระดับความเข้มข้น 6 – 11 กรัม/ลิตร มีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 10 ซึ่งเป็นระดับค่าพีเอชที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยใช้ปูนขาวจากเปลือกหอยหอยตลับเปรียบเทียบกับปูนขาวจากท้องตลาด (ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.57)

จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของปูนขาวจากเปลือกหอยในการลดความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์ม จากการศึกษารายงานการวิจัยพบว่ามีการศึกษาใช้ปูนขาวสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด เช่น การบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าฝ้ายกำจัดค่าสีของน้ำได้ร้อยละ 70 – 90 [8] การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังสามารถกำจัดค่าความขุ่นและค่าสีของน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 90 [12] ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นและค่าสีของน้ำเสียมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองทั้งหมดดังกล่าวข้างต้น แสดงให้ทราบว่าปูนขาวจากเปลือกหอยหอยตลับมีคุณลักษณะสมบัติคล้ายคลึงกับปูนขาวจากหินปูน อีกทั้งมีศักยภาพในการใช้งานทางด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เป็นสารปรับค่าพีเอชของน้ำสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารช่วยรวมตะกอนอื่นๆ เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟต โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากสารเหล่านี้เมื่อนำมาใช้งานจะต้องมีการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงจะเกิดกลไกการกำจัดตะกอนหรือสารแขวนลอยในน้ำได้ดี [10, 11, 13, 14]

งานวิจัยนี้จึงแสดงให้ทราบว่าปูนขาวจากเปลือกหอยตลับสามารถใช้ทดแทนปูนขาวจากหินปูนได้แต่อาจจะต้องใช้ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันกับปูนขาวจากท้องตลาด ซึ่งอาจเป็นผลจากองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเปลือกหอยที่มีการเจริญเติบโตในแต่ละสถานที่และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตปูนขาวจากเปลือกหอย ผลจากความแตกต่างดังกล่าวอาจมีผลทำให้คุณภาพของปูนขาวที่ผลิตได้จากเปลือกหอยมีความแตกต่างกันถึงแม้ว่าวัตถุดิบจะเป็นเปลือกหอยชนิดเดียวกัน และจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานในที่สุด ทั้งนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและคุณภาพของปูนขาวที่ผลิตได้เป็นสิ่งที่จะต้องมีการควบคุมหากมีการพัฒนาไปสู่ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป งานวิจัยนี้จึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการคัดเลือกวัตถุดิบสำหรับผลิตปูนขาว เป็นการนำเปลือกหอยตลับซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการอุตสาหกรรมประมงและการแปรรูปอาหารทะเลกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งนอกจากการใช้ปูนขาวในงานทางด้านการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว ยังสามารถใช้ปูนขาวในด้านอื่นๆ ได้อีกด้วย เช่น การปรับเสถียรสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยการเติมปูนขาวหลังจากกระบวนการรีดน้ำออกจากสลัดจ์ [15]

อย่างไรก็ตามในการใช้ประโยชน์จริงในระดับอุตสาหกรรมยังต้องมีการรวบรวมเปลือกหอยให้ได้ปริมาณมากเพียงพอต่อการผลิต ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตปูนขาวในระดับอุตสากรรม และในระดับการค้า ซึ่งโรงงานผลิตปูนขาวอาจจำเป็นต้องมีการวางแผนการจัดเก็บ การรวบรวม เปลือกหอยจากร้านอาหาร หรืออุตสาหกรรมการแปรรูปหอยตลับให้ได้เพียงพอต่อความต้องการสำหรับการผลิตปูนขาวในแต่ละครั้ง

6. สรุปและการอภิปรายผล

ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าปูนขาวที่ผลิตจากเปลือกหอยตลับสามารถใช้ในกระบวนการปรับปรุงสภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียได้ โดยเฉพาะการใช้เป็นสารสำหรับปรับค่าพีเอชของน้ำ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยตลับสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้โดยใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปูนขาวทดแทนหินปูน แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจะต้องใช้ปริมาณปูนขาวจากเปลือกหอยตลับปริมาณความเข้มข้นที่มากกว่าปูนขาวจากท้องตลาด งานวิจัยนี้อาจเป็นแนวทางในการนำเปลือกหอยที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมประมงและการแปรรูปอาหารทะเลกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปูนขาว ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพน้ำและน้ำเสีย ตลอดจนงานทางด้านอื่นๆ ที่มีความต้องการปรับค่าพีเอชของน้ำ เช่น ฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชายฝั่ง เนื่องจากจะต้องใช้ปูนขาวเพื่อการปรับสภาพบ่อก่อนทำการเริ่มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในแต่ละครั้ง ซึ่งในการใช้งานดังกล่าวเป็นการก่อให้เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรแร่ธาตุในสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศชายฝั่งทะเลอีกทางหนึ่งด้วย

