การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่าง ๆ

นาย พิพัฒน์ พรอำนวย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM DIFFERENT TYPES OF WASTEWATER

Mr. Pipat Pornamnuay

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

510641

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่าง ๆ
โดย	นายพิพัฒน์ พรอำนวย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

พิพัฒน์ พรอำนวย : การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่าง ๆ
(BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM DIFFERENT TYPES OF WASTEWATER)
อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ , 130 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไฮโดรเจนชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยทำการวิจัยเป็นการทดลองแบบทีละเทภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยใช้น้ำเสียจริง 3 ประเภทได้แก่ น้ำเสียไบโอดีเซล น้ำเสียแป้งมัน และน้ำเสียปลากระป๋อง ปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของระบบเป็น 3 ค่าคือ 5 6 และ 6.5 นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยของหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส และ เปรียบเทียบกับหัวเชื้อที่ควบคุมพีเอชอย่างเดียว

สำหรับการทดลองน้ำเสียไบโอดีเซลโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอช 3 ค่า สรุปได้ว่าที่พีเอช 6 นั้นเหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 235 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดร้อยละ 91 ส่วนการทดลองน้ำเสียแป้งมัน สรุปได้ว่าที่พีเอช 6 นั้นเหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 231 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดร้อยละ 46 ในขณะที่น้ำเสียปลากระป๋องพบว่าที่พีเอช 6.5 นั้นเหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 121 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดร้อยละ 96.5

จากผลการทดลองของหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านความร้อน พบว่าชุดทดลองน้ำเสียไบโอดีเซลได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงร้อยละ 58 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดซึ่งสูงกว่าการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียว ส่วนอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากการใช้หัวเชื้อต้มมีค่า 84 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด สำหรับผลการทดลองของหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านความร้อน ชุดทดลองน้ำเสียแป้งมันได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงร้อยละ 70 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดซึ่งสูงกว่าการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียว ส่วนอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากการใช้หัวเชื้อต้มมีค่า 13 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ส่วนชุดทดลองน้ำเสียปลากระป๋องของหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านความร้อน พบว่าได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูง ร้อยละ 74.8 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดซึ่งใกล้เคียงกับการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียว ส่วนอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากการใช้หัวเชื้อต้มมีค่า 113 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนของน้ำเสียทั้ง 3 ชนิด พบว่าน้ำเสียไบโอดีเซล มีค่าสูงสุด สำหรับแบบที่ไม่ผ่านการต้ม เท่ากับ 235 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่หัวเชื้อจุลชีพผ่านการต้ม พบว่าชุดน้ำเสียปลากระป๋องมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุดเท่ากับ 113 มล./กรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2551	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4870604421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORDS : BIOHYDROGEN / WASTEWATER / FERMENTATION / ANAEROBIC SYSTEM
PIPAT PORNAMNUAY : BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM DIFFERENT TYPES OF WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 130 pp.

This research aim to study the biohydrogen production from the different types of wastewater in order to improve capability of industrial wastewater for recovery energy from waste. A lab-bench scale anaerobic continuous stirred-tank reactors were used to study the effect of initial pH and initial seed preparation. Three difference types of wastewater namely: Biodiesel, Tapioca Strach and Canned Fish were used as substrates. Two anaerobic sludge used were treated with heat and acid to select for biohydrogen – producing community. Wastewater pH was varied at 5, 6 and 6.5 and maintained constantly during experiment.

Result from using acid treated anaerobic sludge as inoculum showed high hydrogen production yield for biodiesel wastewater, 235 ml H_2 /g COD removed were found at pH 6 and 91 % COD removed efficiency. Tapioca Strach wastewater yielded 231 ml H_2 / g COD removed at pH 6 and 46 % COD removed efficiency while Canned Fish wastewater yielded 121 ml H_2 / g COD removed were attained at pH 6.5 and 96.5 % COD removed efficiency.

For heat–treated anaerobic sludge as inoculum, biodiesel wastewater showed highest H_2 production rate (58 % hydrogen yield). Compared to acid treated sludge as inoculum, heat–treated anaerobic sludge showed higher H_2 composition in total biogas production. This showed high hydrogen production yield for biodiesel wastewater, 84 ml H_2 /g COD removed. For heat–treated anaerobic sludge as inoculum, tapioca strach wastewater showed highest H_2 production rate (70 % hydrogen yield) and yielded 13 ml H_2 / g COD removed. And heat–treated anaerobic sludge as inoculum, canned fish wastewater showed highest H_2 production rate (74.8 % hydrogen yield) and yielded 113 ml H_2 / g COD removed.

