การใช้โพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นสารทำให้แข็งตัว สำหรับการผนึกกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ

นางสาว บุญฉวี ศรีหมอก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-633-903-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17375059

USE OF LOW DENSITY POLYETHYLENE AS A SOLIDIFYING AGENT FOR LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTE IMMOBILIZATION

Miss Boonchawee Srimok

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the degree of Master of Engineering
Department of Nuclear Technology
Chulalongkorn University
Academic year 1996

ISBN 974-633-903-7

ชื่อวิทยานิพนธ์	การใช้โพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นสารทำให้แข็งตัวสำหรับการผนึกกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ
โดย	นางสาว บุญฉวี ศรีหมอก
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

บุญฉวี ศรีหมอก : การใช้โพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นสารทำให้แข็งตัวสำหรับการผนึกกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ (USE OF LOW DENSITY POLYETHYLENE AS A SOLIDIFYING AGENT FOR LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTE IMMOBILIZATION) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.สุพิชชา จันทรโยธา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ; 86 หน้า. ISBN 974-633-903-7

การทดลองใช้โพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีดัชนีการไหล 0.50 กรัมต่อนาทีเป็นสารทำให้แข็งตัวสำหรับการผนึกกากกัมมันตรังสีจำลองระดับต่ำประเภท สลัดจ์ เถ้า เรซิน โซเดียมซัลเฟตและกรดบอริก โดยทำการผนึกกากฯทุกประเภทที่ปริมาณ 10, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบ ความทนทานต่อแรงกด ความต้านทานแรงดึง ความทนทานต่อสารเคมีและความทนทานต่อถูกชะล้างของผลิตภัณฑ์กากฯผนึกที่ถูกผลิตขึ้น เทียบค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดโดยหน่วยงาน USNRC เพื่อยืนยันว่าสามารถใช้โพลีเอทีลีนในการผนึกกากฯแม้กระทั่งกากฯประเภทเรซินที่ไม่สามารถผนึกได้ดีในวัสดุประเภทอื่น

ผลปรากฏว่าผลิตภัณฑ์กากฯผนึกประเภท สลัดจ์ เถ้า เรซิน โซเดียมซัลเฟตและกรดบอริก มีค่าความทนทานต่อแรงกดที่จุดครากสูงสุดมีค่าประมาณ 1372, 1470, 1074, 1235 และ 1025 psi ตามลำดับ ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดขาดสูงสุดมีค่าประมาณ 1391, 1699, 1338, 1461 และ 1405 psi ตามลำดับ มีค่าดัชนีการถูกชะล้างของซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 สูงสุดแสดงเป็นคู่ลำดับ 8.9,8.0 7.4,10.8 8.2,8.7 8.0,8.5 และ 7.8,9.2 ตามลำดับของกากฯผนึกข้างต้น และสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความสามารถผนึกกากฯประเภทเรซินได้ในปริมาณสูงกว่าผนึกกากฯเรซินในวัสดุซีเมนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C618611 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: WASTE CONDITIONING / WASTE IMMOBILIZATION / WASTE SOLIDIFICATION / LOW LEVEL WASTE MANAGEMENT / LOW DENSITY POLYETHYLENE
BOONCHAWEE SRIMOK : USE OF LOW DENSITY POLYETHYLENE AS A SOLIDIFYING AGENT FOR LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTE IMMOBILIZATION. THESIS ADVISOR : Dr.SUPITCHA CHANYOTHA, Ph.D. THESIS COADVISOR : ASSIST PROF.CHAYAKRIT SIRI-UPATHAMP, 86 pp. ISBN 974-633-903-7

This study used the low density polyethylene with melt index of 0.50 gram per minute to solidifiy five simulated low level waste; activated sludge, incinerator ash, spent resin, sodium sulphate and boric acid. Each type of the polyethylene waste forms contains 10, 30 and 50 wt% simulated waste. Tests of compressive strength, tensile strength, chemical resistant and leachability of the produced waste forms were performed. The results were also compared to the standard value recommended by United State Nuclear Regulatory Commission (USNRC) to ensure the use of low density polyethylene as solidifying agent even in the case of problem waste as spent resin.