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 เนื่องจากการใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียวในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน จะมีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้นการใช้ปูนขาวจึงควรใช้ร่วมกับสารช่วยรวมตะกอน (Coagulant) อย่างอื่น ร่วมด้วย เช่น สารส้ม เฟอร์ริกคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟต โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

7.2 เนื่องจากอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง อุตสาหกรรมการประมงและการแปรรูป ยังประสบปัญหาการจัดการของเสียบางประเภท เช่น ในด้านการรวบรวมของเสียเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นอาจต้องมีการทำวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของการจัดการของเสียในด้านอื่นๆ เพิ่มเติม

7.3 การนำงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์จริงในระดับอุตสาหกรรม อาจต้องมีการศึกษาวิธีการรวบรวมเปลือกหอยตลับจากร้านอาหาร อุตสาหกรรมแปรรูป หรืออุตสาหกรรมประมงทางด้านอื่นๆ เพื่อให้ได้เปลือกหอยตลับปริมาณมากเพียงพอต่อกระบวนการผลิตปูนขาวในแต่ละครั้ง ซึ่งมีผลต่อต้นทุนการผลิตปูนขาวจากเปลือกหอยตลับในระดับอุตสากรรม และในระดับการค้า

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 โครงการวิจัยการผลิตปูนขาวจากเปลือกหอยตลับและการประยุกต์ใช้เปลือกหอยตลับด้านสิ่งแวดล้อมและด้านอาหาร

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Barros, M.C., Bello P.M., Bao M. and Torrado J.J. 2009. From waste to commodity: transforming shells into high purity calcium carbonate. Journal of Cleaner production. 17: 400 – 407

[2] Mohamed, M., Rashidi N.A., Yusup S., Teong L.K., Rashid U. and Ali R.M. 2012. Effect of experimental variables on conversion of cockle shell to calcium oxide using thermal gravimetric analysis. Journal of Cleaner Production. 37: 394 – 397

[3] Kwon, H.B., Lee C.W., Jun B.S., Yon J.D., Weon S.Y. and Koopman B. 2004. Recycling waste oyster shell for eutrophication control. Resources, Conservation and Recycling. 41: 75 – 82

[4] Li, Y., Zhao, C., Chen H., Duan L. and Chen X. 2009. CO2 capture behavior of shell during calcination/carbonation cycles. Chem. Eng. Technol. 32: 1176 – 1182

[5] Yoon, G.L., Kim B.T., Kim B.O. and Han S.H. 2003. Chemical mechanical characteristics of crushed oyster shell. Waste Management. 23: 825 – 834

[6] Islam, K.N., Bakar M.Z.B.A., Noordin M.M., Hussein M.Z.B., Rahman N.S.B.A. and Ali M.E. 2011. Characterisation of calcium carbonate and its polymorphs from cockle shell. (*Anadara granosa*). Powder Technology. 213: 188 – 191

[7] Rattanapan, C., Sawain A., Suksaroj T. and Suksaroj S. 2011. Enhanced efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater treatment by acidification and coagulation processes. Desalination. 280: 370 – 377

[8] Georgiou, D., Aivazidis A., Hatiras J. and Gimouhopoulos K. 2003. Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate. Technical note. Water Research. 37: 2248 - 2250

[9] APHA, AWWA and WEF. 2012. Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. 22nd edition. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF). USA

[10] Reynolds T.D. and Richards P.A. 1996 Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, PWS Publishing Company.

[11] Metcalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed., New York: Mc Graw Hill.

[12] Ayoub, G.M., Hamzeh A. and Semerjian L. 2011. Post treatment of tannery wastewater using lime/bittern coagulation and activated carbon adsorption. Desalination. 273: 359 – 365

[13] Sawain, A., Taweepreda W., Puetpaiboon U., and Suksaroj C. 2009. The effect of pH on the stability of Grease and Oil in wastewater from biodiesel production process. The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering. International conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind: MOE.5614(3)-35, School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand; 1 – 3 April 2009.

[14] Rattanapan, C., Sawain A., Suksaroj T., and Suksaroj C. 2011. Enhanced efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater treatment by acidification and coagulation processes. Desallination. 280: 370 – 377

[15] Valderrama, C., Granados R. and Cortina J.L. 2013. Stabilisation of dewatered domestic sewage sludge by lime addition as raw material for the cement industry: Understanding process and reactor performance. Chemical Engineering Journal. 232: 458 – 467