For the optimum types of wastewater; acid treated anaerobic sludge as inoculum showed highest hydrogen production yield for biodiesel wastewater, 235 ml H_2 /g COD removed and heat–treated anaerobic sludge as inoculum showed highest hydrogen production yield for canned fish 113 ml H_2 / g COD removed.

Department	Environmental Engineering	Student's signature..... Pipat Pornamnuay
Field of study	Environmental Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2008	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้การดูแลเอาใจใส่เสียสละเวลาและแรงกาย ในการให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแง่คิดในทางวิชาการหรือแง่คิดในด้านการทำงานในอนาคตแก่ผู้วิจัย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบรูณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน และถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่เป็นอย่างสูงที่คอยเป็นกำลังใจให้คำปรึกษาให้ทุกอย่างแก่ผู้วิจัยมาตลอดโดยไม่รู้จักเหน็จเหนื่อย และขอมอบคุณความดี และประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก่สังคมส่วนรวมทั่วไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ฌ

สารบัญภาพ.....ญ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2

1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....2

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1. ไฮโดรเจน.....3

2.2. การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ.....8

2.3. กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ.....9

2.4. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสีย.....16

2.5. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....20

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....25

3.1. แผนการวิจัย.....25

3.2. ตัวแปรที่ศึกษา.....25

3.3. เครื่องมือและอุปกรณ์.....30

3.4. วิธีการทดลอง.....30

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....34

4.1. การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียประเภทต่าง ๆ.....34

4.2. ศึกษาผลของหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านความร้อนที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน.....88

4.3. เปรียบเทียบการทดลองปรับพีเอชน้ำเสีย และการใช้หัวเชื้อที่ผ่านการต้ม.....97

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....106

5.1. สรุปผลการทดลอง.....106

5.2. ข้อเสนอแนะ.....107

หน้า

รายการอ้างอิง.....108

ภาคผนวก.....111

ภาคผนวก ก.....112

ภาคผนวก ข.....122

ภาคผนวก ค.....126

ภาคผนวก ง.....128

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....130

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน....4
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ....5
ตารางที่ 2.3 ประวัติศาสตร์การพัฒนาเกี่ยวกับไฮโดรเจน....7
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองที่ 1 การหาพีเอชที่เหมาะสม....28
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองที่ 2 การศึกษาเชื้อจุลชีพที่ต้มที่ 100 ° ซ....29
ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ....33
ตารางที่ 4.1 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และ อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของ
น้ำเสียไบโอดีเซลที่พีเอชต่าง ๆ....52
ตารางที่ 4.2 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของ
น้ำเสียแป้งมันที่พีเอชต่าง ๆ....67
ตารางที่ 4.3 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียปลา
กระป๋องที่พีเอชต่าง ๆ....85
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
ของน้ำเสีย 3 ชนิด ในสภาวะที่คุมพีเอชและผ่านการต้มหัวเชื้อ....96
ตารางที่ 4.5 สรุปผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพรวม ระหว่างสภาวะ
ที่คุมพีเอชและผ่านการต้มหัวเชื้อ....101
ตารางที่ 4.6 สรุปผลการเปรียบเทียบกับผลการวิจัยอื่น ๆ....103