It was found that conditioned waste forms of activated sludge, incinerator ash , spent resin, sodium sulphate and boric acid gave compressive yield strength of 1372, 1470, 1074, 1235 and 1025 psi respectively. And also gave respective ultimate tensile strength of 1391, 1699, 1338, 1461 and 1405 psi for each above sequence waste. The results of leachability index of Cs-137 and Co-60 were 8.9, 8.0 7.4, 10.8 8.2, 8.7 8.0, 8.5 and 7.8, 9.2 respectively. These conditioned waste forms also provided good chemical resistance properties. The results also indicate that more spent resin waste contents can be solidified in polyethylene than in hydraulic cement.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของบุคคลหลายฝ่าย ผู้เขียนจึงขอแสดงความซาบซึ้งต่อท่านทั้งหลาย อาทิ อาจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ทั้งทางด้านการวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ที่ปรึกษาร่วมของวิจัยชิ้นนี้ ดร.วิศิษฐ์ ทวีปรังสีพร ผู้ซึ่งคอยแนะนำและแนะแนวทางต่างๆแก่ผู้เขียน นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณไปยังอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฯที่ได้ประสาทความรู้และความคิดต่างๆ ให้แก่ข้าพเจ้าได้นำมาใช้ในการทำวิจัย

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บุคคลผู้ซึ่งมีส่วนช่วยเหลืออย่างมาก ทางด้านเครื่องมือ ทั้งทางการสร้างเครื่องมือ การจัดหา และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การซ่อมเครื่องมือ ได้แก่ คุณบัญชา อุนพานิช คุณทวีศักดิ์ กิระวิทยา และ คุณธเนส ศิริไตรวัฒนาพร นอกจากนี้ บุคคลที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำปฏิบัติการวิจัย คุณสมพงษ์ ซูดิกุลสวัสดิ์ ในนามของภาควิชาวัสดุศาสตร์จุฬาฯ Mr. Jacob B ในนามวิทยาลัยปิโตรเคมีจุฬาฯ ส่วนงานบริการด้านเทคนิค บริษัทไทยโพลีเอทีลีนจำกัด (มหาชน) ส่วนงานวิจัยและพัฒนา บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์จำกัด ฝ่ายการตลาด บริษัทเชลล์แห่งประเทศไทย กองขจัดกากกัมมันตรังสี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาฯ สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือทั้งยังอนุเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทดสอบอีกด้วย ขอขอบคุณไปยังทุกบุคคลและทุกหน่วยงานดังที่ได้กล่าวมา และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อค่าใช้จ่ายในการทำวิทยานิพนธ์

ถ้าปราศจากบุคคลผู้ซึ่งเป็นทุกสิ่ง ทั้งสองท่านนั้นได้แก่ บิดามารดาของข้าพเจ้า คงจะไม่มีวันนี้สำหรับตัวผู้เขียนเช่นกัน ข้าพเจ้าขอแสดงความกตัญญูมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ..... ง
บทคัดย่อ(อังกฤษ) ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฌ
บทที่ 1.บทนำ 1
1.1 ที่มา ปัญหา และเหตุผล 1
1.2 วัตถุประสงค์ 4
1.3 ขอบเขตการวิจัย 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
บทที่ 2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 การจัดการกากกัมมันตรังสี 7
2.1.1 กากกัมมันตรังสีคืออะไร 7
2.1.1.1 ชนิดของกากกัมมันตรังสีแบ่งตามความแรง 7
2.1.1.1.1 กากที่ไม่มีอันตราย 7
2.1.1.1.2 กากระดับต่ำถึงปานกลาง 7
2.1.1.1.3 กากระดับสูง 7
2.1.1.2 ชนิดของกากกัมมันตรังสีแบ่งตามลักษณะ 7
2.1.1.3 ประเภทของกากกัมมันตรังสีแบ่งตามที่มา 8
2.1.2 การจัดการกากกัมมันตรังสี 8
2.1.2.1 การบำบัดกากกัมมันตรังสี 9
2.1.2.2 การผนึกกากกัมมันตรังสี 9
2.1.2.2.1 การผนึกกากฯด้วยซีเมนต์ 9
2.1.2.2.2 การผนึกกากฯด้วยแก้ว 10
2.1.2.2.3 การผนึกกากฯด้วยบิทูเมน 10
2.1.2.2.4 กากผนึกกากฯด้วยโพลีเมอร์ 10
2.1.2.2.5 การผนึกกากฯด้วยโลหะ 11
2.1.2.3 การบรรจุกากกัมมันตรังสี 15
2.1.2.4 การขนส่งกากกัมมันตรังสี 16
2.1.2.5 การทิ้งกากกัมมันตรังสี 16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2 Introduction to Polymer materials 16
2.2.1 Polymer Characterization 16
2.2.1.1 ประเภทของโพลีเมอร์แบ่งตามโครงสร้าง 16
2.2.1.1.1 Addition Polymer 16
2.2.1.1.2 Condensation Polymer 17
2.2.1.2 ประเภทของโพลีเมอร์แบ่งตามสมบัติ 17
2.2.1.2.1 เทอร์โมพลาสติกโพลีเมอร์ 17
2.2.1.2.2 เทอร์โมเซตโพลีเมอร์ 17
2.2.1.2.3 อิลาสโตเมอร์ 17
2.2.1.2.4 โพลีเมอร์เส้นใย 20
2.2.2 คุณสมบัติของโพลีเมอร์ 20
2.2.2.1 คุณสมบัติเชิงกลและทางกายภาพ 20
2.2.2.2 ความทนทานต่อรังสี 21
2.2.2.3 ความทนทานต่อสารเคมี 23
2.2.2.4 ความทนทานต่อการถูกชะล้าง 23
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของโพลีเมอร์ 24
2.2.3.1 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์ 24
2.2.3.2 สารเคมีหรือวัสดุที่เติมในโพลีเมอร์ 24
2.2.3.3 กระบวนการผลิต 24
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และการทดลอง 25
3.1 วัดุและสารเคมี 25
3.2 อุปกรณ์ 25
3.3 เครื่องมือ 26
3.4 การทดลอง 26
3.4.1 การเตรียมกาก 26
3.4.1.1 การเตรียมกากกัมมันตรังสีจำลอง 26
3.4.1.1.1 กากประเภทเถ้า 27
3.4.1.1.2 กากประเภทเรซินที่ใช้แล้ว 27
3.4.1.1.3 กากประเภทสลัดจ์ 27
3.4.1.1.4 กากโซเดียมซัลเฟตและกรดบอริก 27
3.4.1.2 การเตรียมกากกัมมันตรังสี 28

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.2 การเตรียมแบบที่ใช้ในการขึ้นรูป 29
3.4.2.1 การเตรียมแบบที่ใช้ในการขึ้นรูปในส่วนที่ไม่มีรังสี 29
3.4.2.2 การเตรียมแบบที่ใช้ในการขึ้นรูปในส่วนที่มีรังสี 29
3.4.3 ระบบการผลิตผลิตภัณฑ์กากฯผนึก 30
3.4.4 การผลิต ผลิตภัณฑ์กากฯผนึก 31
3.4.4.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์กากฯจำลองผนึก 31
3.4.4.2 การเตรียมผลิตภัณฑ์กากฯผนึก 32
3.4.5 การทดสอบคุณสมบัติ 33
3.4.5.1 ความทนทานต่อแรงกด 33
3.4.5.2 ความต้านทานแรงดึง 33
3.4.5.3 ความทนทานต่อสารเคมี 34
3.4.5.4 ความทนทานต่อการถูกชะล้าง 34
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ 36
4.1 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกด 36
4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง 39
4.3 ผลการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี 41
4.4 ผลการทดสอบการถูกชะล้าง 44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 50
5.1 สรุปผลการทดลอง 50
5.2 ข้อเสนอแนะ 52
รายการอ้างอิง 53
ภาคผนวก 56
ประวัติผู้เขียน 86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1-1 กากกัมมันตรังสีในประเทศไทย..... 1
ตาราง 2-1 วิธีการบำบัดและการผนึกกากฯและกากฯที่เหมาะสำหรับวิธีการบำบัด..... 12
ตาราง 2-2 ระบบการบำบัดและการผนึกกากฯในประเทศต่างๆ..... 13
ตาราง 2-3 คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกโพลีเมอร์..... 18
ตาราง 2-4 คุณสมบัติของเทอร์โมเซตโพลีเมอร์..... 19
ตาราง 3-1 กัมมันตภาพรังสีของกากฯที่เตรียมได้จากการทดลอง..... 28
ตาราง 3-2 ระบบที่เหมาะสมในการผนึกกากฯ สำหรับทดสอบความแข็งแรงดึง..... 31
ตาราง 3-3 ระบบที่เหมาะสมในการผนึกกากฯ สำหรับทดสอบความทนต่อแรงกด..... 31
ตาราง 3-4 สัดส่วนของกากกัมมันตรังสีชนิดต่างๆและโพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์กากฯผนึก..... 33
ตาราง 4-1 ค่าความทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก ชนิดต่างๆ..... 36
ตาราง 4-2 ค่าความต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก ชนิดต่างๆ..... 40
ตาราง 4-3 ก. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก(%)ที่มีปริมาณกากฯเรซินต่างๆ เนื่องจากผลจากการแช่ด้วยสารละลาย..... 41
ตาราง 4-3 ข. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก(%)ที่มีปริมาณกากฯประเภทเถ้าต่างๆ เนื่องจากผลจากการแช่ด้วยสารละลาย..... 41
ตาราง 4-3 ค. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก(%)ที่มีปริมาณกากฯประเภทสลัดจ์ต่างๆ เนื่องจากผลจากการแช่ด้วยสารละลาย..... 42
ตาราง 4-3 ง. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก(%)ที่มีปริมาณกากฯประเภทกรดบอริกต่างๆ เนื่องจากผลจากการแช่ด้วยสารละลาย..... 42
ตาราง 4-3 จ. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฯผนึก(%)ที่มีปริมาณกากฯประเภทโซเดียมซัลเฟตต่างๆ เนื่องจากผลจากการแช่ด้วยสารละลาย..... 42
ตาราง 4-4 ดัชการถูกชะล้างของผลิตภัณฑ์กากฯผนึกชนิดต่างๆ..... 45
ตาราง 4-5 ค่าอัตราการถูกชะล้างของผลิตภัณฑ์กากฯผนึกชนิดต่างๆ..... 48
ตาราง ผ.1 ข้อมูลดิบของการทดสอบความทนทานต่อแรงกดของกากฯผนึกที่จุดคราก..... 58
ตาราง ผ.2 ข้อมูลดิบของการทดสอบความต้านทานแรงดึงของกากฯผนึกที่จุดครากและจุดขาด. 61
ตาราง ผ.3 เส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนาและน้ำหนักของชิ้นงานในการทดสอบความทนทานต่อสารเคมี..... 63
ตาราง ผ.4-1 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 10% ash waste forms..... 71