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ....12
รูปที่ 3.1 ผังการไหลการทดลองชุดที่ 1 เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม....26
รูปที่ 3.2 ผังการไหลการทดลองชุดที่ 2 ที่ใช้หัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านการต้ม....27
รูปที่ 3.3 แผนภาพการทดลอง....32
รูปที่ 4.1 การทดลองน้ำเสียไบโอดีเซลชุดการทดลองที่พีเอช 5....36
รูปที่ 4.2 การทดลองน้ำเสียไบโอดีเซลชุดการทดลองที่พีเอช 6....39
รูปที่ 4.3 การทดลองน้ำเสียไบโอดีเซลชุดการทดลองที่พีเอช 6.5....42
รูปที่ 4.4 การกำจัดซีโอดีของน้ำเสียไบโอดีเซลทุกระดับค่าพีเอช....44
รูปที่ 4.5 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียไบโอดีเซลที่พีเอชต่าง ๆ....46
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นจุลชีพสำหรับทุกระดับค่าพีเอชของน้ำเสียไบโอดีเซล....47
รูปที่ 4.7 กรดอินทรีย์ระเหยสำหรับทุกระดับค่าพีเอชของน้ำเสียไบโอดีเซล....48
รูปที่ 4.8 สภาพด่างทั้งหมดของทุกระดับค่าพีเอชตลอดการทดลองน้ำเสียไบโอดีเซล....49
รูปที่ 4.9 อัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ต่อ สภาพความเป็นด่างทั้งหมดของ
ทุกระดับค่าพีเอชตลอดการทดลองน้ำเสียไบโอดีเซล....50
รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซชีวภาพ และ
การกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองน้ำเสียไบโอดีเซล....51
รูปที่ 4.11 การทดลองน้ำเสียแป้งมันชุดการทดลองที่พีเอช 5....55
รูปที่ 4.12 การทดลองน้ำเสียแป้งมันชุดการทดลองที่พีเอช 6....58
รูปที่ 4.13 การทดลองน้ำเสียแป้งมันชุดการทดลองที่พีเอช 6.5....61
รูปที่ 4.14 การกำจัดซีโอดีของน้ำเสียแป้งมันทุกระดับค่าพีเอช....63
รูปที่ 4.15 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียแป้งมันที่พีเอชต่าง ๆ....64
รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นจุลชีพสำหรับทุกระดับค่าพีเอชของน้ำเสียแป้งมัน....65
รูปที่ 4.17 กรดอินทรีย์ระเหยสำหรับทุกระดับค่าพีเอชของน้ำเสียแป้งมัน....67
รูปที่ 4.18 สภาพด่างทั้งหมดของทุกระดับค่าพีเอชตลอดการทดลองน้ำเสียแป้งมัน....67
รูปที่ 4.19 อัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ต่อ สภาพความเป็นด่างทั้งหมด
ของทุกระดับค่าพีเอชตลอดการทดลองน้ำเสียแป้งมัน....68
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการ ผลิตก๊าซชีวภาพ และ การกำจัดซีโอดี
ของชุดการทดลองน้ำเสียแป้งมัน....69

รูปที่ หน้า

รูปที่ 4.21 การทดลองน้ำเสียปลากระป๋องชุดการทดลองที่พีเอช 5....72
รูปที่ 4.22 การทดลองน้ำเสียปลากระป๋องชุดการทดลองที่พีเอช 6....73
รูปที่ 4.23 การทดลองน้ำเสียปลากระป๋องชุดการทดลองที่พีเอช 6.5....78
รูปที่ 4.24 การกำจัดซีโอดีน้ำเสียปลากระป๋องของทุกระดับค่าพีเอช....80
รูปที่ 4.25 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียปลากระป๋องที่พีเอชต่าง ๆ....82
รูปที่ 4.26 ความเข้มข้นจุลชีพสำหรับทุกระดับค่าพีเอชของน้ำเสียปลากระป๋อง....83
รูปที่ 4.27 กรดอินทรีย์ระเหยสำหรับทุกระดับค่าพีเอชของน้ำเสียปลากระป๋อง....84
รูปที่ 4.28 สภาพด่างทั้งหมดของทุกระดับค่าพีเอชตลอดการทดลองน้ำเสียปลากระป๋อง....85
รูปที่ 4.29 อัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ต่อ สภาพความเป็นด่างทั้งหมด
ของทุกระดับค่าพีเอชตลอดการทดลองน้ำเสียปลากระป๋อง....86
รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และ
การกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองน้ำเสียปลากระป๋อง....87
รูปที่ 4.31 การทดลองน้ำเสียไบโอดีเซลกับหัวเชื้อที่ผ่านการต้มเดือด....90
รูปที่ 4.32 การทดลองน้ำเสียแป้งมันกับหัวเชื้อที่ผ่านต้ม....93
รูปที่ 4.33 การทดลองน้ำเสียปลากระป๋องกับหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านการต้ม....96
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของชุดที่คุมพีเอชน้ำเสีย
และ การต้มหัวเชื้อ....98
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของชุดที่คุมพีเอชน้ำเสีย
และ การต้มหัวเชื้อ....99
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซสะสมของชุดที่คุมพีเอชน้ำเสีย และ การต้มหัวเชื้อ....100
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าซีโอดีของชุดที่คุมพีเอชน้ำเสีย และ การต้มหัวเชื้อ....101
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบร้อยละซีโอดีที่ถูกกำจัดของชุดที่คุมพีเอชน้ำเสีย และ การต้มหัวเชื้อ....102
รูปที่ 4.39 สรุปผลการเปรียบเทียบของชุดที่คุมพีเอชน้ำเสีย
และ การต้มหัวเชื้อในน้ำเสียทุกประเภท....104