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ผ.4-2 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 30% ash waste forms..... 72
ตาราง ผ.4-3 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 50% ash waste forms..... 73
ตาราง ผ.4-4 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 10% boric acid waste forms..... 74
ตาราง ผ.4-5 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 30% boric acid waste forms..... 75
ตาราง ผ.4-6 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 50% boric acid waste forms..... 76
ตาราง ผ.4-7 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 10% sodium sulphate waste forms..... 77
ตาราง ผ.4-8 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 30% sodium sulphate waste forms..... 78
ตาราง ผ.4-9 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 50% sodium sulphate waste forms..... 79
ตาราง ผ.4-10 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 10% spent resin waste forms..... 80
ตาราง ผ.4-11 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 30% spent resin waste forms..... 81
ตาราง ผ.4-12 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 50% spent resin waste forms..... 82
ตาราง ผ.4-13 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 10%sludge waste forms..... 83
ตาราง ผ.4-14 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 30%sludge waste forms..... 84
ตาราง ผ.4-15 Data for leach index measurement and calculation method sheet for 50%sludge waste forms..... 85

สารบัญรูป

หน้า

รูป 1-1 การกระจายของกัมมันตภาพรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม..... 3
รูป 2-1 ขั้นตอนในการจัดการกากกัมมันตรังสี..... 8
รูป 2-2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเอทีลีนและโพลีสไตรีน..... 20
รูป 2-3 Leaque chart ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจาก Swallow และคณะ..... 22
รูป 2-4 แสดงค่าอัตราการถูกชะล้างของกากฯผนึกที่ใช้วัสดุต่าง ๆเป็นสารทำให้แข็งตัว..... 23
รูป 3-1 ลักษณะของกากกัมมันตรังสีจำลองชนิดต่าง ๆ..... 27
รูป 3-2 ระบบวัดที่ใช้ในการวัดกัมมันตภาพรังสี..... 28
รูป 3-3 แบบสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน..... 30
รูป 3-4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผสมกากกัมมันตรังสีโพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ..... 30
รูป 3-5 การเตรียมตัวอย่างสำหรับอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก..... 32
รูป 3-6 (Universal-Testing-Machine) จากบริษัทฮาวน์ฟิวล์รุ่น100R..... 34
รูป 3-7 ตัวอย่างการทดสอบความสามารถในการถูกชะล้าง..... 35
รูป 4-1 ผลของปริมาณกากฯชนิดต่าง ๆต่อค่าความทนทานต่อแรงกด..... 37
รูป 4-2 ดัชนีการถูกชะล้างของผลิตภัณฑ์กากฯผนึกชนิดต่าง ๆ..... 45
รูป 4-3 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีสะสมของ boric acid waste forms..... 46
รูป 4-4 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีสะสมของ sodium sulphate waste forms..... 47
รูป 4-5 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีสะสมของ spent resin waste forms..... 47
รูป 4-6 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีสะสมของ activated sludge waste forms..... 47
รูป 4-7 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีสะสมของ incinerator ash waste forms..... 48
รูป ผ.1 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณความทนทานต่อแรงกดที่จุดคราก..... 57
รูป ผ.2 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและจุดขาด..... 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย