

การพัฒนากระบวนการฝึกภาคของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสม
ระดับความแรงรังสีต่ำด้วยซัลเฟอร์โพลิเมอร์



นางสาววิวรรณ กฤษณานูวัตร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9882-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN ENCAPSULATION PROCESS FOR HAZARDOUS AND LOW-LEVEL
RADIOACTIVE MIXED WASTE USING SULFUR POLYMER



Miss Rawiwan Kritsananuwat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9882-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสี ผสมระดับความแข็งแรงรังสีด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์
โดย	นางสาววิวรรณ กฤษณานูวัตร
สาขาวิชา	นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทร์โยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทร์โยธา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทร์จาว)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

รวิวรรณ กฤษณานูวัตร์ : การพัฒนากระบวนการผนึกกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (DEVELOPMENT OF AN ENCAPSULATION PROCESS FOR HAZARDOUS AND LOW-LEVEL RADIOACTIVE MIXED WASTE USING SULFUR POLYMER) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ศุภิชชา จันทร์โยธา, 100 หน้า. ISBN 974-17-9882-2

การทดลองระดับห้องปฏิบัติการนี้ เป็นการศึกษาผลการนำวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับสารดัดแปรสมบัติ STX™ ที่อัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก มาใช้ผนึกกากของเสียอันตราย และ กากกัมมันตรังสีผสม ซึ่งได้แก่ ตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียอันตราย และ เถ้า ตะกอนสลัดจ์ และ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้แล้ว จากกระบวนการบำบัดกากกัมมันตรังสีผลิตภัณฑ์กากผนึกที่ได้ถูกนำมาขึ้นรูปเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและใช้ทดสอบคุณสมบัติการทนทาน ต่อ แรงกด แชน้ำ สารเคมี รังสี และการชะล้าง

ผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์กากผนึกซัลเฟอร์โพลีเมอร์ของตะกอนสลัดจ์อันตรายและเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้แล้วมีคุณภาพต่ำ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์กากผนึกทั้ง 2 ประเภทจึงไม่เหมาะที่จะถูกผนึกด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์

กากที่สามารถถูกผนึกได้ดีด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่เตรียมขึ้น คือ กากกัมมันตรังสีประเภทเถ้าและตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ผลจากการทดสอบคุณสมบัติ พบว่า อัตราส่วนผสมสูงสุดของกากที่เหมาะสมต่อการผนึก สำหรับกากประเภทเถ้า คือ 40% โดยน้ำหนัก และ กากตะกอนสลัดจ์ คือ 20% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าการทนทานต่อแรงกดหลังผ่านการทดสอบคุณสมบัติทุกลำดับอยู่ในช่วง 27 -40 เมกะปาสกาล และ 8 - 19 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ (0.41 เมกะปาสกาล) ที่กำหนดโดยหน่วยงาน USNRC ผลการทดสอบการชะล้างนิวไคลด์รังสี Cs-137 จากผลิตภัณฑ์กากผนึกประเภทเถ้าและตะกอนสลัดจ์ (ปส.) พบว่า ดัชนีการชะล้างทุกชิ้นงานของเถ้าและตะกอนสลัดจ์สูงกว่าค่ามาตรฐานซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 6.0 และมีค่าการชะล้างโลหะหนัก ออกจากผลิตภัณฑ์กากผนึกต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USEPA ซึ่งแสดงว่า ซัลเฟอร์โพลีเมอร์สามารถหน่วงรั้งการแพร่กระจายของนิวไคลด์รังสีและโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ดี

ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อนิติศ.....
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2545	

4270505421 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: SULFUR POLYMER / WASTE ENCAPSULATION / MIXED WASTE / WASTE SOLIDIFICATION

RAWIWAN KRITSANANUWAT : DEVELOPMENT OF AN ENCAPSULATION PROCESS FOR HAZARDOUS AND LOW-LEVEL RADIOACTIVE MIXED WASTE USING SULFUR POLYMER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUPITCHA CHANYOTHA, Ph.D. , 100 pp. ISBN 974-17-9882-2.

A lab-scale experiment was conducted to investigate the use of sulfur polymer material which involved the reaction of element sulfur with 10 wt% STXTM modifier to encapsulate the hazardous and radioactive mixed waste. Selected waste types were sediment sludge from hazardous wastewater treatment facility, incinerator ash, activated sludge and spent ion-exchange resin which the latter three waste types receiving from radioactive waste treatment facility. Waste form formulation was fabricated to determine optimum waste loading and perform the property testing which included the resistant to compressive strength, water immersion, chemical, radiation and leachability.

The results from the experiment show that the sulfur polymer waste form of sediment sludge and spent ion-exchange resin have poor quality formulation, therefore, use of sulfur polymer for encapsulation of these waste is not recommended.

The sulfur polymer material could be well incorporated with incinerator ash and activated sludge. The optimal waste loading for incinerator ash and activated sludge were found to be 40 wt% and 20 wt%, respectively. At these waste loading formations, the range of compressive strength was found to be 27 - 40 MPa for incineration ash and 8 - 19 MPa for activated sludge which higher than the minimum required compressive strength (0.41 MPa) by USNRC. The radioactive nuclide and heavy metal leachability tests, shows that all specimens tested have radioactive leachability indices higher than the USNRC standard value of 6.0 and have heavy metal leachability values lower than the USEPA standard value. It indicates that the sulfur polymer could retard the release of radionuclides and heavy metals to the environment.

Department Nuclear Technology

Student's signature.....

Field of study Nuclear Technology

Advisor's signature

Academic year 2002

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทร์โยธา ที่ให้ความกรุณาคอยให้คำปรึกษาชี้แนะ และความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย อธิธิพูนธนากร เจ้าหน้าที่กองการวัดกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม และ เจ้าหน้าที่กองผลิตไอโซโทป สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ในการติดต่อประสานงาน และให้อนุเคราะห์สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่โครงการการจัดการกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ในการอนุเคราะห์กากกัมมันตรังสีเพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท GENCO ในการให้ความอนุเคราะห์กากของเสียอันตราย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องการทดสอบการทนทานต่อแรงกดของชิ้นตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผงนึ่ง

ขอขอบคุณ บริษัท ไอโซตรอน (ประเทศไทย) จำกัด ในการให้ความอนุเคราะห์ฉายรังสีตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผงนึ่ง

ขอขอบคุณ บริษัท AECL ประเทศแคนาดา ที่สนับสนุนมอบทุนการศึกษา

ขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัย และ บัณฑิตวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุนพานิช ในการช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกท่าน และ เพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคน ในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือ ความห่วงใย และคอยให้กำลังใจ ตลอดมา

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณยาย และญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านด้วยดีเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 กากกัมมันตรังสีและกากของเสียอันตราย	7
2.1.1 กากกัมมันตรังสี	7
2.1.2 ประเภทของกากกัมมันตรังสี	7
2.1.3 กากกัมมันตรังสีจำแนกตามแหล่งกำเนิด	8
2.1.4 กากกัมมันตรังสีจำแนกตามระดับความแรงรังสี	10
2.1.5 กากกัมมันตรังสีผสม	11
2.1.6 กากของเสียอันตราย	12
2.2 การจัดการกากกัมมันตรังสี	12
2.2.1 การบำบัดกากกัมมันตรังสี	14
2.2.2 การแปรสภาพกากกัมมันตรังสี	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3	ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ 19
2.3.1	องค์ประกอบและคุณสมบัติของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ 21
2.3.2	การเตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์ 22
2.3.3	การพ่นกาก ด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ 25
3.	วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและการดำเนินการวิจัย 28
3.1	วัสดุและสารเคมี 28
3.2	อุปกรณ์ 28
3.3	เครื่องมือ 29
3.4	การทดลอง 29
3.4.1	แบบหล่อสำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กากพ่นก 29
3.4.2	ถังหลอมและกวนผสมกาก 30
3.4.3	ขั้นตอนการดำเนินการทดลองและตัวแปรที่ศึกษา 31
3.4.4	หาเงื่อนไขของการเตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์ 33
3.4.5	การเตรียมการของเสียอันตราย 33
3.4.6	การเตรียมกากกัมมันตรังสี 33
3.4.7	การเตรียมและหาอัตราส่วนผสมของกากที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กากพ่นก 35
3.4.8	การประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพ่นก 36
3.4.9	การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากพ่นก 37
3.4.9.1	การทนทานต่อแรงกด 37
3.4.9.2	การทนทานต่อแรงกดหลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน 38
3.4.9.3	การทนทานต่อแรงกดหลังผ่านการฉายรังสี 39
3.4.9.4	การทนทานต่อสารเคมี 39
3.4.9.5	การทนทานต่อการชะล้างโลหะหนัก 40
3.4.9.6	การทนทานต่อการชะล้างสารกัมมันตรังสี 40
3.4.10	การเติมสารเสริมความแข็งแรงลงในผลิตภัณฑ์กากพ่นก 41
3.4.11	การเติมสารต้านทานการถูกชะล้างของโลหะหนัก 42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	43
4.1 ผลการหาอัตราส่วนของซัลเฟอร์ โพลีเมอร์ที่เหมาะสม	43
4.2 ผลการทดสอบหาขนาดอนุภาคของกากที่เหมาะสม	45
4.3 การประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากผนึ่ง	46
4.4 ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงกด	48
4.5 ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงกดหลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน	52
4.5.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์กากผนึ่ง ..	52
4.5.2 การเปลี่ยนแปลงของการทนทานต่อแรงกด	54
4.6 ผลการทดสอบการทนทานต่อรังสี	56
4.7 ผลการทดสอบการทนทานต่อสารเคมี	57
4.8 ผลการทดสอบการทนทานต่อการชะล้างโลหะหนัก	59
4.9 ผลการทดสอบการทนทานต่อการชะล้างนิวไคลด์กัมมันตรังสี	60
4.9.1 ดัชนีการชะล้าง	60
4.9.2 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสม	61
4.10 ผลการเติมสารเสริมความแข็งแรง	63
4.11 ผลการเติมสารต้านทานการชะล้างของโลหะหนัก	63
5. สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	65
5.1 กากของเสียอันตราย	65
5.2 กากกัมมันตรังสีผสม	66
5.2.1 กากประเภทเถ้า	66
5.2.2 กากประเภทตะกอนสลัดจ์ (ระบบบำบัดน้ำเสีย สนง.ปส.)	68
5.2.3 กากประเภทเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้แล้ว	69
5.3 ข้อเสนอแนะ	72
5.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการวิจัย	73
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก ก	77
ภาคผนวก ข	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	100

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1	คุณลักษณะความเป็นพิษ , ความเข้มข้นสูงสุดของสารปนเปื้อนอันตราย.....	13
ตารางที่ 2-2	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการพ่นีคากกัมมันตรังสีแบบต่าง ๆ ...	16
ตารางที่ 2-3	คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ SP และ SM	21
ตารางที่ 2-4	คุณลักษณะทั่วไปของ CHEMENT2000 และ STX™	24
ตารางที่ 2-5	เปรียบเทียบภาระบรรทุกกากสูงสุด(Maximum waste loading) ของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ระหว่างการผสมด้วยเครื่องฉีดพลาสติกและเครื่องผสมแบบใบพัดกวน.....	26
ตารางที่ 3-1	ค่าความหนาแน่นของวัสดุพ่นีคากและกากกัมมันตรังสีแต่ละประเภท.....	34
ตารางที่ 4-1	ความหนาแน่น และ ค่าการทนทานต่อแรงกดของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่STX™ อัตราส่วนต่างๆ.....	44
ตารางที่ 4-2	ค่าความหนาแน่น และค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคประเภทเถ้าอัตราส่วนผสมของเถ้า 40% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคเถ้าต่างๆ.....	45
ตารางที่ 4-3	ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคแต่ละอัตราส่วนผสมของกาก.....	47
ตารางที่ 4-4	ค่าความหนาแน่น และ ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคแต่ละอัตราส่วนผสมของกาก.....	51
ตารางที่ 4-5	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน....	55
ตารางที่ 4-6	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคหลังผ่านการฉายรังสี 1 MGy....	56
ตารางที่ 4-7	เปรียบเทียบการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน, สารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น10% นาน 56 วัน.....	58
ตารางที่ 4-8	ปริมาณการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากพ่นีคประเภทเถ้า.....	59
ตารางที่ 4-9	ปริมาณการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากพ่นีคประเภทตะกอนสลัดจ์	60
ตารางที่ 4-10	ดัชนีการชะล้างของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ	61
ตารางที่ 5-1	เปรียบเทียบอัตราส่วนผสมสูงสุดของกากประเภทต่าง ๆ ที่สามารถพ่นีคได้ในวัสดุพ่นีคากประเภทซัลเฟอร์โพลีเมอร์ , ซีเมนต์ และ โพลีเอทีลีน.....	70
ตารางที่ 5-2	เปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพ่นีคที่พ่นีคด้วยวัสดุพ่นีคากประเภทต่าง ๆ	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก-1	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์ โพลีเมอร์ที่อัตราส่วนผสมของ STX™ ต่าง ๆ.....	78
ตารางที่ ก-2	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมของ กาก 40% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคเถ้าต่างๆ	79
ตารางที่ ก-3	ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฉนีกแต่ละอัตราส่วนผสมของกากเพื่อใช้ สำหรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากฉนีก	80
ตารางที่ ก-4	ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) แต่ละอัตรา ส่วนผสมของกากเพื่อใช้สำหรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากฉนีก	81
ตารางที่ ก-5	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (การทดสอบการทนทานต่อแรงกด).....	82
ตารางที่ ก-6	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน.....	83
ตารางที่ ก-7	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าหลังผ่านการแช่ในสาร ละลายกรดซัลฟูริก (การทนทานต่อสารเคมี).....	84
ตารางที่ ก-8	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าหลังผ่านการแช่ในสาร ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทนทานต่อสารเคมี).....	85
ตารางที่ ก-9	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการฉายรังสี (การทนทานต่อรังสี).....	86
ตารางที่ ก-10	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) ที่ อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (การทดสอบการทนทานต่อแรงกด).....	87
ตารางที่ ก-11	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) ที่ อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน.....	88
ตารางที่ ก-12	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) หลัง ผ่านการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (การทนทานต่อสารเคมี).....	89
ตารางที่ ก-13	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) หลัง ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทนทานต่อสารเคมี).....	90
ตารางที่ ก-14	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) ที่ อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการฉายรังสี (การทนทานต่อรังสี).....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข-1	ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทเถาที่อัตราส่วนผสมกาก 20 wt%.....	94
ตารางที่ ข-2	ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทเถาที่อัตราส่วนผสมกาก 30 wt%	95
ตารางที่ ข-3	ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทเถาที่อัตราส่วนผสมกาก 40 wt%.....	96
ตารางที่ ข-4	ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 20 wt%	97
ตารางที่ ข-5	ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 30 wt%	98
ตารางที่ ข-6	ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 30 wt%	99

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3-1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมซัลเฟอร์ โพลีเมอร์และกวนผสมกากกัมมันตรังสี.....	31
รูปที่ 3-2	ขั้นตอนดำเนินการทดลองและตัวแปรที่ศึกษา.....	32
รูปที่ 3-3	ลักษณะของ STX TM กำมะถัน และกากกัมมันตรังสีประเภทต่าง ๆ.....	35
รูปที่ 3-4	แบบหล่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กากฉนิก และ ผลิตภัณฑ์กากฉนิก.....	36
รูปที่ 3-5	เครื่องทดสอบการทนทานต่อแรงกด.....	38
รูปที่ 3-6	การทดสอบการทนทานต่อการถูกระดาษของสารกัมมันตรังสี.....	41
รูปที่ 3-7	รูปแบบและลักษณะของไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการทดลอง.....	42
รูปที่ 4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของSTX กับ ค่าความทนทานต่อแรงกด.....	45
รูปที่ 4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกาก กับ ค่าความหนาแน่น.....	47
รูปที่ 4-3	ลักษณะการเกิดโพรงในผลิตภัณฑ์กากฉนิกประเภทต่าง ๆ	47
รูปที่ 4-4	ผลิตภัณฑ์กากฉนิกประเภทเรซินหลังนำออกจากแบบ และ วางทิ้งไว้ในอากาศเป็น เวลา 24 ชั่วโมง	50
รูปที่ 4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของกากประเภทต่าง ๆ กับ ค่าการทนทานต่อแรง กด.....	51
รูปที่ 4-5	ผลิตภัณฑ์กากฉนิกหลังจากผ่านการทดสอบการแช่น้ำ.....	50
รูปที่ 4-6ก	ภาพถ่ายจุลภาค ผิววัสดุซัลเฟอร์ โพลีเมอร์, ผลิตภัณฑ์กากฉนิกเก่า 40wt% และ ตะกอน สไลด์จ (ปส.) 40wt% ก่อนผ่านการทดสอบการแช่น้ำ 90 วัน	53
รูปที่ 4-6ข	การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์กากฉนิกเก่า และ ตะกอนสไลด์จ (ปส.) หลังผ่านการทดสอบการแช่น้ำ 90 วัน	53
รูปที่ 4-7	เปรียบเทียบค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนิกประเภทเก่า และ ตะกอน สไลด์จ (ปส.) ก่อนและหลังแช่น้ำ 90 วัน	55
รูปที่ 4-8	เปรียบเทียบค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนิกประเภทเก่าและตะกอน สไลด์จ (ปส.)ก่อนและหลังฉายรังสี 1 MGy	57
รูปที่ 4-9	เปรียบเทียบการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนิกหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน, สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น10% นาน 56 วัน	58
รูปที่ 4-10	สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสมของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฉนิก ประเภทเก่า	62

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-11	สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสมของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.)	62
รูปที่ 4-12	ผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่มีการเติม โซเดียมซัลไฟด์.....	64
รูปที่ 5-1	การลดลงของค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าหลังผ่านการทดสอบต่าง ๆ.....	67
รูปที่ 5-2	การลดลงของค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) หลังผ่านการทดสอบต่าง ๆ.....	69



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ประโยชน์ในประเทศไทยได้เริ่มต้นมาตั้งแต่ภายหลังการประกาศใช้พระราชบัญญัติพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พ.ศ. 2504 เมื่อวันที่ 25 เมษายน 2504

ปัจจุบันทั้งภาครัฐและเอกชนได้นำเทคโนโลยีทางด้านนิวเคลียร์มาประยุกต์ใช้ในกิจกรรมต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ อุตสาหกรรม การเกษตร และการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์ การใช้งานสารกัมมันตรังสีเพื่อประโยชน์ต่าง ๆ ดังกล่าวยังผลให้เกิดกากกัมมันตรังสีขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกากกัมมันตรังสีที่มีระดับความแรงรังสีต่ำและปานกลาง (Low - Intermediate level radioactive waste) ^[1] กิจกรรมทางนิวเคลียร์บางประเภทมีของเสียอันตราย (Hazardous waste) ปนเปื้อนอยู่ในกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น กากประเภทนี้เรียกว่ากากกัมมันตรังสีผสม (Mixed waste) กากเหล่านี้ถ้าไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งกากกัมมันตรังสีผสมอาจทำให้นิวไคลด์กัมมันตรังสีและโลหะหนักที่มีพิษแพร่กระจายหรือรั่วไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบหรืออันตรายทางรังสีและเป็นพิษต่อมนุษยชาติและสิ่งแวดล้อม

กากกัมมันตรังสีของแข็งที่ได้จากกระบวนการบำบัดมีหลายลักษณะด้วยกัน เช่น กากประเภทเถ้าที่ได้จากการบำบัดโดยวิธีการเผา กากประเภทตะกอนสลัดจ์ที่ได้จากการบำบัดโดยวิธีการตกตะกอน และกากประเภทเรซินที่ได้จากการบำบัดโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน กากเหล่านี้จะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการจัดการกากเหล่านี้ไม่จำเป็นการบำบัด (Treatment) การแปรสภาพ (Conditioning) และการจัดทิ้งอย่างถาวร (Disposal) จะต้องใช้วิธีการที่แตกต่างกันไปเพื่อให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของกากประเภทนั้น ๆ

การแปรสภาพ (Conditioning) กากของแข็งเป็นการปรับสภาพกากให้มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมโดยอาศัยวิธีการผนึกกาก (Immobilization or Solidification or Encapsulation) ให้ติดแน่นอยู่ในวัสดุที่ไม่ใช่สารกัมมันตรังสี ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการป้องกันการแพร่กระจาย การรั่วไหล หรือการเคลื่อนย้ายของสารกัมมันตรังสีและโลหะหนักมีพิษออกจากกากสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างการจัดเก็บ (Storage) การขนส่ง (Transportation) และการจัดทิ้งกากๆถาวร (Disposal)

วิธีการผนึกกากกัมมันตรังสีที่มีระดับความแรงรังสีต่ำและกากของเสียอันตรายที่ใช้ปฏิบัติกันอยู่ในประเทศไทยในปัจจุบันคือการผนึกกากๆในวัสดุประเภทซีเมนต์ (Cementation) ^{[1][2]}

กากกัมมันตรังสีผสมจัดได้ว่าเป็นกากที่มีปัญหา (Problem waste) เพราะการผนึกกากประเภทนี้ลงในวัสดุประเภทซีเมนต์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเชิงพาณิชย์และเป็นเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กากผนึกที่มีคุณภาพต่ำ อาจเป็นผลให้องค์ประกอบที่เป็นของเสียอันตรายและนิวไคลด์รังสีถูกชะล้างออกจากผลิตภัณฑ์กากผนึกประเภทซีเมนต์และเกิดการรั่วไหลหรือการแพร่กระจายในช่วงระยะเวลาของการฝังกลบ ปรากฏการณ์นี้เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกากที่ถูกผนึก อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกากกับวัสดุผนึกกาก^[3]

ผลของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกากกับวัสดุผนึกกากประเภทซีเมนต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของกาก และช่วยปรับเสถียรภาพขององค์ประกอบอื่นๆ ในกาก ในทางตรงกันข้ามผลของปฏิกิริยาเคมีอาจไปยับยั้งการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์กากผนึก^[4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกากที่มีเกลือ และ/หรือ สารละลายอินทรีย์ความเข้มข้นสูงเป็นองค์ประกอบ เช่น Zinc Chloride เมื่อเจอความชื้นสารเหล่านี้จะทำให้เกิดสภาพที่เป็นกรดและไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุผนึกกากกับกาก ซึ่งมีผลต่อการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์กากผนึก^[5] นอกจากนี้ปัญหาข้างต้นแล้ว การผนึกกากในวัสดุประเภทซีเมนต์ยังผลให้ผลิตภัณฑ์กากผนึกที่ได้มีน้ำหนักและปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการขนส่งและการจัดตั้งกากถาวรหรือการฝังกลบ

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น โพลีเอทิลีน และ ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ มาใช้เป็นวัสดุผนึกกาก แต่การผนึกกากในโพลีเอทิลีนยังคงมีข้อจำกัดในแง่ของขนาดและรูปร่างของอนุภาค รวมทั้งลักษณะทางกายภาพของกากที่จะนำมาผนึก^{[6][7]}

ซัลเฟอร์โพลีเมอร์เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักคือกำมะถันซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้หรือกากของเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปูนซีเมนต์ ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ถูกผลิตครั้งแรกโดยบริษัท Martin Chemical Inc. มีชื่อทางการค้าว่า “CHEMENT 2000™”^{[5][8]} ซึ่งถูกใช้เป็นวัสดุผนึกกากกัมมันตรังสีในงานวิจัยที่ผ่านๆ มา ผลิตภัณฑ์กากผนึกที่ได้จะใช้ระยะเวลาเพียงสั้นๆ ในการแข็งตัวและบ่มตัวจนมีความแข็งแรงเต็มที่และยังมีความแข็งแรงสูงกว่าผลิตภัณฑ์กากผนึกประเภทซีเมนต์^[4] แต่ในปัจจุบันทางบริษัทฯ ได้เลิกผลิตแล้วเนื่องจากเกิดปัญหาบางประการกับผลิตภัณฑ์ ในขณะที่เดียวกันบริษัท STARcrete Technologies Inc. ได้ทำการพัฒนาและผลิตสารคัดแปรสมบัติเชิงกลของกำมะถัน (Sulfur modifier) เพื่อใช้ในการผลิตซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าภายใต้ชื่อทางการค้า “STX™” ปัจจุบัน STX ถูกนำมาใช้ในงานด้านโครงสร้าง แต่ยังไม่มีการอ้างอิงใดที่อ้างถึงการนำ STX มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผนึกกากกัมมันตรังสี^{[9][10]}

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งสนใจที่จะทดลองนำสารคัดแปรสมบัติเชิงกลของกำมะถัน (Sulfur modifier) ภายใต้ชื่อทางการค้า STX™ มาใช้เตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุผนึกกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์มาใช้พ่นีกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 กากกัมมันตรังสีผสมที่ใช้ประกอบด้วยของเสียอันตรายประเภทโลหะหนักเท่านั้น และกากของเสียอันตรายที่ใช้เป็นตะกอนสลัดจ์ที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน)

1.3.2 หาเงื่อนไขต่าง ๆ ในการพ่นีกาก ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างกากกับวัสดุพ่นีกาก ระยะเวลาผสม อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม การกวนผสม และ อัตราผสม เป็นต้น

1.3.3 ทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากพ่นีกากที่ได้ เช่น คุณสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อการถูชะล้าง ความทนทานต่อกัมมันตภาพรังสี และ ความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติและกำหนดชนิดของกากฯ และ สารเติมแต่งที่จะใช้ในงานวิจัย

1.4.3 ออกแบบ จัดเตรียม และสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ผสมวัสดุพ่นีกากกับกากฯ

1.4.4 หาเงื่อนไข และ ทดลองพ่นีกากฯประเภทต่าง ๆ

1.4.5 ทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากพ่นีกากที่ได้

1.4.6 สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

1.5.1 เป็นพื้นฐานความรู้และเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการพ่นีกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมที่มีระดับความแรงรังสีต่ำด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ เพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กากพ่นีกากที่มีคุณสมบัติเหมาะสมและมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมของสถานที่จัดทิ้งกากฯถาวร เป็นการก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการจัดการกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำ

1.5.2 เป็นการนำเอากำมะถันที่เป็นวัสดุพลอยได้ในประเทศจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปูนซีเมนต์มาใช้ให้เกิดประโยชน์

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1.1 P.D. Kalb , P. Colombo , J.H. Heiser และ R. Pietrzak (1991) ^[5] ได้ทำการทดลองพ่นีกากกัมมันตรังสีระดับความแรงรังสีต่ำที่ปนเปื้อนของเสียอันตรายด้วยโมดิไฟด์ซัลเฟอร์ซีเมนต์ (MSC) กากกัมที่ใช้ในการทดลองเป็นกากประเภทเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยจากเตาเผาขยะที่มีองค์ประกอบของสารกัมมันตรังสี และ เกลือของโลหะมีพิษ ก่อนที่จะทำการพ่นีกากกัมได้ขจัดน้ำออกจากกากก่อน จากนั้นจะทำการพ่นีกากกัมโดยการผสมโมดิไฟด์ซัลเฟอร์ซีเมนต์ กากกัมแห้งที่ปราศจากน้ำ และมีการผสม ไฟเบอร์กลาส และ โซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารเติมแต่งลงไปในการผสมแบบ heated double planetary orbital mixer ภายใต้สภาวะสูญญากาศเล็กน้อย (Partial vacuum) โมดิไฟด์ซัลเฟอร์ซีเมนต์จะต้องถูกทำให้มีอุณหภูมิที่ $135 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นค่อยผสมส่วนผสมอื่น ๆ ลงไป ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัม ได้แก่ ความทนทานต่อแรงกด เสถียรภาพทางรังสี การย่อยสลายทางชีวภาพ การจมน้ำในน้ำ เสถียรภาพต่อความร้อน และ สมบัติในการถูกชะล้าง ที่ความทนแรงกดของผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัม 30.5 MPa จะสามารถรับภาระบรรทุกทุกกากกัม ได้สูงสุด 43% โดยน้ำหนักของเถ้าก้นเตาที่ไม่มีโลหะมีพิษเป็นองค์ประกอบ ในส่วนผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัมเถ้าลอยที่มีการปนเปื้อนเกลือของโลหะมีพิษมีบรรจุด้วยเถ้าลอย 43% โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์การทดสอบของ TCLP test สำหรับการถูกชะของแคดเมียม และ ตะกั่ว ซึ่งในผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัมเหล่านี้ได้มีการผสมสารเติมแต่ง ได้แก่ ไฟเบอร์กลาส 0.5% และ โซเดียม ซัลไฟด์ 7% โดยน้ำหนัก ลงไปด้วย

1.1.2 P.D. Kalb , D. Melamed , M. Fuhrmann , J.W. Adams , M. Sapanara และ C. Detello (1977) ^[11] ได้ทำการพัฒนากระบวนการบำบัดปรอทที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีโดยทำการพ่นีกากกัมเหล่านี้ด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ (SPC) ในถังเหล็กขนาด 5 แกลลอน และใช้ paint shaker ของบริษัท Red Devil, Minneapolis, MN ในการก่อให้เกิดการกวนผสม กระบวนการในการพ่นีกากกัมแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การปรับเสถียรภาพ (Stabilization) ของปรอทอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการนี้ประมาณ $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และการพ่นีกากกัม (Solidification) ในกระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิ $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัมที่ได้ประกอบด้วย ปรอท 33 % โดยน้ำหนัก SPC 64 % โดยน้ำหนัก และ สารเติมแต่ง 3 % โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัมที่ทำการทดสอบคือ ความทนทานต่อการถูกชะล้างของปรอทโดย TCLP test ผลปรากฏว่าการบำบัดปรอทด้วยวิธีนี้มีความสามารถลดการถูกชะล้างของปรอทในผลิตภัณฑ์พ่นีกากกัมได้ถึง 100 เท่าเมื่อเทียบกับการถูก

ชะล้างของปรอทที่ไม่ได้บำบัด ซึ่งค่าความเข้มข้นของปรอทที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด และได้ทำการทดลองพ่นกากปรอทที่ปนเปื้อนด้วยสารกำมะถันตรังสีจาก BNL ผลจาก TCLP test ของผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ได้มีค่าความเข้มข้นปรอทเท่ากับ 50 ppb ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ EPA กำหนด

1.1.3 The Department of Energy (DOE) Mixed Waste Focus Areas (MWFA) (1997)^[12] ได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีการพ่นเศษชิ้นโลหะที่มีการเปราะเปื้อนสารกำมะถันตรังสีและกากของเสียอันตรายด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ การทดลองได้ดำเนินการทั้งหมด 2 การทดลอง ขั้นตอนการทดลองทั้งสองการทดลองนั้นกระทำโดยนำเศษชิ้นโลหะใส่ลงในตระแกรงลวดทรงกระบอกที่ถูกแขวนอยู่ในถังเหล็กทรงกระบอกซึ่งมีช่องว่างระหว่างตระแกรงและถังประมาณด้านละ 2 นิ้ว จากนั้นจะทำการเทซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ ที่หลอมเหลวแล้วลงในถังจนท่วมตระแกรงและต่ำกว่าปากถัง 2 นิ้ว การทดลองแรกจะใช้เศษโลหะที่ไม่มีการเปราะเปื้อนสารกำมะถันตรังสี อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ถังและส่วนผสมทั้งหมดคือ 130 °C นาน 5 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ได้เมื่อทำการตัดชิ้นส่วนจะสามารถสังเกตเห็นฟองอากาศในเนื้อของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ ที่ระยะ 2-3 เซนติเมตรจากผิวหน้า ในการทดลองที่สองจะใช้เศษชิ้นโลหะที่มีการเปราะเปื้อนสารกำมะถันตรังสีและกากของเสียอันตรายจริง อุณหภูมิที่ใช้คือ 150 °C ใช้เวลานาน 5 ชั่วโมง ผลที่ได้คือไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น และมีการติดกันอย่างสนิทแนบแน่นระหว่าง เศษโลหะ กับซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์

1.1.4 G. Arnold, E. Franz, P. Colombo, M. Fuhrmann, R. Doty และ P.D. Kalb (1985)^[13] ได้ร่วมกันเขียนรายงานผลการทดลองพ่นกากกำมะถันตรังสีระดับความแรงรังสีต่ำด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ การทดลองนี้เป็นการศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพ่นกากซึ่งจะพิจารณาจากความยากง่ายและความสะดวกในการปฏิบัติงาน รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์กากพ่น ได้แก่ ความทนทานต่อแรงกด, ความทนทานหลังจากผ่านการแช่ในน้ำ, ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการถูกชะล้างของนิวไคลด์รังสี ในการทดลองจะผสมกากกำมะถันตรังสีและวัสดุพ่นกากจะผสมโดยใช้ single-screw extruder และ dual-action mixing vessel อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผสมจะต้องสูงกว่า 119 °C ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ แต่จะต้องไม่เกิน 159.4 °C เนื่องจากทำให้กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันเกิดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ของผสมมีความหนืดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับปริมาณกากสูงสุดที่สามารถถูกพ่นและให้ผลิตภัณฑ์กากพ่นที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม คือ 40% โดยน้ำหนักสำหรับกากประเภทโซเดียมซัลเฟต และ กากประเภทเกลือของกรดบอริก และ 43% โดยน้ำหนักสำหรับกากประเภทที่เฝ้าจากเตาเผาขยะ

1.1.5 G. Ross Darnell ^[14] ได้ใช้ซัลเฟอร์โพสิเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุฉนวนและปรับเสถียรภาพกากกัมมันตรังสีและกากของเสียอันตราย อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมกากและวัสดุฉนวนคือ $127^{\circ}\text{C} - 138^{\circ}\text{C}$ ณ.อุณหภูมินี้จะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์(H_2S) และไอกำมะถัน และยังทำให้ส่วนผสมมีความหนืดที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติงาน ในการทดลองนี้มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักเพื่อเป็นสารต้านการถูกชะล้าง มีผลให้อัตราการถูกชะล้างของปรอท ตะกั่ว โครเมียม และ เงินออกไซด์ ลดลงไป 6 เท่า และอัตราการถูกชะล้างของแบเรียม และ อาร์เซนิก (สารหนู) ลดลงไป 4 เท่า นอกจากนี้ยังได้มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านการซึมผ่านของน้ำ (impermeability) และยังช่วยลดการหลุดรอดออกมาของ SO_2^{6-} ในการทดลองนี้ได้ทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์กากฉนวน ซึ่งค่าความทนทานต่อแรงกดหลังจากผ่านการทดสอบการแช่ในน้ำ (immersion test) ของผลิตภัณฑ์กากฉนวนที่รับภาระบรรทุกกาก 40% โดยน้ำหนัก สำหรับกากประเภทครดบอริกและกากประเภทเถ้า มีค่า 13.8 MPa (1998 psi) และ 44.4 MPa (6435 psi) ตามลำดับ ค่าความทนทานต่อแรงกดหลังจากผ่าน freeze-thaw cycling ก็มีค่าเป็นไปตามที่ U.S Nuclear Regulatory Commission (NRC) กำหนดไว้ ผลิตภัณฑ์กากฉนวนที่มีองค์ประกอบของโคบอลต์-60 และ ซีเซียม-137 จะถูกนำไปทดสอบการชะล้าง 90 วัน ตามมาตรฐานการทดสอบ ANS 16.1 ซึ่งอัตราการถูกชะล้างของของสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในกากประเภทเถ้าจากเตาเผาขยะจะมีค่าต่ำกว่ากากที่ประกอบด้วยเกลือซัลเฟต (high soluble sulfate salt) โดยอัตราการถูกชะล้างนี้มีค่าต่ำกว่า 4 – 8 เท่าของดัชนีการถูกชะล้างต่ำสุด (minimum leach index) ที่กำหนดโดย NRC สำหรับการทดสอบการย่อยสลายโดยชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM G-21 และ ASTM G-22 เป็นไปอย่างประสบผลสำเร็จโดยไม่มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ใด ๆ นอกจากการทดสอบข้างต้นแล้วยังได้นำผลิตภัณฑ์กากฉนวนไปทดสอบฉายรังสีที่ความเข้มรังสี 10^8 rad ตามมาตรฐานของ NRC ซึ่งผลิตภัณฑ์กากฉนวนที่รับภาระบรรทุกกากประเภทตะกั่วออกไซด์ 80% โดยน้ำหนักมีความทนทานแต่แรงกดเพิ่มขึ้น 1000 psi และในระหว่างการฉายรังสีไม่มีก๊าซใด ๆ เกิดขึ้น ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้คือ กากประเภทเรซินให้ผลิตภัณฑ์กากฉนวนที่มีคุณภาพต่ำมาก ซึ่งจะแตกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยภายในเวลาไม่กี่วัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์กากฉนวนนี้ดูดซับความชื้นในอากาศเอาไว้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากกัมมันตรังสีและกากของเสียอันตราย (Radioactive and hazardous waste)

2.1.1 กากกัมมันตรังสี (Radioactive waste)

กากกัมมันตรังสี^[16] หมายถึง ของเสียหรือวัสดุที่ไม่มีการนำมาใช้งานอีกต่อไป โดยกากของเสียเหล่านี้ประกอบหรือประกอบเป็นด้วยสารกัมมันตรังสีในระดับความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีหรือความแรงรังสีสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ว่าเป็น “ระดับปลอดภัย” กากกัมมันตรังสีแตกต่างจากกากของเสียอันตรายทั่วไป เนื่องจากกากกัมมันตรังสีสามารถแผ่รังสี และ/หรือบางกรณีสามารถให้ความร้อนอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีได้ แต่ปริมาณรังสีหรือความร้อนที่แผ่ออกมาจะลดน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป เป็นผลให้ความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีหรือความแรงรังสีมีระดับต่ำกว่าระดับปลอดภัย จึงสามารถกำจัดทิ้งได้เช่นเดียวกับขยะทั่วไป

“ระดับปลอดภัย”^[16] หมายถึง ความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสี หรือ ความแรงรังสีที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายอย่างมีนัยสำคัญต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นกากกัมมันตรังสีจึงจำเป็นต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของกากกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม

2.1.2 ประเภทของกากกัมมันตรังสี^{[6][16]}

เพื่อให้แน่ใจว่า การจัดการและการกำจัดกากกัมมันตรังสีสามารถดำเนินไปได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมตามคุณสมบัติและประเภทของกากฯ จำเป็นต้องมีการจัดประเภทของกากกัมมันตรังสีโดยอาศัยคุณสมบัติของกากและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภท ดังนี้

2.1.2.1 แหล่งกำเนิด หมายถึง สถานที่ปฏิบัติการทางรังสี

2.1.2.2 คุณสมบัติทางรังสี เช่น ค่าครึ่งชีวิต ระดับความร้อนที่เกิดขึ้น ชนิดของรังสีที่ปล่อยออกมา ระดับความแรงรังสี พื้นที่ผิวที่มีการประกอบ

2.1.2.3 คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น สถานะ ขนาดอนุภาค ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการระเหย ความสามารถในการแพร่กระจาย

2.1.2.4 คุณสมบัติทางเคมี เช่น ความเป็นพิษทางเคมี อินทรีย์สาร การเผาไหม้ การเกิดปฏิกิริยา การเกิดก๊าซ การดูดซับของสารกัมมันตรังสี การกักกร่อน

2.1.2.5 คุณสมบัติทางชีวภาพ เช่น ความเป็นพิษทางชีวภาพ

2.1.3 กากกัมมันตรังสีจำแนกตามแหล่งกำเนิด ^[15]

2.1.3.1 กากกัมมันตรังสีจากการทำเหมืองแร่ยูเรเนียม ปริมาณและคุณภาพของกากกัมมันตรังสีจากเหมืองแร่ยูเรเนียมขึ้นอยู่กับแหล่งแร่และกรรมวิธีการผลิต จึงไม่สามารถจะกำหนดลักษณะกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นได้อย่างแน่นอน สำหรับชนิดของสารกัมมันตรังสีที่สำคัญ คือ ก๊าซเรดอนซึ่งมักจะเป็นอันตรายมากในเหมืองปิด วิธีการป้องกันในกรณีนี้คือ การจัดสร้างระบบระบายอากาศที่ดี

2.1.1.2 กากกัมมันตรังสีจากการแต่งแร่ยูเรเนียม ส่วนใหญ่ คือ หางแร่ ซึ่งปนเปื้อนด้วยสารรังสีที่มาจากสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม เช่น Th-234 Th-230 และ Ra-226 กากเหล่านี้จะถูกระบายออกจากบ่อพักและตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อ โดยมีโลหะธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว สารหนู และอื่นๆ กากกัมมันตรังสีชนิดเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นในการแต่งแร่โมนาไซต์ ซึ่งเป็นแร่ที่มีธาตุทอเรียมผสมอยู่

2.1.1.3 กากกัมมันตรังสีจากกระบวนการผลิตยูเรเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องมีการทำละลายสารประกอบยูเรเนียมด้วยกรดซัลฟริก แล้วทำการสกัดด้วยสารประกอบไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tributyl phosphate) ซึ่งจะช่วยให้ได้ยูเรเนียมบริสุทธิ์ ดังนั้นสารกัมมันตรังสีส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปของสารละลาย กัมมันตภาพรังสีในกากนั้นมาจากเรเดียม ยูเรเนียม และผลิตผลจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม เช่น ทอเรียม และ โปรแทกตินีียม

2.1.1.4 กากกัมมันตรังสีจากการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ การสร้างประกอบแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์จะเกี่ยวกับการนำโลหะยูเรเนียมไปทำเป็นโลหะผสมที่มีความทนต่อสภาพต่าง ๆ ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการเชิงกล เช่น การหลอมโลหะ การกลึง การเจาะ และการขัดทำความสะอาด เป็นต้น ดังนั้นกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจึงประกอบด้วยเศษโลหะ สารละลายที่ใช้ทำความสะอาด กระจาย ฝุ่นละออง ซึ่งเศษโลหะจากกระบวนการนี้จะถูกเก็บกลับไปใช้งานใหม่ และกากอื่นๆ นั้นมีระดับความแรงรังสีต่ำมาก

2.1.1.5 กากกัมมันตรังสีจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู การเดินเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เกิดสารกัมมันตรังสีสองพวก คือ ผลิตผลจากการฟิชชัน(Fission product) และผลิตผลแอกติเวชัน(Activation product) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับวัสดุอื่นๆ ในเครื่อง

ปฏิกิริยา โดยปกติผลิตผลจากการฟิชชันจะติดค้างอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงไม่หลุดลอยออกมา สำหรับผลิตผลแอกติเวชันจะปะปนในตัวทำความเย็นและวัสดุโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ สารกัมมันตรังสีสำคัญที่อาจถูกชะล้างออกมากับสารทำความเย็นได้แก่ H-3 , C-14 , Ar-41 , Fe-55 , Co-60 , Ni-63 , Kr-85 , Sr-90 , Y-90 , Zr-93 , Zr-95 , Nb-95 , Tc-99 , Ru-106 , I-129 , I-131 , Xe-133 , Cs-134 , Cs-137 , Ce-141 , Ce-144 , Pm-147 , Sm-151 , Eu-154 , Pb-210 , Rn-222 , Ra-226 , Th-229 , Th-230 , U-234 , U-235 , U-238 , Np-237 , Pu-238 , Pu-239 , Pu-240 , Am-243 , Am-241 และ Cm-242 เป็นต้น

2.1.1.6 กากกัมมันตรังสีจากกระบวนการฟอกกากนิวเคลียร์ เป็นกากกัมมันตรังสีในรูปสารละลายที่มีสารกัมมันตรังสีชนิดผลิตผลฟิชชันความแรงรังสีสูงซึ่งประกอบด้วยธาตุประมาณ 35 ธาตุ และเป็นไอโซโทปรังสีประมาณ 120 ชนิด แต่ส่วนใหญ่เป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นสำหรับผลิตผลฟิชชันที่มีค่าครึ่งชีวิตยาวที่สำคัญคือ Cs-137 มีครึ่งชีวิต 30 ปี Sr-90 มีครึ่งชีวิต 1 ปี และ Ru-106 มีครึ่งชีวิต 1 ปี นอกจากนี้ยังมีสารกัมมันตรังสีทรานสยูเรนิคซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอโซโทปที่มีการปลดปล่อยรังสีแอลฟา และมีค่าครึ่งชีวิตค่อนข้างยาวนาน

2.1.1.7 กากกัมมันตรังสีจากศูนย์วิจัยและสถาบันการศึกษา เป็นกากกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นและมีระดับความแรงรังสีต่ำ แต่มีปริมาณของกากเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง กากกัมมันตรังสีในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกันแต่องค์ประกอบของกากแตกต่างกันขึ้นอยู่กับงานวิจัยหรือโครงการที่ปฏิบัติ เช่น กากของเหลวพวกสารอนินทรีย์ที่มีการปนเปื้อนด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ หรืออาจเป็นสารละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ สำหรับกากของแข็งส่วนใหญ่แล้วจะประกอบด้วย เศษแก้ว เศษพลาสติก ถุงมือ เศษกระดาษ เศษผ้า รวมทั้งวัสดุอุปกรณ์ที่ชำรุด

2.1.1.8 กากกัมมันตรังสีที่มาจากการใช้งานทางการแพทย์ ในทางการแพทย์มีการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ทั้งการตรวจวินิจฉัยและการบำบัดรักษาโรค ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น เช่น Mo-99 มีค่าครึ่งชีวิต 65.94 ชั่วโมง และ Tc-99 มีค่าครึ่งชีวิต 6 ชั่วโมง กากเหล่านี้เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตสั้นจะถูกเก็บและปล่อยให้สลายตัวก่อนที่จะนำไปกำจัดกับกากของเสียอันตรายทางชีวภาพ เช่น เข็มฉีดยา ขยะติดเชื้อ นอกจากนี้ยังมีสารกัมมันตรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นบางตัวที่ถูกนำมาใช้งาน ได้แก่ I-125 , Co-57 , Yb-169 และ Cs-137 ดังนั้นกากกัมมันตรังสีที่เกิดจากการใช้งานทางการแพทย์มีทั้งกากของแข็งและของเหลวขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ใช้

2.1.1.9 กากกัมมันตรังสีจากโรงงานอุตสาหกรรม สารกัมมันตรังสีที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นต้นกำเนิดรังสีที่ปิดผนึก (Sealed source) ซึ่งจะกลายเป็นกากเมื่อระดับความเข้มข้นรังสีลดลงและไม่มีให้นำไปใช้งานแล้ว กากเหล่านี้จะถูกส่งกลับไปยังผู้ผลิต และมีส่วนน้อยที่มีการนำสารกัมมันตรังสีของเหลวและก๊าซซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตสั้นมาใช้ในงานการหารอยรั่วในวัสดุหรือท่อต่าง ๆ การศึกษาพฤติกรรมของสารละลาย เช่น Co-60 , Cs-137 และ Ir-192

2.1.1.10 กากกัมมันตรังสีจากการใช้งานทางการเกษตร สารกัมมันตรังสีที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวติดตาม เช่น ผสมกับยาฆ่าแมลงแล้วฉีดพ่นให้พืชเพื่อตรวจสอบการสะสมของยาฆ่าแมลงในเมล็ดพืช และยังมีการนำประโยชน์ของรังสีมาใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืช ทำหมันแมลงซึ่งทำให้กากที่ได้ส่วนใหญ่เป็นซากพืชและดินที่ใช้ในการทดลองที่มีการเปราะเปื้อนสารกัมมันตรังสี กากเหล่านี้จะมีคุณสมบัติหรือองค์ประกอบเช่นเดียวกับกากกัมมันตรังสีที่เกิดจากศูนย์วิจัยและสถาบันการศึกษา

2.1.4 กากกัมมันตรังสีจำแนกตามระดับความเข้มข้นรังสี^[16]

2.1.4.1 กากกัมมันตรังสีที่ได้รับการยกเว้น(Exempt waste) เป็นกากที่มีระดับความเข้มข้นรังสีเท่ากับ หรือ ต่ำกว่าระดับปลอดภัย (Clearance levels) ซึ่งมีระดับปริมาณรังสีน้อยกว่า 0.01 มิลลิซีเวิร์ต และมีความเข้มข้นระหว่าง $10^{-1} - 10^{-4}$ เบคเคอเรลต่อกรัม

2.1.4.2 กากกัมมันตรังสีระดับความเข้มข้นรังสีต่ำถึงปานกลาง(Low – Intermediate level radioactive waste ; LILW) เป็นกากที่มีระดับความเข้มข้นรังสีสูงเกินกว่าระดับปลอดภัย และความร้อนที่ได้จากการสลายตัวของรังสีมีค่าน้อยกว่า 2 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร

2.1.4.2.1 กากกัมมันตรังสีค่าครึ่งชีวิตสั้น(Short live waste) เป็นกากที่มีค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่า 30 ปี มีความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแอลฟาไม่เกิน 4000 เบคเคอเรลต่อกรัม ในแต่ละหีบห่อ และเฉลี่ยทั้งหมดไม่เกิน 400 เบคเคอเรลต่อกรัมต่อหีบ

2.1.4.2.2 กากกัมมันตรังสีค่าครึ่งชีวิตยาว (Long live waste) เป็นกากที่มีค่าครึ่งชีวิตมากกว่า 30 ปี ความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีมีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ในข้อ 2.1.4.2.1

2.1.4.3 กากกัมมันตรังสีระดับความเข้มข้นรังสีสูง (High level radioactive waste ; HLW) เป็นกากกัมมันตรังสีที่มีความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีค่าครึ่งชีวิตยาวเกินกว่าที่กำหนดไว้ในกากกัมมันตรังสีค่าครึ่งชีวิตสั้น และความร้อนที่ได้จากการสลายตัวของรังสีมีค่ามากกว่า 2 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะเย็นตัวลงในอีกหลายร้อยปี

2.1.5 กากกัมมันตรังสีผสม(Mixed waste) ^{[6][17]}

กากกัมมันตรังสีผสมเป็นกากที่ประกอบด้วยของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสี ดังนั้นกากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำ(Mixed low-level waste) จึงหมายถึง กากกัมมันตรังสีระดับความแรงรังสีต่ำที่มีองค์ประกอบของของเสียอันตรายหรือแสดงออกถึงคุณลักษณะของกากของเสียอันตรายอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง การระบุว่ากากใดเป็นกากกัมมันตรังสีผสมสามารถพิจารณาจากคุณลักษณะของกากหรือกระบวนการที่ทำให้เกิดกากกัมมันตรังสีระดับความแรงรังสีต่ำ สารกัมมันตรังสีและวัตถุอันตรายถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานหลายด้าน เช่น งานวิจัยการแพทย์ทางด้านรังสีวินิจฉัย การพัฒนาเภสัชภัณฑ์รังสีและเทคโนโลยีชีวภาพ งานวิจัยทางการเกษตร เช่น สารกำจัดศัตรูพืช งานวิจัยและทดลองในสถาบันการศึกษา และการปฏิบัติการในโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ สถานปฏิบัติการเหล่านี้จึงเป็นแหล่งกำเนิดกากกัมมันตรังสีผสมที่สำคัญ กากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำสามารถจำแนกตามลักษณะของวัตถุอันตราย ดังนี้

2.1.5.1 ตัวเปล่งแสงวับของเหลว (Liquid scintillation fluids) จากห้องทดลองการตรวจวัดความแรงรังสี

2.1.5.2 น้ำมันที่มีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีจากเครื่องสูบน้ำ อุปกรณ์ต่างๆ และจากการซ่อมบำรุงเครื่องมือ

2.1.5.3 สารอินทรีย์ประเภทคลอรีเนต(Chlorinated) และ ฟลูออรีเนต(Fluorinated) สารคลอรีเนตฟลูออโรคาร์บอน (Chlorinated fluorocarbons ; CFC) และสารจำพวกยาฆ่าแมลง รวมถึงตะกอนสลัดจ์และตัวกรองที่มีถูกปนเปื้อน จากการทำความสะอาด การแช่เย็น การขจัดคราบไขมัน การชำระล้างความเปรอะเปื้อนทางรังสี

2.1.5.4 สารอินทรีย์อื่นๆ ได้แก่ สารทำลาย สารเคมี ผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุ และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่เกิดงานวิจัยและการทดลอง กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม และการทำความสะอาดอุปกรณ์ในห้องทดลองและในกระบวนการการผลิต

2.1.5.5 กากที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว ได้แก่ กัมมันตรังสีที่ทำจากตะกั่ว และสารละลายตะกั่วที่ใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรม

2.1.5.6 กากที่มีการปนเปื้อนปรอท ได้แก่ อุปกรณ์และเศษขยะที่ถูกปนเปื้อนด้วยปรอท

2.1.5.7 กากที่มีการปนเปื้อนโครเมียม ได้แก่ สารละลายที่มีการปนเปื้อนด้วยโครเมียมที่ใช้ในการวิจัย การบำรุงรักษา และการบำบัดกากของเสียด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)

2.1.5.8 กากที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจากการใช้งานด้านการชำระล้างการเปรอะเปื้อนรังสี

2.1.5.9 กากของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ได้แก่ กรดอินทรีย์ สารทำความสะอาดที่มีฤทธิ์เป็นเบสซึ่งได้จากการชำระล้างการเปราะเปื้อนรังสี

2.1.5.10 วัตถุอันตรายอื่นๆ หรือที่มีการปนเปื้อนด้วยวัตถุอันตรายหลายๆ ประเภท

2.1.6 กากของเสียอันตราย (Hazardous waste) ^[18]

กากของเสียอันตราย หมายถึง กากของเสียทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่มีปริมาณความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี หรือมีเชื้อโรค ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการตาย การเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ หรือ ความพิการเพิ่มขึ้น หรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด การจัดเก็บชั่วคราว การขนส่ง และการจัดทิ้งถาวร กากของเสียอันตรายอาจจะเป็นกากที่มีคุณลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง ดังนี้

2.1.6.1 เป็นวัตถุไวไฟ

2.1.6.2 เป็นวัตถุที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

2.1.6.3 เป็นวัตถุระเบิดได้

2.1.6.4 เป็นวัตถุมีพิษ

2.1.6.5 เป็นวัตถุออกซิไดซ์และเปอร์ออกไซด์

2.1.6.6 เป็นวัตถุที่ทำให้เกิดโรค

คุณลักษณะความเป็นพิษของกากของเสียอันตรายจะพิจารณาจากการที่สารประกอบที่มีพิษหรือธาตุโลหะหนักถูกชะล้างลงสู่ น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล ณ.บริเวณฝังกลบกาก สารประกอบ และโลหะหนักมีพิษที่ระบุโดยองค์การคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ United States Environmental Protection Agency (EPA) แสดงดังตารางที่ 2-1

2.2 การจัดการกากกัมมันตรังสี (Radioactive waste management) ^{[16][17]}

การจัดการกากกัมมันตรังสี หมายถึง การดำเนินการใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การปฏิบัติ (Handlihg) การบำบัด(Treatment) การแปรสภาพ(Conditioning) การขนส่ง(Transportation) การจัดเก็บชั่วคราว(Storage) และการจัดทิ้งอย่างถาวร(Disposal) ของกากกัมมันตรังสี เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของกากกัมมันตรังสีในสภาวะแวดล้อมและป้องกันการเปราะเปื้อนทางรังสี ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนโดยทั่วไป

ตารางที่ 2-1 คุณลักษณะความเป็นพิษ , ความเข้มข้นสูงสุดของสารปนเปื้อนอันตรายในสิ่งแวดล้อม^[18]

EPA hazardous Waste number	Contaminant	Max. concentration (mg/l)
D004	Arsenic	5.0
D005	Barium	100.0
D018	Benzene	0.5
D006	Cadmium	1.0
D019	Carbon tetrachloride	0.5
D020	Chlordane	0.03
D021	Chlorobenzene	100.0
D022	Chloroform	6.0
D007	Chromium	5.0
D016	2,4-D	10.0
D027	1,4-Dichlorobenzene	7.5
D028	1,2-Dichloroethane	0.5
D029	1,1-Dichloroethylene	0.7
D030	2,4-Dinitrotoluene	0.13
D012	Endrin	0.02
D031	Heptachlor (and its hydroxide)	0.008
D032	Hexachlorobenzene	0.13
D033	Hexachloro-1,3-butadiene	0.5
D034	Hexachlorotoluene	3.0
D008	Lead	5.0
D013	Lindane	0.4
D009	Mercury	0.2
D014	Methoxychlor	10.0
D035	Methyl ethyl ketone	200.0
D036	Nitrobenzene	2.0
D037	Pentachlorophenol	100.0
D038	Pyridine	5.0
D010	Selenium	1.0
D011	Silver	5.0
D039	Tetrachloroethylene	0.7
D015	Toxaphene	0.5
D040	Trichloroethylene	0.5
D041	2,4,5- Trichlorophenol	400.0
D042	2,4,6- Trichlorophenol	2.0
D017	2,4,5-TP (Silvex)	1.0
D043	Vinyl chloride	0.2

การจัดการกากกัมมันตรังสีที่ดี จำเป็นต้องวางมาตรการความปลอดภัยหรือข้อกำหนดที่จะป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับประชาชนหรือสิ่งแวดล้อมก่อน ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อมีการดำเนินงานที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากไม่มีการวางแผนงานหรือเตรียมการมาก่อน อาจก่อให้เกิดผลเสียหายขึ้นได้ทั้งในปัจจุบันและอนาคต การมีกฎหมายการจัดการกากกัมมันตรังสี รวมไปถึงองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องจะเป็นพื้นฐานสำคัญของการจัดการกากกัมมันตรังสีอย่างปลอดภัย และหลักการพื้นฐานที่สำคัญอีกอย่างคือ “ การก่อกำเนิดกากกัมมันตรังสีจะต้องควบคุมให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ” เพราะนอกจากสามารถลดค่าใช้จ่ายแล้ว ยังลดปริมาณรังสีที่ก่อให้เกิดอันตรายลงได้ แนวคิดเกี่ยวกับการลดกากกัมมันตรังสีให้น้อยลง คือ การลดกากกัมมันตรังสีจากแหล่งกำเนิด การแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่และการใช้ซ้ำ และการบำบัดกากกัมมันตรังสี

2.1.1 การบำบัดกากกัมมันตรังสี (Radioactive Waste Treatment) ^{[6][16]}

การบำบัดกากกัมมันตรังสี เป็นการดำเนินการกิจกรรมใดๆ ที่มีแนวโน้มในการลดปริมาณ แยกวัสดุรังสีออกจากวัสดุไม่มีรังสี และเปลี่ยนองค์ประกอบของกากกัมมันตรังสี โดยทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะทำการแปรสภาพ และการจัดเก็บต่อไป กระบวนการที่นิยมใช้ในการบำบัดกากกัมมันตรังสี ได้แก่ การใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน(Ion-exchange resin) การตกตะกอน(Precipitation) การเผา(Incineration) การกรอง(Filtration) การกลั่น(Distillation) การระเหย(Evaporation) การตกผลึก(Crystallization) การอัด(Compaction) หรือมากกว่าหนึ่งเทคนิครวมกัน การบำบัดกากกัมมันตรังสีทุกวิธีจะมีหลักการร่วมกัน 3 ประการ ดังนี้

2.1.1.1 การทำให้เข้มข้นและเก็บรวบรวม (Concentrate and contain)

2.1.1.2 การทำให้เจือจางและระบายทิ้ง (Dilute and disperse)

2.1.1.3 การเก็บทอระยะเวลาและปล่อยให้กัมมันตภาพรังสีสลายตัว (Delay and decay)

การเลือกวิธีการบำบัดกากกัมมันตรังสีที่เหมาะสมจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด สิ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกวิธีการบำบัด มีดังนี้ คุณสมบัติของกากที่จะนำมาบำบัด ความสามารถทางเทคนิคและค่าใช้จ่ายในการบำบัด คุณสมบัติของกากที่ได้เหมาะสมที่จะนำไปทำการแปรสภาพและจัดเก็บ และผลกระทบของการบำบัดต่อสถานะแวดล้อม

2.1.2 การแปรสภาพกากกัมมันตรังสี (Conditioning) ^{[6][7][16]}

เป็นกระบวนการจัดการกากกัมมันตรังสี และ/หรือ ที่ได้รับการบำบัดมาแล้วให้ถูกผนึกติดแน่นกับวัสดุที่เหมาะสมใดๆ ที่ไม่ใช่สารกัมมันตรังสี ให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์กากผนึก

(Waste form) ที่เหมาะสมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เพื่อป้องกันการแพร่กระจาย (Dispersion) หรือ การเคลื่อนย้าย (Migration) ของนิวไคลด์รังสีออกจากภาหุสิ่งแวดล้อมในระหว่างการบรรจุ ขนส่ง การจัดเก็บ ชั่วคราว รวมทั้งการจัดทิ้งถาวร

การผนึกกากกัมมันตรังสี (Immobilization or Solidification or Encapsulation) เป็นกระบวนการที่ใช้สารหรือวัสดุที่ไม่ใช่สารกัมมันตรังสีผนึกให้นิวไคลด์รังสีติดแน่นในวัสดุอื่น ๆ กากที่จะนำมาผนึกมักจะเป็นกากที่ผ่านการบำบัดมาแล้วและมีสถานะเป็นของแข็ง วัสดุที่นิยมใช้เป็นวัสดุผนึกกาก ได้แก่ ซีเมนต์ บิทูเมนหรือยางมะตอย โพลีเมอร์ แก้วเซรามิก และ หินสังเคราะห์ การเลือกวัสดุผนึกกากขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากกัมมันตรังสี และเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของผลิตภัณฑ์กากผนึกที่จะนำส่งสถานที่ทิ้งกาก คุณสมบัติของวัสดุผนึกกากกัมมันตรังสีควรมีดังนี้

- (1) สามารถเข้ากันได้กับกากที่จะนำมาผนึก
- (2) มีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน
- (3) มีความสามารถในการละลายหรือถูกชะล้างได้ต่ำ
- (4) ป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี
- (5) มีความแข็งแรงเชิงกลสูง
- (6) ทนต่อกรดและด่าง
- (7) ทนต่อความร้อนได้ดี
- (8) มีความเสถียรภาพตลอดระยะเวลาการจัดเก็บ
- (9) ง่ายในการปฏิบัติงาน

เกณฑ์การทดสอบความคงทนหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากผนึกที่กำหนดโดย Nuclear Regulatory Commission (USNRC) สำหรับกากกัมมันตรังสี และที่กำหนดโดย U.S. Environmental Protection Agency (EPA) สำหรับของเสียอันตราย ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันได้แก่

- (1) ความทนทานต่อแรงกด (Compressive strength)
- (2) ความทนทานต่อความร้อน (Thermal stability)
- (3) ความทนทานต่อรังสี (Radiation stability)
- (4) ความทนทานต่อการแตกสลายทางชีวภาพ (Biodegradation resistance)
- (5) การทดสอบการถูกชะล้าง (Leach testing)
- (6) การทดสอบความแข็งแรงหลังจากการแช่ในน้ำ (Immersion testing)

กระบวนการผนึกกากแต่ละวิธีจะมีข้อดี ข้อเสีย และความเหมาะสมกับกากแต่ละประเภทแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2-2 การพิจารณาเลือกใช้กระบวนการใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของกาก และเหตุผลทางเศรษฐกิจของการจัดการกากนั้น ๆ

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการพ่นีกากกัมมันตรังสีแบบต่าง ๆ ^{[4][6][19]}

ข้อดี	ข้อเสีย
การพ่นีกากด้วยซีเมนต์	
(1) วัสดุที่ใช้ราคาถูก และ หาได้ง่าย	(1) ของเสียสุดท้ายที่ได้จะมีน้ำหนักและปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัดกาก
(2) เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไม่ยุ่งยากสลับซับซ้อน	(2) ผลกระทบกากพ่นึกที่ได้อาจไม่ทนทานต่อการถูกระล้าง
(3) ไม่มีส่วนผสมของสารเคมีอันตราย	(3) สามารถถูกทำลายได้ด้วยความร้อนและความเป็นกรดเป็นด่าง
(4) มีความหลากหลายของสูตรผสม	(4) อาจเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้โลหะหนักถูกระล้างออกมา
(5) สามารถใช้บำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ เช่น น้ำมัน	(5) ไม่เหมาะกับกากที่มีเกลือ และ/หรือสารละลายอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากไปขัดขวางการแข็งตัวของซีเมนต์ เช่น Chloride salt และ Zinc chloride เมื่อเจอความชื้นจะก่อให้เกิดสถานะที่มีฤทธิ์เป็นกรด และจะไปขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างวัสดุพ่นีกาก กับ กาก นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของสิ่งปนเปื้อนเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์กากพ่นึกสามารถรับภาระบรรทุกกาก น้อย
(6) เหมาะกับกากที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือ กากเปียก(Wet waste)	(6) ในระหว่างการฉายรังสีอาจก่อให้เกิดก๊าซกัมมันตรังสีได้
(7) ผลกระทบกากพ่นึกที่ได้มีความเสถียรภาพทางรังสีสูง จึงเหมาะที่จะเป็นวัสดุกำบังด้วยตัวเอง	(7) คุณสมบัติทางเคมีของกากมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพ่นึกเป็นอย่างมาก
(8) ผลกระทบกากพ่นึกที่ได้มีความทนทานต่อแรงกด อุณหภูมิ และไม่ติดไฟ	
(9) สามารถเคลื่อนย้ายด้วยพลาสติกไซเซออร์ เช่น อะคริลิก เพื่อลดการถูกระล้าง	

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการพ่นีกากกัมมันตรังสีแบบต่าง ๆ (ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
การพ่นีกากด้วยบิโทเมน	
(1) วัสดุที่ใช้ราคาถูก และ หาได้ง่าย	(1) มีความยุ่งยากในการดำเนินงาน
(2) เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อน ดังนั้น น้ำในกากฯจะถูกกำจัดไป ทำให้ ปริมาตรของกากลดลง	(2) อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ มีความยุ่งยากสลับซับซ้อนเมื่อเทียบกับระบบซีเมนต์
(3) สามารถเข้าได้ดีกับกากประเภท ตะกอนสลัดจ์ กากตะกอนจากการระเหยแห้ง และ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน	(3) ตัวบิโทเมนเองสามารถติดไฟได้ ดังนั้น ต้องใช้ความระมัดระวังในการพ่นีกาก
(4) ผลกระทบกากพ่นีกที่ได้มีความสามารถในการถูกชะล้างได้ต่ำ	(4) ผลกระทบกากพ่นีกขาดความเสถียรทางมิติเมื่อถูกอบด้วยรังสี
การพ่นีกากฯ ด้วยวัสดุโพลีเมอร์ (Epoxy , Polyethylene)	
(1) เหมาะกับกากที่มีสารละลายอินทรีย์ หรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบ	(1) วัสดุราคาแพง มีส่วนผสมที่เป็นสารเคมีอันตราย
(2) เกิดการแข็งตัวได้เร็วเมื่อเทียบกับซีเมนต์	(2) เครื่องมือมีความสลับซับซ้อนเมื่อเทียบกับระบบซีเมนต์
(3) กากสุดท้ายที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย	(3) ต้องใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนในกระบวนการ
(4) ผลกระทบกากพ่นีกที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง สามารถทนต่อแรงกระแทก และแรงดันได้เป็นอย่างดี	(4) ผลกระทบกากพ่นีกไม่ทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ
(5) ผลกระทบกากพ่นีกมีความทนทานการถูกชะล้างต่ำ	(5) ผลกระทบกากพ่นีกถูกทำลายได้ด้วยแสง UV
	(6) ไม่เหมาะกับกากที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการพ่นกากกัมมันตรังสีแบบต่าง ๆ (ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
พ่นกากด้วยซัลเฟอร์โพลิเมอร์	
<p>(1) สามารถพ่นกากที่มีเกลือในระดับความเข้มข้นสูง</p> <p>(2) สามารถรับภาระบรรทุกกากที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้ในปริมาณมาก โดยผลิตภัณฑ์กากพ่นยังคงมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด</p> <p>(3) กำมะถันที่เป็นองค์ประกอบจะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนของโลหะซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลาย ดังนั้นจึงลดการถูกระบายของโลหะหนักมิพิษได้</p> <p>(4) มีข้อจำกัดในแง่ของขนาดอนุภาคของกากฯ น้อยกว่า โพลีเอทีลีน</p> <p>(5) ปริมาตรกากสุดท้ายเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับซีเมนต์</p> <p>(6) การแข็งตัวของผลิตภัณฑ์กากพ่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่ต้องอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมี</p> <p>(7) มีความต้านทานต่อการถูกระบายของสารกัมมันตรังสีสูง</p> <p>(8) มีความต้านทานต่อการซึมผ่านได้สูงเนื่องจากความพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์กากพ่นไม่ต่อกัน</p> <p>(9) มีความทนทานต่อสารเคมีหลายชนิดไม่เกิดการแตกสลายทางชีวภาพโดยแบคทีเรีย แต่ธาตุกำมะถันสามารถถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรีย</p>	<p>(1) เป็นวัสดุที่มีราคาปานกลาง-แพง</p> <p>(2) อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ มีความยุ่งยากสลับซับซ้อนเมื่อเทียบกับระบบซีเมนต์</p> <p>(3) ต้องใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนในกระบวนการ</p> <p>(4) ไม่สามารถเข้ากันได้กับกากบางประเภท ได้แก่</p> <ul style="list-style-type: none"> ● สารที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่มีความเข้มข้นสูง เช่น สารประกอบไนเตรต ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ไม่มีความทนทานและขาดเสถียรภาพ ● เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ยังไม่อิ่มตัว จะให้ผลิตภัณฑ์กากพ่นที่เกิดการสึกกร่อนหรือการแยกตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการขยายตัวของเม็ดเรซิน ● สารประกอบที่มีความสามารถละลายน้ำได้สูง ● กากที่มีความเป็นด่างสูง และ กากพวกสารประกอบฟีนอล ● กากที่เกิดความร้อนได้เองจนมีอุณหภูมิ 100° C

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการพ่นกากกัมมันตรังสีแบบต่าง ๆ (ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
พ่นกากด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (ต่อ)	
(10) ไม่เกิดก๊าซกัมมันตรังสีในระหว่างการฉายรังสีเพื่อทดสอบความทนทานต่อรังสี	(5) กากที่นำมาพ่นต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ควรมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 1% โดยน้ำหนักของกาก
(11) ไม่จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดหรือล้างอุปกรณ์และถึงกวนผสม เพราะซัลเฟอร์โพลีเมอร์สามารถถูกหลอมและนำมาใช้ใหม่โดยที่คุณภาพและคุณสมบัติไม่เสียไป	(6) ควรมีชุดดักจับก๊าซเพื่อป้องกันการหลุดรอดของก๊าซ H_2S และก๊าซ SO_2 ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการพ่นกาก
(12) คุณสมบัติทางเคมีของกากไม่ค่อยมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพ่น	ผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ได้อาจเสียรูปทรงเมื่อได้รับความร้อนเกินกว่า $88^\circ C$

2.3 ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (Sulfur polymer ; SP) ^{[5][19]}

กำมะถันเป็นของแข็งสีเหลืองอ่อน เพราะ ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ และเป็นธาตุที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสามารถรวมตัวกับธาตุชนิดอื่น ๆ เกิดเป็นสารประกอบ ยกเว้น ทอง ทองคำขาว และ ธาตุที่อยู่ในสถานะก๊าซ กำมะถันปรากฏอยู่ในหลายอัญรูป (Allotropic forms) เช่น กำมะถัน ромบิก (Rhombic form) กำมะถัน โมโนคลินิก (Monoclinic form) กำมะถันโพลีเมอร์ (Polymeric form) และกำมะถันอสัณฐาน (Amorphous form) แต่ละอัญรูปของกำมะถันมีความสามารถในการละลาย ความถ่วงจำเพาะ จุดหลอมเหลว รูปร่างและการเรียงตัวของผลึก และ คุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ แตกต่างกันไป คุณสมบัติของกำมะถันจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ การที่คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปแสดงว่าโครงสร้างของมันก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นการที่กำมะถันจะมีอัญรูปชนิดใดก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ

กำมะถันที่พบโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของกำมะถัน ромบิก โมเลกุลของกำมะถัน ромบิก และกำมะถัน โมโนคลินิกประกอบด้วยอะตอมของกำมะถัน 8 อะตอม ยึดกันอย่างแข็งแรงเป็นรูปแปดเหลี่ยมด้านเท่าจึงทำให้กำมะถันเป็นของแข็งที่ภาวะปกติเพราะน้ำหนักโมเลกุลของมันสูงมากคือ 256.50 amu ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $95.5^\circ C$ กำมะถันจะอยู่ในรูปของกำมะถัน ромบิกซึ่งมีโครงสร้าง

ผลึกแบบอโรธโรมบิก (Orthorhombic or α -Sulfur) เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 95.5°C ถึง 118.9°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการหลอมเหลว โครงสร้างของกำมะถันอโรธโรมบิกก็จะเปลี่ยนไปเป็นกำมะถันโมโนคลินิก (β -Sulfur) การเปลี่ยนแปลงอัญรูปนี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความแข็งแรงที่ยังคงมีอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ท้ายสุด เมื่อกำมะถันอโรธโรมบิกถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงถึง 160°C และถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โครงสร้างแปลเคียมของกำมะถันอโรธโรมบิกจะเปิดออกและกำมะถันแต่ละอะตอมจะมาต่อกันเป็นโครงสร้างแบบสายโซ่ยาว เรียกกำมะถันรูปแบบนี้ว่ากำมะถันโพลีเมอร์ โดยมีความสมบัติคล้ายยางซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดี แต่กำมะถันในอัญรูปที่กล่าวถึงข้างต้นเมื่อปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องมันก็จะมีความสมบัติจะเปลี่ยนอัญรูปกลับไปเป็นกำมะถันอโรธโรมบิกเหมือนเดิม สำหรับอัญรูปสุดท้ายที่จะกล่าวถึงก็คือกำมะถันอสัญฐาน (Amorphous form) ซึ่งจะมีสีดำ โมเลกุลจะอยู่กันอย่างระเกะระกะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลมีความยาวมาก การเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบนี้เองทำให้โครงสร้างของกำมะถันอสัญฐานไม่เป็นผลึก หรืออาจจะผลึกขนาดใหญ่

กำมะถันมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 112.8°C (Rhombic form) ถึง 120°C (Amorphous form) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.96 , 2.046 และ 2.07 สำหรับกำมะถันโมโนคลินิก กำมะถันอสัญฐาน และกำมะถันอโรธโรมบิก ตามลำดับ และกำมะถันทุกอัญรูปจะมีจุดเดือดที่ 444.7°C

เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ของกำมะถัน (Elemental sulfur) ก่อนศตวรรษที่ 20 จึงได้มีการนำซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (Sulfur polymer) มาผสมกับคอนกรีต เรียกว่าซัลเฟอร์คอนกรีต เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในอุตสาหกรรมเคมี แต่ก็ประสบความล้มเหลวเพราะในระหว่างการแข็งตัว กำมะถันที่เป็นองค์ประกอบหลักในซัลเฟอร์คอนกรีต จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) เป็นผลให้เกิดความเครียดสูงภายในผลิตภัณฑ์ (Internal Stress) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเปราะและเกิดการแตกร้าวขึ้น^[9]

เพื่อเป็นการนำกำมะถันซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้หรือเป็นกากของเสียจากการสกัดก๊าซธรรมชาติและปิโตรเลียมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาประยุกต์ใช้ในงานวัสดุก่อสร้าง จึงได้พยายามที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติของซัลเฟอร์คอนกรีต ให้มีความทนทานเพิ่มขึ้น โดยได้ทำการเติมสารดัดแปรสมบัติ (Modifier) ประเภทสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวผสมลงในกำมะถันผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ความทนทานของผลิตภัณฑ์นี้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงได้มีการผลิตออกจำหน่ายภายใต้ลิขสิทธิ์ของ U.S. Bureau of Mines (USBM) มีชื่อทางการค้าว่า “CHEMENT 2000”

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านซัลเฟอร์คอนกรีต ที่ใช้กันในเชิงพาณิชย์แบ่งได้ 2 ประเภท ทั้ง 2 ประเภทอาศัยการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ระหว่างสาร Cyclopentadiene-type hydrocarbons กับกำมะถัน (Elemental sulfur) แต่อาศัยกระบวนการแตกต่างกันในการผลิตซัลเฟอร์คอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ประเภทที่1** เป็นซัลเฟอร์คอนกรีตที่ใช้ “ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (Sulfur polymer; SP)” ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Dicyclopentadien (DCPD) และ Oligomer of cyclopentadiene (CPD) กับ กำมะถัน ได้มีการผลิตซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ออกจำหน่ายโดยบริษัท Martin Resources Inc. ภายใต้ลิขสิทธิ์ของ U.S. Bureau of Mines (USBM) มีชื่อทางการค้าว่า “CHEMENT 2000” ซึ่งมีส่วนผสม ได้แก่ Elemental Sulfur 95%โดยน้ำหนัก, Dicyclopentadien 2.5%โดยน้ำหนัก และ Oligomer of cyclopentadiene 2.5%โดยน้ำหนัก
- ประเภทที่2** เป็นซัลเฟอร์คอนกรีตที่ใช้ “ซัลเฟอร์โมดิไฟเคอร์ (Sulfur modifier; SM)” ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Oligomeric polymer of cyclopentadiene กับ กำมะถัน ซัลเฟอร์โมดิไฟเคอร์ จะถูกผสมกับกำมะถันในระหว่างขั้นตอนการผลิตซัลเฟอร์ คอนกรีต.

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ SP และ SM ^[20]

คุณสมบัติ	SP	SM
กำมะถัน, %โดยน้ำหนัก	95.0 ± 1.0	80.0 ± 2.0
คาร์บอน, %โดยน้ำหนัก	5.0 ± 0.5	18.0 ± 1.0
ไฮโดรเจน, %โดยน้ำหนัก	0.5 ± 0.05	2.0 ± 0.1
ความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 25 °C	1.90 ± 0.02	1.71 ± 0.02
ความหนืด, cP ที่อุณหภูมิ 135 °C	25 ถึง 100	35 ถึง 100

2.1.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของซัลเฟอร์โพลีเมอร์

ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (Sulfur polymer; SP) หรือ ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ซีเมนต์ (Sulfur polymer cement; SPC) หรือ โมดิไฟด์ซัลเฟอร์ซีเมนต์ (Modified sulfur cement; MSC) มีความเกี่ยวข้องกับวัสดุซีเมนต์แบบดั้งเดิมเพียงชื่อเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วซัลเฟอร์โพลีเมอร์เป็นผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของธาตุกำมะถันกับสารคัดแปรสมบัติ (Modifier) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical integrity) และความคงทนในระยะยาว (Long-term durability) ได้แก่ Dicyclopentadiene (DCPD) และ/หรือ Oligomer of Cyclopentadiene (CPD) ^[5]

ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ เป็นวัสดุโพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic material) มีจุดหลอมเหลว (120 °C) และ มีความหนืด ต่ำ (25 centipoise) โดยสามารถหลอมเหลวได้ดีที่สุดที่

อุณหภูมิ $135 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ในสถานะที่เป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด เมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัวได้อีก การหลอมเหลวและการเย็นตัวนี้สามารถเกิดซ้ำไปซ้ำมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนไป จึงสามารถนำมาหลอมหรือนำมาขึ้นรูปใหม่ให้มีลักษณะรูปร่างต่าง ๆ ที่เหมาะสม^[19]

นอกจากนี้ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่น่าสนใจ เช่น การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงเชิงกลในระยะเวลาเพียงสั้น ๆ มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ เนื้อวัสดุมีความพรุนน้อย^[19] และที่สำคัญคือกัมมันต์ที่เป็นองค์ประกอบสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนของโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำและมีความเสถียรภาพ จากคุณลักษณะที่ดีเหล่านี้จึงทำให้ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผนึกกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ กากของเสียอันตราย และกากกัมมันตรังสีผสมระดับความแรงรังสีต่ำ

การผสมกากกัมมันตรังสีกับซัลเฟอร์โพลีเมอร์ สามารถทำได้โดยใช้เครื่องผสมที่มีการให้ความร้อนอย่างง่าย (Simple heated stirred mixer) ของผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture) และเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการแข็งตัวและได้ผลิตภัณฑ์กากกัมมันตรังสีที่มีลักษณะเป็นของแข็งก้อนเดียว (Monolith)

2.1.2 การเตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์^[5]

ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ สามารถถูกเตรียมได้จากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของกัมมันต์, Dicyclopentadiene และ Oligomer of Cyclopentadiene ซึ่ง ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่ได้มีชื่อทางการค้าว่า CHEMENT2000 โดยปกติแล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นโดยปราศจากตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามสามารถใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น Vinyltoluene Styrene หรือ Indend ad gamma-methylstyrene เป็นตัวทำละลายได้ การเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างกัมมันต์กับ Cyclopentadiene dimer จะต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวังเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน(Exothermic reaction) โดยจะมีการคายความร้อนออกมาในระดับที่สูงมาก

Cyclopentadiene สามารถหาซื้อได้ทั่วไปซึ่งจะอยู่ในรูปของ Liquid cyclopentadiene dimer จะเกิดการแตกตัว(Depolymerization)ไปเป็นโมโนเมอร์(Monomer) ซึ่งจะเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาการแตกตัวนี้สามารถถูกเร่งให้เกิดเมื่อ cyclopentadiene dimer ผสมอยู่กับกัมมันต์เหลว ณ.อุณหภูมิ $120^{\circ}\text{C} - 140^{\circ}\text{C}$

การเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างกัมมันต์กับ Cyclopentadiene dimer ที่จะเกิดเป็น ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ปฏิกิริยาขั้นแรกนั้น Dimer จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดเป็น Polysulfide-cyclopentadiene product ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้จะมีการคายความร้อนออกมาสูงมาก

ปฏิกิริยาขั้นต่อมา Dimer จะทำปฏิกิริยากับ Polysulfide-cyclopentadiene product ที่เกิดขึ้นจากในขั้นแรก ความร้อนที่คายออกมาของปฏิกิริยานี้จะน้อยกว่าในปฏิกิริยาแรก ซึ่งความร้อนรวมที่คายออกมาของปฏิกิริยาทั้งสอง ถือได้ว่าเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา และมีผลทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่สำคัญยังทำให้เกิดการฟอร์มตัวของสารโพลีเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยางที่มีความหนืดสูง (Highly viscous rubber) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ถ้ามีการควบคุมปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมจะได้สารโพลีเมอร์ที่อยู่ในรูปของ Linear polymeric polysulfide มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นยาวๆ หรือ เป็นสายเดี่ยวๆ คุณลักษณะนี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความทนทาน

การควบคุมปฏิกิริยาการคายความร้อนดังกล่าว สามารถทำได้โดยเติม Oligomer of Cyclopentadiene ลงไปในส่วนผสมตั้งแต่เริ่มแรกของปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นกลายเป็นปฏิกิริยา Non-exothermic reaction อย่างสมบูรณ์ ปรากฏการณ์นี้เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Sulfur-cyclopentadien adduct กับ Oligomer ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เองและมีการคายความร้อนออกมาต่ำมาก ๆ เพราะ Oligomer จะค่อยๆ สลายตัว (Breaks down) ไปสู่สถานะสุดท้ายของ Dicyclopentadiene สรุปได้ว่า Oligomer ถูกเติมลงไปในปฏิกิริยาเพื่อลดความรุนแรงของปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างกำมะถันกับ Cyclopentadiene

ปริมาณกำมะถันและ Cyclopentadien reactants ที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลผลิตของ Linear polymeric polysulfide โดยมีจะต้องมีส่วนผสมของกำมะถัน 55 – 98 % โดยน้ำหนัก ต่อ Oligomer dicyclopentadiene mixture 45 – 2 % โดยน้ำหนัก

ใน Oligomer dicyclopentadiene mixture นั้นจะต้องมีส่วนของ Dicyclopentadien ต่อ Oligomer อยู่ในช่วง 90% โดยน้ำหนักของ Dicyclopentadien ต่อ 10% โดยน้ำหนักของ Oligomer ถึง 0% โดยน้ำหนักของ Dicyclopentadien ต่อ 100% โดยน้ำหนักของ Oligomer อุณหภูมิ และ ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการโพลีเมอร์ไรเซชันได้อย่างสมบูรณ์ คือ 120° C – 160° C และ 1 – 5 ชั่วโมง ตามลำดับ

แต่ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (CHEMENT2000) ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นนี้ เมื่อนำไปผสมกับส่วนผสมของคอนกรีต (Aggregate) เป็นผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์คอนกรีต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะคงสภาพที่ดีอยู่ได้เพียง 2 – 3 ปี ก็จะเสื่อมสภาพลง เป็นผลมาจากการที่กำมะถันซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal cycling) ขึ้น กำมะถันก็จะเริ่มเกิดการตกผลึก (Crystallizing) เป็นผลึกกำมะถันขนาดใหญ่ (Macrocrystals) ทำให้ซัลเฟอร์คอนกรีตมีรอยแยกในแนวระนาบและเกิดการแตกออก^[9]

ปัจจุบัน CHEMENT2000 ได้ยกเลิกการผลิตไปแล้วเนื่องจากมีข้อเสียข้างต้น ในขณะที่เดียวกันบริษัท STARcrete Technologies Inc. ประเทศแคนาดา ได้ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์สารดัดแปรสมบัติเชิงกลของกำมะถัน (Sulfur modifier) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated hydrocarbon) เพื่อใช้ในการผลิตซัลเฟอร์โพลีเมอร์ โดยผลิตและจัดจำหน่ายภายใต้ชื่อทางการค้าว่า “ STX™ ” ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่เตรียมได้จาก STX™ จะมีคุณสมบัติดีกว่า CHEMENT2000 คือ ช่วยป้องกันการเกิดขึ้นของผลึกกำมะถันขนาดใหญ่ (Macro sulfur crystals) โดยจะทำให้กำมะถันตกผลึกเป็นผลึกขนาดเล็กของกำมะถัน ромบิก (Orthorhombic sulfur) ซึ่งเป็นอีกรูปเดียวของกำมะถันที่สามารถทนต่อความร้อนได้^[9] ตารางที่ 2-4 แสดงถึงคุณลักษณะทั่วไปของ CHEMENT2000 และ STX™

ตารางที่ 2-4 คุณลักษณะทั่วไปของ CHEMENT2000 และ STX™

	CHEMENT2000 ^[23]	STX ^[22]
ชื่อโดยทั่วไป	Modified Sulfur Cement	Modified Elemental Sulfur
ลักษณะ	ของแข็งเป็นผงสีเทา - สีน้ำตาล	ของแข็งเป็นผงและก้อนสีน้ำตาล
ความถ่วงจำเพาะ	2.07	1.73
องค์ประกอบอันตราย	Sulfur 94 – 96%	Sulfur/hydrocarbon polymer
จุดหลอมเหลว	119 °C	120 °C
จุดเดือด	444 °C	n/a
อุณหภูมิที่เกิดประกายไฟได้เอง	255 °C	240 °C

ซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะเกิดการเผาไหม้เมื่อเจอกับเปลวไฟหรือประกายไฟ และจะเกิดการเผาไหม้หรือเกิดประกายไฟขึ้นได้เองที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังแสดงในตารางที่ 2-4 อย่างไรก็ตามเมื่อนำซัลเฟอร์โพลีเมอร์ไปทดสอบตามเกณฑ์ของ US Department of Transportation regulation ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ไม่ถูกจัดว่าเป็นวัสดุที่สามารถติดไฟได้ (Flamable material)

ข้อควรระวังเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม STX Modifier กำมะถัน และวัสดุอื่นๆ คืออุณหภูมิที่ใช้ควรอยู่ระหว่าง 135 °C – 145 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา และจะต้องไม่เกิน 150 °C เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของ STX Modifier ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสลายตัวของพันธะเคมีใน STX Modifier^{[9][21]} นอกจากนี้วัสดุที่นำมาผสมกับ STX™ หรือ ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ชนิดอื่นๆ ไม่ควรมีคุณสมบัติเป็นหรือคล้ายดินเหนียว (Clay) ซึ่งมี

ความสามารถในการซึมซับอุณหภูมิดีได้เพราะจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แข็งแรงและไม่ทนทาน เป็นเหตุมาจากในระหว่างการผสมซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนดินเหนียวจะถูกทำให้แห้งและเกิดการหดตัว และมันจะเกิดการขยายตัวอีกครั้งเมื่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปสัมผัสกับน้ำและเกิดการซึมซับน้ำเอาไว้ เป็นผลให้ดินเหนียวเกิดการขยายตัวและผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดการแตก¹⁹⁾

2.1.3 การฉีกกาก ด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์

การฉีกกากด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์เป็นกระบวนการทางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic process) ที่สามารถใช้ในการฉีกกากของเสียประเภทกากของเสียอันตราย (Hazardous waste) กากกัมมันตรังสี (Radioactive waste) และ กากกัมมันตรังสีผสม (Mixed waste) ได้ทั้งวิธี Microencapsulation และ วิธี Macroencapsulation

2.1.1.1 Microencapsulation เป็นวิธีการที่ใช้ฉีกกากประเภทสัจจจากระบบบำบัดน้ำเสีย เถ้าจากเตาเผาขยะ ตะกอนจากการตกตะกอนเคมี และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยจะผสมกากกับซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ที่หลอมเหลวจนกลายเป็นของผสมเนื้อเดียวกัน (Homogeneous mixture) ของผสมจะถูกเทลงในภาชนะบรรจุที่เป็นรูปทรงกระบอกหรือลูกบาศก์ ปล่อยให้เย็นตัวซึ่งของผสมจะเกิดการแข็งตัวและบ่มตัวได้ผลิตภัณฑ์กากฉีกที่มีลักษณะเป็นของแข็งก้อนเดียว (Solid monolithic) ในการบ่มตัว (Cure) ของผลิตภัณฑ์กากฉีกนี้ไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีที่จะเหนียวน้ำ (Curing reaction) ให้เกิดการแข็งตัว สำหรับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการผสมกากกับซัลเฟอร์โพลีเมอร์สามารถใช้ทั้งเครื่องฉีดพลาสติกฉีดพลาสติก (Single Screw Extruder) และเครื่องกวนผสมแบบใบพัดกวน (Mixer) แบบที่ใช้ใบพัดกวนผสม แต่เนื่องจากในระหว่างหลอมและกวนผสมโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก ส่วนผสมที่ได้มีความหนืดต่ำจึงไปขัดขวางความสามารถในการผสมของสกรู ทำให้ผลิตภัณฑ์กากฉีกที่ได้จากการผสมโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกสามารถรับภาระบรรทุกกากได้ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2-5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-5 เปรียบเทียบภาระบรรทุกทุกกาศสูงสุด (Maximum waste loading) ของผลิตภัณฑ์กากฉนีกด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ระหว่างการผสมด้วยเครื่องฉีดพลาสติกและเครื่องผสมแบบใบพัดกวน^[19]

ประเภทของกาก	ภาระบรรทุกทุกกาศสูงสุด ผสมโดยเครื่องฉีดพลาสติก % โดยน้ำหนัก	ภาระบรรทุกทุกกาศสูงสุด ผสมโดยเครื่องผสมแบบใบพัดกวน % โดยน้ำหนัก
โซเดียมซัลเฟต	65	80
กรดบอริก	40	57
ซีเมนต์	20	43
เรซินแลกเปลี่ยนไอออน	40	ไม่เหมาะสม

2.1.1.2 Macroencapsulation เป็นวิธีการที่ใช้ฉนีกกากประเภทเศษชิ้นส่วนโลหะที่มีการเปราะเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีและ/หรือของเสียอันตราย กระบวนการนี้ไม่ต้องทำการกวนผสมเศษชิ้นส่วนโลหะกับซัลเฟอร์โพลีเมอร์ แต่จะนำเศษชิ้นส่วนโลหะใส่ลงในตระแกรงลวดทรงกระบอกที่ถูกแขวนอยู่ในถังเหล็กทรงกระบอกซึ่งมีช่องว่างระหว่างตะแกรงและถังในระยະที่พอเหมาะ จากนั้นจะทำการเทซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ที่หลอมเหลวแล้วลงในถังจนท่วมตะแกรง หลังจากให้ความร้อนแก่ถังที่มีส่วนผสมต่าง ๆ นานพอสมควรแล้ว ก็จะปล่อยให้เย็นตัวลง ได้เป็นผลิตภัณฑ์กากฉนีก^[12]

2.1.1.3 สารเติมแต่ง (Additives) เป็นวัสดุที่ถูกเติมลงไปโพลีเมอร์ด้วยปริมาณที่น้อยเพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของโพลีเมอร์ให้เหมาะสม โดยสารเติมแต่งจะกระจายอยู่ในเนื้อของโพลีเมอร์ในทางกายภาพเท่านั้น จะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญๆ^[24] ดังนั้นในกระบวนการฉนีกกากด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์จึงมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงไปเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกากฉนีกให้ดียิ่งขึ้น

สารเติมแต่งที่มีการนำมาใช้ในกระบวนการการฉนีกกากกัมมันตรังสีที่มีปนเปื้อนของเสียอันตรายด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ได้แก่

2.3.4.1.1 สารเสริมความแข็งแรง (Strength enhancing agent) เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกดและแรงดึง และช่วยป้องกันการเกิดการแตกร้าวของผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่ได้ ส่วนใหญ่สารพวกนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นใย คือ คาร์บอนไฟเบอร์ สติลไฟเบอร์ กลาสไฟเบอร์ หรืออาจใช้ทั้งสามอย่างรวมกัน การเติมสารเสริมความแข็งแรงจะต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ของผสมไม่เกิดการจับกันเป็นก้อน (Clumping) ถ้าเติมสารเสริมความแข็งแรงใน

ปริมาณที่น้อยเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์กากผนังที่ได้ไม่มีความแข็งแรงและจะถูกทำลายได้ในระหว่างการขนส่งและการจัดตั้งภาชนะบรรจุ แต่ถ้าหากมีการเติมสารเสริมความแข็งแรงในปริมาณที่มากเกินไป ของผสมอาจจะนำมาใช้งานต่อไปไม่ได้ ปริมาณสารเสริมความแข็งแรงที่เหมาะสมที่จะเติมลงไป คือ 0.1% โดยน้ำหนัก – 10 % โดยน้ำหนัก

2.3.4.1.2 สารต้านการถูกชะล้าง (Dry anti-leaching agent) เป็นสารที่ช่วยลดความสามารถในการละลายหรือการถูกชะล้างของโลหะหนักมีพิษในผลิตภัณฑ์กากผนัง โดยจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักมีพิษเกิดเป็นตะกอนที่มีความเสถียรภาพและไม่ละลายน้ำ สารต้านการถูกชะล้าง ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมซิลไฟด์ หรืออาจใช้สารทั้งสามอย่างร่วมกัน ปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำการเติมลงไป คือ 1.0 % โดยน้ำหนัก – 20.0 % โดยน้ำหนัก ^[5]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 ซัลเฟอร์โมดิฟายเออร์ STX™ บริษัท STARcrete Technologies Inc.
- 3.1.2 กำมะถันชนิดผง, Industrial Grade
- 3.1.3 ตะกอนสลัดจ์ที่ปนเปื้อนโลหะหนักของบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำกัด (มหาชน); GENCO
- 3.1.4 ซี้้ได้จากเตาเผาขยะของโครงการจัดการกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)
- 3.1.5 ตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียของโครงการจัดการกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)
- 3.1.6 เรซินของโครงการจัดการกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)
- 3.1.7 สารละลายมาตรฐาน $^{137}\text{CsCl}_2$ ความแรงรังสี 141.8067 ไมโครคูรี/กรัม ณ วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2546
- 3.1.8 สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4), AR Grade บริษัท MERCK
- 3.1.9 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl), AR Grade บริษัท MERCK
- 3.1.10 ไฟเบอร์กลาส
- 3.1.11 โซเดียมซัลไฟด์ ($\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$), AR Grade บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.12 กลีเซอริน (Glycerine USP) บริษัท เอกตรงเคมีภัณฑ์ จำกัด
- 3.1.13 น้ำกลั่น 3 ครั้ง จากองค์การเภสัชกรรม

3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 กระจกดวง
- 3.2.2 ขวดปรับปริมาตร
- 3.2.3 บีเปต
- 3.2.4 เข็มฉีดยา
- 3.2.5 ถังมือยาง
- 3.2.6 ครอบป้องกันโพลิเอทิลีน (ใช้ทดสอบการถูกชะล้าง) ปริมาตร 460 มิลลิลิตร

3.2.7 กระจายอะลูมิเนียม

3.2.8 แบบขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3 เครื่องมือ

3.3.1 ถังหลอมและกวนผสม ปริมาตร 2,700 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3.2 เครื่องกวนผสมกากและชุดควบคุม

3.3.3 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกด (Universal testing machine) รุ่น AMSCER 3T

3.3.4 หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (Coaxial Ge Detector) ของ Canberra มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ที่พลังงาน 1.332 MeV 20%

3.3.5 เครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง (Multichannel analyzer; MCA) รุ่น DSA2000 ของ Canberra

3.3.6 เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร

3.3.7 เตาอบตัวอย่างสาร

3.3.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.4 การทดลอง

3.4.1 แบบหล่อสำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กากผนัง

ในงานวิจัยนี้กากกัมมันตรังสีที่ถูกผนึกด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะถูกเรียกว่าผลิตภัณฑ์กากผนัง (Waste form) การที่จะบอกว่าคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีหรือไม่นั้น สามารถดูได้จากผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากผนัง ได้แก่

3.4.1.1 การทนทานต่อแรงกด (Compressive strength); ASTM C 579-96

3.4.1.2 การทนทานต่อแรงกดหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน (Water immersion); USNRC STANDARD

3.4.1.3 การทนทานต่อแรงกดหลังผ่านการฉายรังสี (Radiation stability); USNRC STANDARD

3.4.1.4 การทนทานต่อการชะล้างสารกัมมันตรังสี (Leachability); ANS 16.1

3.4.1.5 การทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance); ASTM C267-97

3.4.1.6 การทนทานต่อการชะล้างโลหะหนัก; USEPA STANDARD

ผลิตภัณฑ์กึ่งกาฬนิกที่จะถูกทดสอบต้องมีรูปทรงตรงตามข้อกำหนดของแต่ละมาตรฐานการทดสอบแบบหล่อที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กึ่งกาฬนิกในการวิจัยนี้เป็นวัสดุประเภทเหล็กปลอดสนิม สามารถทนทานต่อความร้อนและเก็บความร้อนได้ และเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับของผสมที่เทลงไป แบบหล่อนี้มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง $1 \pm 1/3$ นิ้ว (25 ± 0.8 มิลลิเมตร) สูง $1 \pm 1/3$ นิ้ว (25 ± 0.8 มิลลิเมตร) ^[25]

3.1.2 ถังหลอมและกวนผสมกาฬ

ถังหลอมและกวนผสมกาฬ ประกอบด้วย ถังเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) 2 ถัง ซ้อนกัน ถังด้านในเป็นบริเวณที่จะเกิดการหลอมและผสม ถูกออกแบบให้มีรูปร่างเป็นทรงกรวย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากถัง เท่ากับ 20 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร มีความจุประมาณ 2700 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถังถูกออกแบบให้เป็นทรงกรวยเพื่อให้ของผสมสามารถไหลได้สะดวกและง่ายต่อการเทลงในแบบหล่อ อีกทั้งป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุเนื่องจากการกวนผสมเข้าไปไม่ถึง สำหรับถังใบนอกเป็นถังที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านความร้อน โดยอาศัยกลีเซอรินเป็นตัวพาความร้อนไปสู่ถังที่อยู่ด้านใน ถังใบนอกถูกพันด้วยขดลวดให้ความร้อนขนาด 1500 W 220 V อุณหภูมิของผสมถูกปรับโดยชุดควบคุมอุณหภูมิ ใบพัดซึ่งทำหน้าที่กวนผสมถูกยึดกับมอเตอร์ชนิดกระแสตรงที่สามารถปรับรอบหมุนได้ซึ่งติดตั้งไว้เหนือถังใบใน อุปกรณ์กวนผสมนี้ควรตั้งไว้ในตู้ดูดควัน

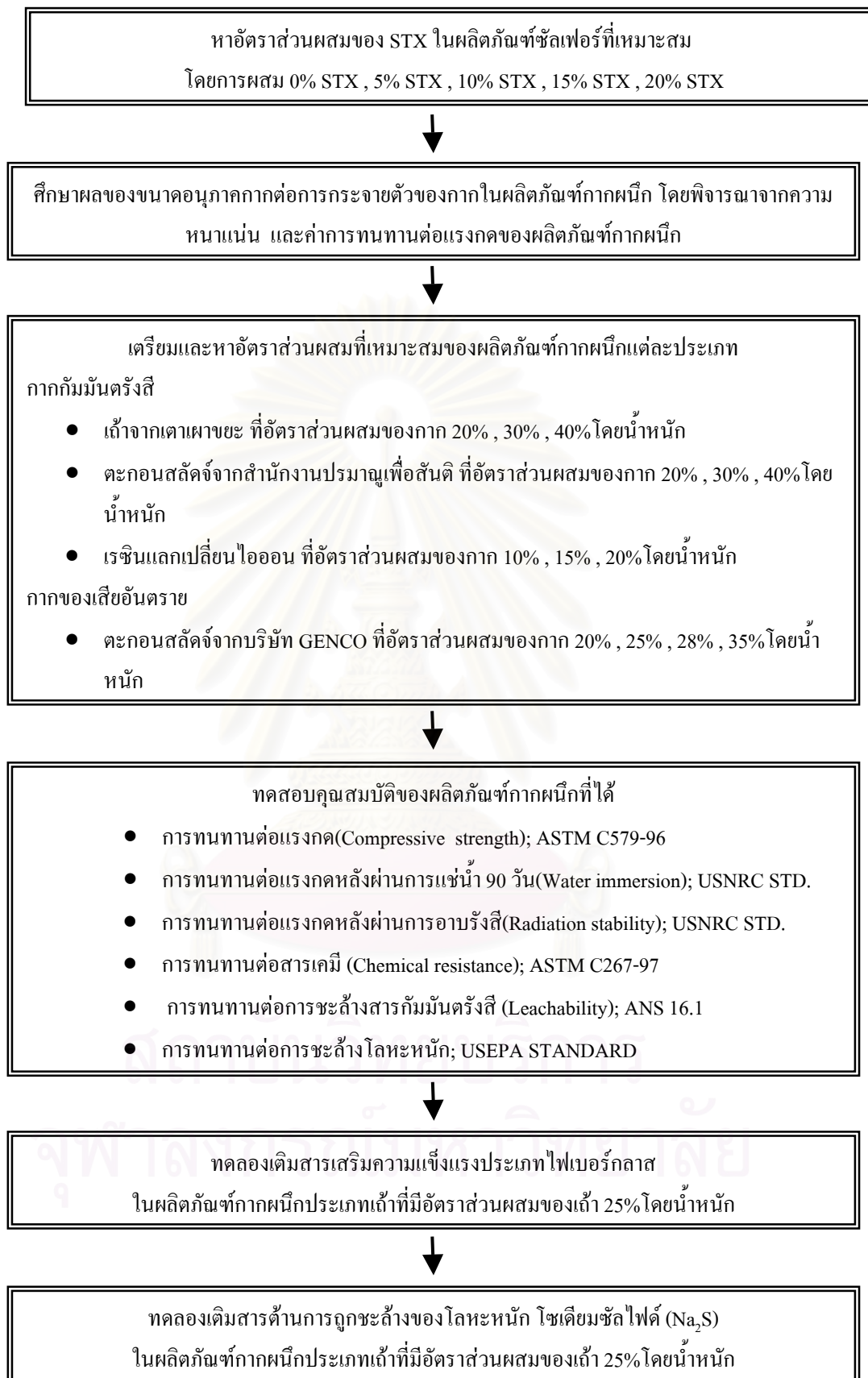


รูปที่ 3-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมซัลเฟอร์โพลีเมอร์และกวนผสมกากกัมมันตรังสี

3.1.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองและตัวแปรที่ศึกษา

ในการวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3-2 โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้ :

- อัตราส่วนผสมของ STX™
- ขนาดของอนุภาคกาก
- อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกาก
- ประเภทของกาก
- คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากผนัง
- ผลของการเติมสารเสริมความแข็งแรงประเภทไฟเบอร์กลาส
- ผลของการเติมสารต้านทานการชะล้างโลหะหนัก : โซเดียมซัลไฟด์



รูปที่ 3-2 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและตัวแปรที่ศึกษา

3.1.4 หาเงื่อนไขของการเตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์

เนื่องจากซัลเฟอร์โพลีเมอร์เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างกำมะถันเหลวกับสารสาคัดแปรสมบัติประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัวที่มีชื่อทางการค้าว่า STX™ ในเบื้องต้นจึงทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงกำมะถันและ STX™ ที่มีสัดส่วนผสมของ STX™ 5% , 10% , 15% และ 20% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด โดยนำผงกำมะถันมาหลอมที่อุณหภูมิ $135 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นเติม STX™ ผสมลงไปจนต่อเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เทของผสมที่ได้ลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้โดยแบบหล่อถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$ ทิ้งไว้ให้เย็นและแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบแล้วนำไปทดสอบหาค่าความทนทานต่อแรงกด ส่วนผสมที่ให้ค่าความทนทานต่อแรงกดสูงกว่ามาตรฐานกำหนดจะถูกเลือกและนำไปใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์กากผนังต่อไป

3.1.5 การเตรียมกากของเสียอันตราย

กากของเสียอันตรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตะกอนสลัดจ์ (Sediment sludge) ที่ปนเปื้อนโลหะหนักซึ่งได้จากบ่อบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะของบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน); GENCO ซึ่งกากตะกอนสลัดจ์ของเสียอันตรายนี้ จะเขียนว่า ตะกอนสลัดจ์ (GENCO)

กากของเสียอันตรายที่ใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์กากผนังจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำที่หลงเหลืออยู่ในกาก กากที่ได้มีความหนาแน่น 0.2054 กรัม/ลบ.ซม. และจะถูกใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์กากผนังต่อไป

3.1.6 การเตรียมกากกัมมันตรังสี

กากกัมมันตรังสีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกากกัมมันตรังสีที่ได้จากกระบวนการบำบัดเพื่อลดปริมาณให้น้อยลงของโครงการจัดการกากกัมมันตรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (สนง.ปส.) ได้แก่

3.1.6.1 เถ้า (Incinerator ash) ได้จากการเผาวัสดุประเภทต่างๆ ที่เปราะเปื้อนสารกัมมันตรังสี เช่น เข็มฉีดยา ถูมือ หลอดทดลอง กระจก เศษผ้า เศษพลาสติก ซากพืช และเศษวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถเผาได้

3.1.6.2 ตะกอนสลัดจ์ (Sludge) ได้มาจากการตกตะกอนเคมีของเหลวปนเปื้อนสารกัมมันตรังสี และ โลหะหนัก ด้วย Alum เช่น ปูนขาว และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเขียนว่า ตะกอนสลัดจ์ (ปส.) หรือ Sludge (OAP)

3.1.6.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้แล้ว (Spent ion-exchange resin) ได้จากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ กากแต่ละประเภทมีความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ความหนาแน่นของวัสดุชนิดกากและกากประเภทต่าง ๆ

ประเภทของวัสดุชนิดกากและกาก	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
ซัลเฟอร์โพลิเมอร์	1.9541
เถา	0.2379
ตะกอนสลัดจ์ (พป.)	0.9541
เรซิน	0.6341
ตะกอนสลัดจ์ (GENCO)	0.2054

กากกัมมันตรังสีถูกแบ่งเป็น 3 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 กากกัมมันตรังสีที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบคุณสมบัติ การทนทานต่อแรงกด, การทนทานต่อแรงกดหลังแช่น้ำ 90 วัน, การทนทานต่อรังสี และ การทนทานต่อสารเคมี กากกัมมันตรังสีชุดนี้เป็นกากกัมมันตรังสีจริงที่ไม่มีการเติมสารละลายรังสีมาตรฐาน

ชุดที่ 2 กากกัมมันตรังสีที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบคุณสมบัติ การทนทานต่อการชะล้างสารกัมมันตรังสี โดยทำการเติมสารละลายรังสีมาตรฐาน $^{137}\text{CsCl}_2$ ความเข้มข้นรังสี 0.3 ไมโครคูรี/กรัมของกาก ลงในกากกัมมันตรังสีประเภทเถาและประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) การที่ต้องเติมสารละลายรังสีมาตรฐาน $^{137}\text{CsCl}_2$ ในกากชุดที่ 2 เพราะกากกัมมันตรังสีทั้งสองประเภทที่ใช้ มีสารกัมมันตรังสีปนเปื้อนอยู่ในระดับต่ำมากซึ่งอาจทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบการชะล้างมีความแปรปรวนสูงและใช้เวลาในการวัดกัมมันตภาพรังสีนาน

ชุดที่ 3 กากกัมมันตรังสีผสมที่ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบคุณสมบัติ การทนทานต่อการชะล้างโลหะหนักมีพิช โดยทำการเติมโลหะหนัก ตะกั่ว 25 ppm, แคดเมียม 5 ppm และปรอท 1 ppm ลงในกากกัมมันตรังสีประเภทเถาและตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ทั้งนี้เนื่องจากกากกัมมันตรังสีทั้งสองประเภทจากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติมีองค์ประกอบของโลหะหนักในระดับความเข้มข้นที่ต่ำมากจนอาจทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความแปรปรวนสูง

กากทั้ง 3 ชุดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำออกจากกาก กากที่ได้ถูกนำไปเตรียมชิ้นตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนังต่อไป โดยทุกชิ้นตัวอย่างจะถูกเตรียมไม่แบบต่อเนื่อง (Batch Production) มีจำนวน 3 ชิ้นในแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 3-3 ลักษณะของ STX™ กัมมะถัน และกากกัมมันตรังสีประเภทต่าง ๆ

3.1.7 การเตรียมและหาอัตราส่วนผสมของกากที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กากผนัง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมชิ้นงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Production) มีจำนวน 3 ชิ้นในแต่ละตัวอย่าง ในการเตรียมผลิตภัณฑ์กากผนังจะเริ่มจากการนำกัมมะถันผงมาหลอมเหลวในถังกวนผสม และค่อยๆ เทกากแต่ละประเภทที่เตรียมได้จากข้างต้นผสมลงไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของกากกับกัมมะถันเหลว เพราะการจับกันเป็นกลุ่มก้อนนี้จะไปขัดขวางการกวนผสมของใบพัด อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม คือ 160°C ซึ่งเป็นไปตาม Laboratory Procedure for Producing STARcrete™ Test Specimens^[21] นาน 30 นาที หรือจนไม่มีฟองอากาศในถังกวนผสม ระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่หลงเหลืออยู่ในกาก หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ $135 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เติม STX™ ลงในส่วนผสม ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $135 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการผนังกาก และต้องไม่เกิน 150°C เพราะจะทำให้ส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันขึ้นกับ STX™ ทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลของ STX™ เกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสลายตัวของพันธะเคมีใน STX™ เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์กากผนังที่ได้มีความทนทานต่อแรงกดลดลง นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ $150^{\circ}\text{C} - 160^{\circ}\text{C}$ ยังก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีพิษและสามารถติดไฟได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนและผสมก่อนขึ้นรูป คือ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเท

ส่วนผสมที่ได้ในแบบที่เตรียมไว้ แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กากผนังจะต้องถูกทำให้ร้อน โดยนำไปตั้งบนเตาที่อุณหภูมิประมาณ $100^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$ ปล่อยให้ส่วนผสมที่ถูกเทแล้วให้เย็นตัวและแข็งตัวอยู่ในแบบหล่อ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์กากผนังออกจากแบบหล่อและวางไว้ในบรรยากาศรวมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 3-4 แบบหล่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กากผนัง และ ผลิตภัณฑ์กากผนัง

3.1.8 การประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากผนัง

ในการศึกษาและพัฒนากระบวนการการผนังกาก จำเป็นต้องมีการประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากผนัง เพื่อจะได้มั่นใจว่ากากและวัสดุผนังกากถูกควบคุมกันจนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์กากผนังมีคุณภาพและคุณสมบัติเหมือนกันตลอดทุกชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นผลิตภัณฑ์กากผนังแต่ละอันที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งจึงเปรียบได้เป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์กากผนังทั้งหมดที่จะนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

การที่ผลิตภัณฑ์กากผนังมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันนั้น จะส่งผลให้เกิด สิ่งต่าง ๆ ดังนี้

- การกระจายในรูปแบบเดียวกันของกัมมันตภาพรังสีทั่วตลอดผลิตภัณฑ์กากผนัง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาถึงความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน การจัดเก็บ และกากขนส่งผลิตภัณฑ์กากผนัง
- คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมือนกันทั่วตลอดผลิตภัณฑ์กากผนัง ซึ่งมีผลต่อการทนทานต่อแรงกด และการทนทานต่อการถูกระคายของผลิตภัณฑ์กากผนัง
- ความถูกต้องในการประเมินอัตราส่วนผสมกากในผลิตภัณฑ์กากผนังแต่ละอัน

ในการทดลองจะพิจารณาลักษณะการเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์กากผนังจากค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากผนังแต่ละก้อน^[13] และพิจารณาการเกิดโพรงช่องว่างในผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของกาก ในการวิจัยนี้ทำการคำนวณค่าความหนาแน่นของผลิต

กัณฑ์กากผนังแต่ละอัน โดยคำนวณจากปริมาตรและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์กากผนัง ดังสมการที่ (1)

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากผนัง (กรัม/ลบ.ซม.)
M คือ มวลของผลิตภัณฑ์กากผนัง (กรัม)
V คือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากผนัง (ลบ.ซม.)

ส่วนการเกิดโพรงพิจารณาด้วยตาเปล่า โดยการผ่าผลิตภัณฑ์กากผนัง

3.1.9 การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากผนัง

วัตถุประสงค์สำคัญของระบบการฝังกลบกาก คือ การแยกสารกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนอยู่ในกากไม่ให้หลุดรอด หรือ แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมกระทั่งกัมมันตภาพรังสีสลายตัวจนมีระดับความแรงรังสีอยู่ในระดับปลอดภัย การผนึกกากให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์กากผนัง(Waste form) เป็นแนวทางหนึ่งซึ่งสามารถทำให้สารกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนอยู่ในกากมีความเสถียรภาพไม่หลุดรอดออกสู่สิ่งแวดล้อมตลอดช่วงเวลาของการฝังกลบ

เพื่อเป็นการคาดคะเนพฤติกรรมของผลิตภัณฑ์กากผนังในสภาพแวดล้อมการฝังกลบตลอดช่วงระยะเวลาของการฝังกลบ และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์กากผนังในวัสดุผนังกากประเภทซัลเฟอร์ โพลีเมอร์กับผลิตภัณฑ์กากผนังในวัสดุผนังกากประเภทอื่นๆ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากผนังโดยอ้างอิงตามข้อกำหนดของ U.S. Nuclear Regulatory Commission ; USNRC^[26] ดังนี้

3.1.9.1 การทนทานต่อแรงกด(Compressive strength)

การทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากผนังใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical integrity) ของผลิตภัณฑ์กากผนัง อีกทั้งยังบ่งชี้ถึงความสามารถในการทนทานต่อแรงกดอัดอันเนื่องมาจากการซ้อนทับของบรรจุภัณฑ์และวัสดุฝังกลบ (Overburden) การทดสอบจะดำเนินภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C579-96 : Standard test methods for compressive strength of chemical-resistant mortars, grouts, monolithic surfacings, and polymer

concretes^[27] ซึ่งเป็นมาตรฐานเดียวกับที่ใช้ทดสอบผลิตภัณฑ์กากพริกในวัสดุพริกกากประเภทซีเมนต์ การทดสอบการทนทานต่อแรงกดควรจะทำทดสอบทันทีเมื่อครบ 24 ชั่วโมงหลังจากผลิตภัณฑ์กากพริกเย็นและแข็งตัว โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากพริกอย่างละ 3 ชิ้นงาน มาทดสอบกำลังรับแรงกดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น AMSCER 3T จดบันทึกน้ำหนักสูงสุดที่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากพริกแต่ละอันสามารถรับได้เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าการทนทานต่อแรงกดต่อไป ตามข้อกำหนดของ NRC ผลิตภัณฑ์กากพริกต้องทนต่อแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 0.41 เมกะปาสกาล (60 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว)

นอกจากนี้การทนทานต่อแรงกดสามารถใช้เป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงในผลิตภัณฑ์กากพริกหลังจากผ่านการทดสอบในสภาวะต่าง ๆ เช่น การทนทานต่อกัมมันตภาพรังสี การทนทานต่อการแช่ในน้ำ และการทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น



รูปที่ 3-5 เครื่องทดสอบการทนทานต่อแรงกด

3.1.1.2 การทนทานต่อแรงกดหลังจากผ่านการแช่ในน้ำ 90 วัน (Water immersion)

ในระหว่างการหลอมและกวนผสมซัลเฟอร์โพลีเมอร์กับกาก น้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบในกากจะถูกกำจัดให้หมดไปเหลือเพียงแต่กากแห้งที่ถูกพริกแน่นอยู่ในผลิตภัณฑ์กากพริก และทันทีที่ผลิตภัณฑ์กากพริกมีโอกาสสัมผัสกับน้ำ กากที่ถูกพริกแน่นอยู่ในผลิตภัณฑ์กากพริกจะดูดซับน้ำเอาไว้ เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์กากพริกบางประเภทเกิดการบวมตัวและมีผลทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลง ซึ่งในระหว่างการฝักรวมผลิตภัณฑ์กากพริกอาจมีโอกาสมัผัสกับน้ำได้ดินในบริเวณที่ฝักรวม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำลองสภาวะการสัมผัสน้ำของผลิตภัณฑ์กากพริกในแหล่งฝักรวม โดยการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากพริก 3 ชิ้นงานต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมไปแช่ในน้ำกลั่นหรือน้ำปราศจากไอออน(Deionized water) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร เป็นเวลานาน 90 วัน ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำ ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและขนาดของชิ้น

ตัวอย่าง จากนั้นนำไปทดสอบการทนทานต่อแรงกดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C579-96 ภายใต้สภาวะเดียวกับที่ปฏิบัติในข้อ 3.4.9.1

3.1.1.3 การทนทานต่อแรงกดหลังผ่านการฉายรังสี(Radiation stability)

การได้รับรังสีแกมมาของผลิตภัณฑ์กากผนังมีอิทธิพลสำคัญต่อความคงทนในระยะยาวของผลิตภัณฑ์กากผนัง ปริมาณรังสีที่ผลิตภัณฑ์กากผนังได้รับในระหว่างการฝังกลบเป็นปริมาณรังสีสะสม(accumulated dose) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความแรงรังสีของผลิตภัณฑ์กากผนังทั้งหมดที่ถูกเก็บอยู่ในบริเวณเดียวกัน ปริมาณรังสี 10^8 rads (1 MGy) เทียบเท่าได้กับปริมาณรังสีที่ได้รับจากผลิตภัณฑ์กากผนังซึ่งบรรจุด้วย Cs-137 หรือ Sr-90 ที่ความเข้มข้น 10 คูริ/ลบ.ฟุต ในแหล่งฝังกลบในช่วงเวลา 300 ปี^[26] การได้รับปริมาณรังสีสะสมของผลิตภัณฑ์กากผนังจะก่อให้เกิดรอยแตก รอยบิ่น หรือ เกิดการแตกสลายของผลิตภัณฑ์กากผนังทั้งก้อน ดังนั้นจำเป็นต้องทดสอบการทนทานต่อแรงกดหลังผ่านการฉายรังสี โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนังไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสีอย่างน้อย 10^8 rads (1 MGy) หลังการฉายรังสี ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนังไม่ควรจะมีรอยแตก ถ้ำขึ้นใดถูกตรวจพบว่ามีรอยแตกถือว่าไม่ผ่านการทดสอบ นำตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกใดๆ ไปทดสอบการทนทานต่อแรงกดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C579-96 ภายใต้สภาวะเดียวกับที่ปฏิบัติในข้อ 3.4.9.1 ซึ่งควรจะมีค่าการทนทานต่อแรงกดอย่างน้อย 500 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว

3.1.1.4 การทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance)

การทดสอบการทนทานต่อสารเคมีของผลิตภัณฑ์กากผนัง จะปฏิบัติตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C267-97 : Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes โดยการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนังไปแช่ในตัวทำละลาย 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก และ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 10%โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลายทั้งสองชนิดนี้สามารถพบได้ในน้ำใต้ดิน ผลิตภัณฑ์กากผนังจะถูกแช่อยู่ในสารละลายเป็นเวลานาน 56 วัน ทำการวัดขนาดและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังแช่ในสารละลาย และนำผลิตภัณฑ์กากผนังที่ผ่านการแช่ในสารละลายนี้ไปทดสอบค่าการทนทานต่อแรงกดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C579-96 ภายใต้สภาวะเดียวกับที่ปฏิบัติในข้อ 3.4.9.1

3.1.1.5 การทนทานต่อการชะล้างโลหะหนัก (Leaching of Toxic Metals)

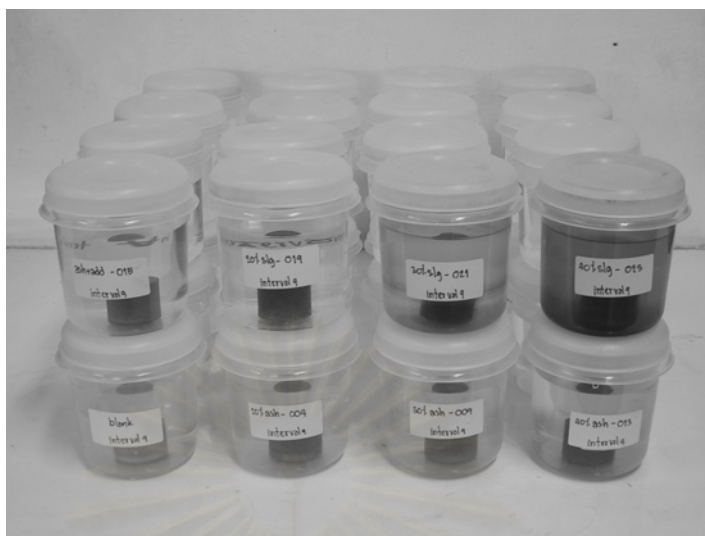
กากที่ใช้ในการเตรียมผลิตภัณฑ์กากผนังสำหรับใช้ในการทดสอบการทนทานต่อการชะล้างโลหะหนักได้แก่ กากกัมมันตรังสีชุดที่ 3 คือ เถ้า และ ตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่มีความเข้มข้นของ ตะกั่ว 25 ppm แคดเมียม 5 ppm และ ปรอท 1 ppm ปนอยู่ ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่สูงกว่าค่ามาตรฐาน 5 เท่า

การทดสอบการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากผนัง จะดำเนินการไปตามวิธีการสกัดสาร(Extraction Procedure ; EP) ซึ่งกำหนดโดย U.S. Environmental Protection Agency ; EPA โดยนำผลิตภัณฑ์กากผนังมาบดให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาด 0.5 – 5 มิลลิเมตร นำตัวอย่างที่บดแล้ว 50 กรัมใส่ในสารละลายกรดเกลือในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (500 มิลลิลิตร) ของน้ำหนักกาก (กรัม) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า(Agitator) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร ทำการกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GFC ขนาดรู 1 ไมครอน นำของเหลวที่กรองได้ไปวิเคราะห์หา ตะกั่ว แคดเมียม และปรอทโดยวิธี Atomic Absorption ; AA

3.1.1.6 การทนทานต่อการชะล้างสารกัมมันตรังสี (Radioactive leachability)

การวัดการทนทานต่อการชะล้างเป็นการวัดความสามารถของผลิตภัณฑ์กากผนังที่จะ หน่วงรั้งการหลุดรอดของสารกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตาม มาตรฐานANS/ANSI 16 : Measurement of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Waste by Short-Term Test Procedure^[29] ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบที่กำหนดโดย NRC

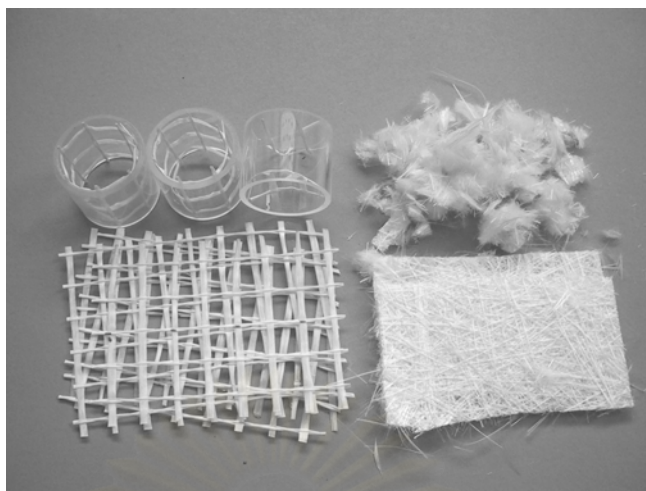
ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนังที่มีการเติมสารละลายรังสีมาตรฐานแต่ละตัวอย่างจะถูกนำมา ชะในน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร ซึ่งระบุตามอัตราส่วนของน้ำชะต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของผลิต ภัณฑ์กากผนัง คือ 10 ± 0.2 เซนติเมตร โดยแช่เป็นเวลานาน 90 วัน และต้องเปลี่ยนน้ำชะ (Leachate) ใหม่ตามช่วงเวลา ดังนี้ 2 , 5 , 7 , 24 , 24 , 24 , 24 , 336 , 672 และ 1032 ชั่วโมง ซึ่งเป็น ทั้งหมด 10 ช่วงเวลา เก็บน้ำชะในแต่ละช่วงเวลาไปทำการวัดค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมา โดยใช้ห้ว วัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงและเครื่องวิเคราะห์พลังงานหลายช่อง นำ ค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาค่าสัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพรังสีสะสม (Cumulative activity released fraction) และ ค่าดัชนีการชะล้าง(Leach index) ของผลิตภัณฑ์กากผนัง ค่าดัชนี การชะล้างของผลิตภัณฑ์กากผนังควรจะมีความมากกว่า 6.0 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ถูกกำหนดโดย USNRC



รูปที่ 3-6 การทดสอบการทนทานต่อการถูกชะล้างของสารกัมมันตรังสี

3.1.10 การเติมสารเสริมความแข็งแรงลงในผลิตภัณฑ์กากผงึก

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองเติมสารประเภทไฟเบอร์กลาสเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างผลิตภัณฑ์กากผงึกในอัตราส่วนผสม 0.5% โดยน้ำหนัก ตามที่รายงานไว้ใน US Patent No.5768234^[5] โดยเติมลงในผลิตภัณฑ์กากผงึกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสม 25% โดยน้ำหนัก รูปแบบในการใส่ไฟเบอร์กลาสลงไปในผลิตภัณฑ์กากผงึก มี 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3-7 คือ รูปแบบที่ 1 เป็นการนำไฟเบอร์กลาสแบบที่ทอเป็นผืนมาตัดให้เป็นเส้นฝอยเล็กๆ แล้วผสมลงไปพร้อมกับส่วนผสมทั้งหมด รูปแบบที่ 2 และ รูปแบบที่ 3 เป็นการนำไฟเบอร์กลาสมาวางในแบบหล่อคล้ายกับลักษณะของการใส่เหล็กเส้นเพื่อเสริมแรงในงานคอนกรีต ซึ่ง รูปแบบที่ 2 เป็นการนำไฟเบอร์กลาสชนิดที่ทอเป็นตารางมาตัดเป็นชิ้นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อ คือ 2.54 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นไฟเบอร์กลาสรูปวงกลมไปวางในแนวเดียวกับหน้าตัดของแบบหล่อ 3 ระดับ คือ ด้านบน ตรงกลาง และ ด้านล่างของแบบหล่อ ส่วนรูปแบบที่ 3 เป็นการนำไฟเบอร์กลาสชนิดที่ทอเป็นตารางมาม้วนเป็นทรงกระบอกขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าแบบหล่อเล็กน้อย แต่มีความสูงเท่ากับแบบหล่อ เมื่อทำการวางแผ่นไฟเบอร์กลาสในแต่ละรูปแบบแล้ว จึงเทกากับวัสดุผงึกที่ผสมกันเรียบร้อยแล้วลงในแบบหล่อที่ได้จัดเตรียมไว้



รูปที่ 3-7 รูปแบบและลักษณะของไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการทดลอง

3.1.11 การเติมสารต้านทานการถูกชะล้างโลหะหนัก

ในการทดลองนี้มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งเป็นสารที่ใช้เป็นตัวต้านทานการถูกชะล้างของโลหะหนักในหลายงานวิจัย ลงไปในผลิตภัณฑ์กากฉนึกในอัตราส่วนผสม 7% โดยน้ำหนัก ตามที่รายงานไว้ใน US Patent No.5768234^[5] โดยเลือกผสมโซเดียมซัลไฟด์ลงในผลิตภัณฑ์กากฉนึกที่มีอัตราส่วนผสมของกาก 40% โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลิตภัณฑ์กากฝนิกที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้มาจากการเตรียมแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch production) ในคราวเดียวกันทุกชิ้นงาน โดยในการทดสอบคุณสมบัติแต่ละประเภทจะมีจำนวน 3 ชิ้นในแต่ละตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์กากฝนิกที่ใช้ในการทดสอบควรมีลักษณะที่สามารถเป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์กากฝนิกทั้งหมด และเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่าง กากและวัสดุฝนิกกากจะต้องถูกกวนผสมให้มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ตลอดทุกผลิตภัณฑ์กากฝนิก ซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฝนิกแต่ละชิ้นตัวอย่าง นอกจากนี้ ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฝนิกยังใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการจำลองระบบการเตรียมผลิตภัณฑ์กากฝนิก

4.1 ผลการหาอัตราส่วนของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่เหมาะสม

ผลการทดสอบ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของ STX™ เป็น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะมีค่าการทนทานต่อแรงกดเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนี้ 11.25, 17.50, 19.80 และ 23.22 เมกะปาสคาล ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ นี้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USNRC ซึ่งกำหนดไว้ เท่ากับ 0.41 เมกะปาสคาล

เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4-1 พบว่า ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของ STX™ และ ยังพบว่า กราฟในช่วงอัตราส่วนผสมของ STX™ 5% - 10% โดยน้ำหนัก มีค่าความชันสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความชันของช่วงอัตราส่วนผสมอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมที่ STX™ 10% โดยน้ำหนัก มีค่าการทนทานต่อแรงกดเพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 6.25 เมกะปาสคาล ดังนั้น ที่อัตราส่วนผสมของ STX™ 10% โดยน้ำหนักจึงน่าจะเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมซัลเฟอร์โพลีเมอร์

ผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่อัตราส่วนผสมของ STX™ 10 % โดยน้ำหนัก มีค่าการทนทานต่อแรงกดมากกว่าที่อัตราส่วนผสมของ STX™ 5 % โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1.6 เท่า ดังนั้น ถ้าเลือกใช้ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่มีอัตราส่วนผสมของ STX™ 5 % โดยน้ำหนักในการฝนิกกาก อาจทำให้ผลิตภัณฑ์กากฝนิกที่ได้มีค่าการทนทานต่อแรงกดลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐาน หลังผ่านการทดสอบการแช่น้ำ 90 วัน, การทนทานต่อรังสี 1 MGy และ การทนทานต่อสารเคมี

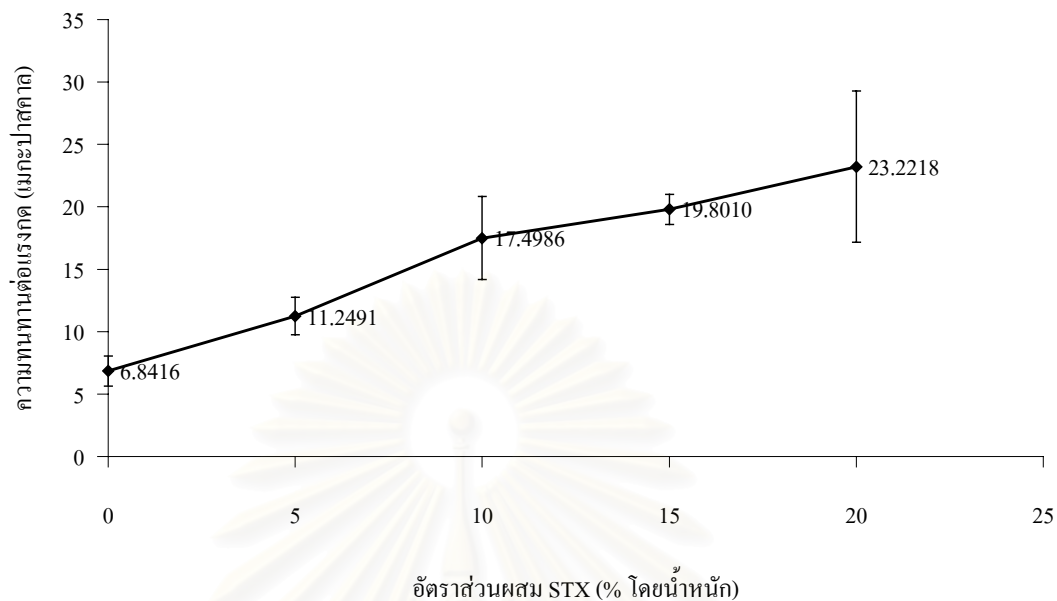
นอกจากนี้การเลือกอัตราส่วนผสมของ STX™ มากกว่า 10 % โดยน้ำหนัก มีผลให้อัตราส่วนผสมของกากในวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ลดน้อยลง ซึ่งไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการผนึกกาก

จากเหตุผลข้างต้นทั้งหมด ประกอบกับข้อแนะนำในการปฏิบัติงานของบริษัทผู้ผลิต STX™ ซึ่งได้กำหนดไว้ว่า จะต้องมิ STX™ อย่างน้อย 10% โดยน้ำหนักอยู่ในส่วนผสมของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ จึงจะมีผลต่อการปรับเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างผงกำมะถัน กับ STX™ ในอัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าการทนทานต่อแรงกด 17.50 เมกะปาสกาล

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงเกิดจากลักษณะที่แตกต่างของโพรงและรูพรุนที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์แต่ละก้อนแต่ละชุดทดสอบ

ตารางที่ 4-1 ความหนาแน่น และ ค่าการทนทานต่อแรงกดของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่ STX™ อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนผสมของ STX™ (% โดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	การทนทานต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสกาล)
STX 0%	2.04 ± 0.02	6.84 ± 1.21
STX 5%	1.92 ± 0.08	11.25 ± 1.49
STX 10%	1.95 ± 0.08	17.50 ± 3.33
STX 15%	2.03 ± 0.06	19.80 ± 1.21
STX 20%	2.02 ± 0.03	23.22 ± 6.05



รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของSTX กับ ค่าความทนทานต่อแรงกด

4.2 ผลการทดสอบหาขนาดอนุภาคของกากที่เหมาะสม

การหาขนาดอนุภาคของกากที่เหมาะสม เป็นการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของกากต่อการกระจายตัวของกากในผลิตภัณฑ์กากฉนึก โดยจะพิจารณาจากค่าการทนทานต่อแรงกดและค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฉนึก ผลิตภัณฑ์กากฉนึกที่ได้จากการฉนึกกากที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ นั้นเมื่อนำไปหาค่าความหนาแน่น และนำไปทดสอบการทนทานต่อแรงกด จะให้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าความหนาแน่น และค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเถ้าอัตราส่วนผสมของเถ้า 40%โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคเถ้าต่างๆ

ขนาดตะแกรง	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	การทนทานต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)
18 Mesh	2.00 ± 0.02	39.60 ± 2.55
25 Mesh	2.02 ± 0.02	37.43 ± 1.88
40 Mesh	2.01 ± 0.02	39.01 ± 1.78

จากผลการทดลอง พบว่า แม้กากที่นำมาพ่นจะมีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน แต่ก็มีควมหนาแน่นใกล้เคียงกัน คือ 2.00, 2.02 และ 2.01 กรัม/ลบ.ซม. แสดงให้เห็นว่ากากที่มีอนุภาคนขนาดต่าง ๆ สามารถถูกผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันกับวัสดุพ่นกากและมีการกระจายตัวในแบบเดียวกันทั่วตลอดทั้งผลิตภัณฑ์กากพ่น และผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ได้ยังมีค่าการทนทานต่อแรงกดใกล้เคียงกัน คือ 39.60, 37.43 และ 39.01 เมกกะปาสกาล ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของกากไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคกากในวัสดุพ่นกาก ดังนั้นในการทดลองลำดับต่อ ๆ ไปจึงเลือกใช้กากที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 40 Mesh เพื่อแยกเศษขยะที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของผลิตภัณฑ์กากพ่น เช่น เศษแก้ว เศษเหล็ก ออกไป

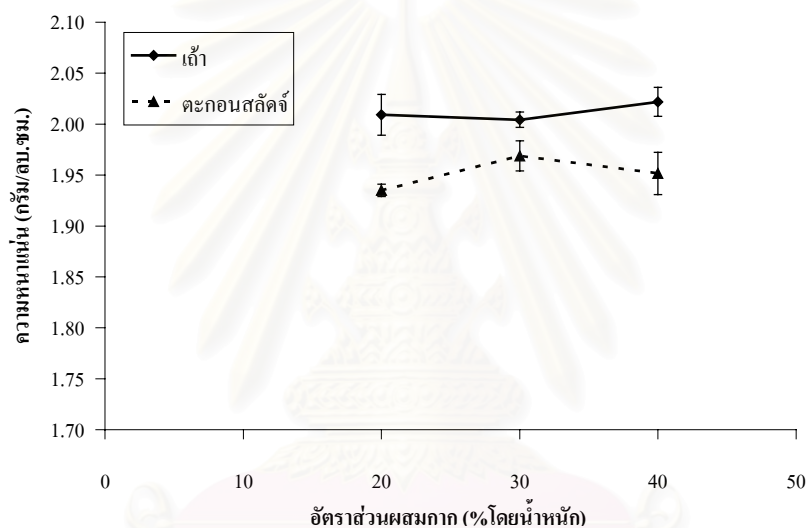
4.3 การประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพ่น

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ได้จากการเตรียมแบบครั้งในแต่ละครั้ง จะบ่งบอกถึงลักษณะความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์กากพ่น สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพ่น ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากพ่นที่ได้จากการเตรียมในแต่ละครั้งของการวิจัยนี้ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราส่วนผสมของกากประเภทเถาและกากประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) โดยสามารถพิจารณาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความหนาแน่นที่มีค่าเท่ากับ 0.01 – 0.02 กรัม/ลบ.ซม. ดังแสดงในตารางที่ 4-3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากและวัสดุพ่นกากถูกกวนผสมกันจนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์กากพ่นมีคุณภาพและคุณสมบัติเหมือนกันตลอดทุกชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นผลิตภัณฑ์กากพ่นแต่ละอันที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งจึงเปรียบได้เป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์กากพ่นทั้งหมดที่จะนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

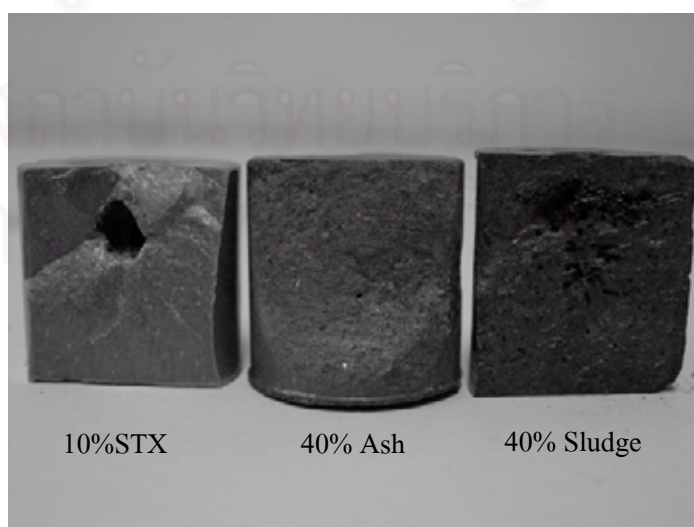
ผลจากการพิจารณาด้วยตาของการเกิดโพรงในผลิตภัณฑ์กากพ่น พบว่า ขนาดของโพรงในผลิตภัณฑ์กากพ่นจะมีขนาดเล็กลง เมื่อมีอัตราส่วนผสมของกากเพิ่มขึ้น เหตุผลได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4

ตารางที่ 4-3 ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากผนึกแต่ละอัตราส่วนผสมของกาก

ประเภทของกาก	อัตราส่วนผสมกาก (%โดยน้ำหนัก)	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)
เถ้า	20%	2.01 ± 0.02
	30%	2.00 ± 0.01
	40%	2.02 ± 0.01
ตะกอนสลัดจ์ (ปส.)	20%	1.94 ± 0.01
	30%	1.97 ± 0.01
	40%	1.95 ± 0.02



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกาก กับ ค่าความหนาแน่น



รูปที่ 4-3 ลักษณะการเกิดโพรงในผลิตภัณฑ์ผนึกประเภทต่าง ๆ

4.4 ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงกด

การทนทานต่อแรงกดเป็นคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากฉนีกด่านแรกที่ใช้พิจารณาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทต่าง ๆ ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองฉนีกกากทั้งหมด 4 ประเภท ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

กากกัมมันตรังสีประเภทเถ้า ฉนีกในอัตราส่วนผสมของกาก 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่ได้มีค่าการทนทานต่อแรงกด 20.51, 29.31 และ 40.39 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-4

กากกัมมันตรังสีประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ฉนีกในอัตราส่วนผสมของกาก 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่ได้มีค่าการทนทานต่อแรงกด 19.60, 24.14 และ 33.22 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้า และ ประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของกาก แสดงให้เห็นว่า กากประเภทเถ้า และ กากประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นวัสดุ aggregate จึงทำให้ผลิตภัณฑ์กากฉนีกทั้งสองประเภทมีโครงสร้างที่แข็งแกร่งขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของกากเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วนผสมของกากที่เท่ากัน ผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าจะมีค่าการทนทานต่อแรงกดสูงกว่าผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์ เนื่องจาก กากประเภทเถ้ามีคุณสมบัติเป็นวัสดุ pozzolan ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมเกาะ^[30] จึงทำให้ผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้ามีค่าการทนทานต่อแรงกดสูง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฉนีกทั้งสองประเภท ซึ่งพบว่า ผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้ามีค่าความหนาแน่นสูงกว่าผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทตะกอนสลัดจ์

เมื่อเปรียบเทียบค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนีกของกากทั้งสองประเภทกับผลิตภัณฑ์ฉนีกที่ไม่มีกการเติมกากลงไป พบว่า ผลิตภัณฑ์กากฉนีกทั้งสองประเภทมีค่าการทนทานต่อแรงกดสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกการเติมกากลงไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกการเติมกาก (มีเฉพาะซัลเฟอร์โพลิเมอร์) มีแนวโน้มที่จะเกิดโพรงช่องว่างในแนวแกนกลางของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นผลมาจากผิวรอบนอกของผลิตภัณฑ์มีการเย็นและแข็งตัวเร็วเกินไป ทำให้การเคลื่อนตัวของส่วนผสมที่ยังคงมีลักษณะเหลวอยู่ตรงบริเวณแกนกลางถูกจำกัด ดังนั้นเมื่อส่วนผสมเหลวเริ่มแข็งตัวและหดตัวจะทำให้เกิดโพรงในแนวแกนกลาง การเกิดโพรงช่องว่างนี้สามารถถูกทำให้ลดลงโดยการเพิ่มอัตราส่วนผสมกากของแข็งที่เป็นกากแห้งลงไป ทำให้ความจุความร้อนจำเพาะของส่วนผสมมีค่าสูงขึ้น^[13] เป็นผลให้อัตราการเย็นตัวและหดตัวของส่วนผสมลดลง การลดลงของขนาดของโพรง และ/หรือ ความพรุนของผลิตภัณฑ์กากฉนีกสามารถดูได้จากค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากฉนีกแต่ละประเภทที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่า ผลิตภัณฑ์ฉนีกที่ไม่ได้เติมกากมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่มีการเติมกากลงไป ถึงแม้ว่า กากที่เติมลงไปจะมีค่าความหนา

แน่นอนน้อยกว่าซัลเฟอร์โพลีเมอร์ก็ตาม จึงสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ผงที่ไม่มีการเติมกากอาจมีโพรงช่องว่างขนาดใหญ่กว่าในผลิตภัณฑ์กากผงที่มีการเติมกาก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ในรูปที่ 4-3

กากตะกอนของเสียอันตรายจากบ่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะของบริษัท GENCO ถูกผึ่งในอัตราส่วนผสม 20%, 25%, 28% และ 35% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์กากผงที่ได้มีค่าการทนทานต่อแรงกด เท่ากับ 12.62, 9.72, 7.78 และ 5.41 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ค่าการทนทานต่อแรงกดมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของกากเพิ่มขึ้น และมีค่าต่ำกว่าค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่อัตราส่วนผสมของ STX™ 10% โดยน้ำหนัก (ไม่มีการเติมการกากลงไปผลิตภัณฑ์) ดังแสดงในตารางที่ 4-4 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะมีคุณสมบัติเป็น clay ซึ่งเมื่อถูกนำไปผึ่งด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างผลิตภัณฑ์กากผง เนื่องจากตะกอนที่มีคุณสมบัติเป็น clay นี้ เมื่อถูกผสมที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C น้ำจะถูกกำจัดออกและกากตะกอนจะเกิดการหดตัว กากตะกอนนี้จะเกิดการพองตัวอีกครั้งเมื่อได้สัมผัสกับความชื้น ถึงแม้ซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะสามารถป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านได้แต่ก็ยอมให้น้ำซึมผ่านได้บ้างเล็กน้อย เป็นผลให้กากตะกอนที่ถูกผึ่งอยู่เกิดการพองตัวและทำผลิตภัณฑ์กากผงเกิดการรอยแตกได้ ดังนั้นกากตะกอนของเสียอันตรายจากบ่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะของบริษัท GENCO จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาผึ่งด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่เตรียมได้จาก STX™ นี้ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของผู้ผลิต STX™^[9] ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีการนำผลิตภัณฑ์กากผงที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์กากผงที่ได้จะมีค่าการทนทานต่อแรงกดมากกว่า 0.41 เมกะปาสกาล แต่ถ้าหากปล่อยผลิตภัณฑ์กากผงนี้ให้สัมผัสกับความชื้นหรือน้ำในสิ่งแวดล้อมนาน ๆ ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์กากผงเกิดการบวมและแตก เป็นผลให้ค่าการทนทานต่อแรงกดลดลง

อัตราส่วนผสมสูงสุดของกากแต่ละประเภทข้างต้นที่สามารถทำการผสมได้ คือ 35% - 40% โดยน้ำหนัก เนื่องจากข้อจำกัดของระบบกวนผสม การเติมกากมากกว่า 40% จะทำให้ส่วนผสมที่ได้มีความหนืดสูงเกินไปจนใบพัดไม่สามารถทำการกวนผสมได้ และทำให้ไม่สามารถเทส่วนผสมลงในแบบหล่อได้

ผลิตภัณฑ์กากผงประเภทเรซินถูกเตรียมขึ้นในอัตราส่วนผสมของกาก 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่า ในระหว่างการกวนผสมเรซินเกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างกากกับวัสดุผงกาก และเมื่อนำผลิตภัณฑ์กากผงออกจากแบบหล่อและวางทิ้งไว้ภายใต้บรรยากาศปกติ พบว่าด้านบนของผลิตภัณฑ์กากผงเกิดการบวมตัว สาเหตุมาจากเรซินที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์กากผงไม่ได้ถูกผึ่งอย่างสมบูรณ์ จึงมีการดูดซับความชื้นในบรรยากาศเอาไว้ มีผลทำให้เม็ดของเรซินเกิดการพองตัว จึงทำให้เกิดรอยแตกบนผิวของผลิตภัณฑ์กากผง และอาจส่งผลทำให้เกิดรอยร้าวเข้าไปถึงแกนกลาง ซึ่งความชื้นสามารถแทรกผ่านเข้าไปตามรอยร้าวได้ ทำให้เร

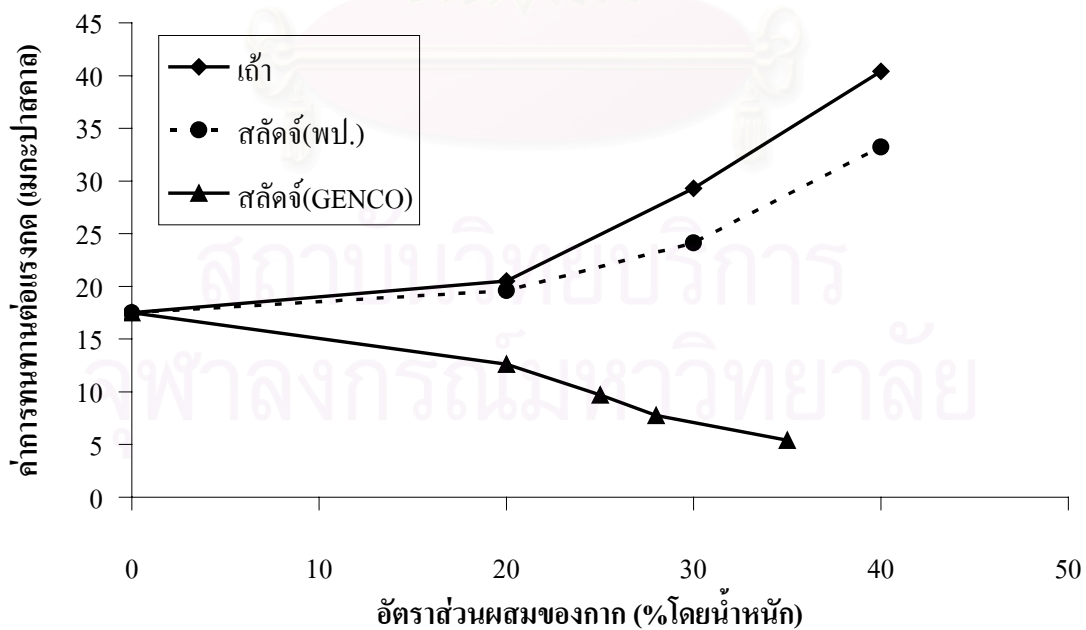
ชิน บริเวณขอบรอยร้าวดูดซับความชื้นและเกิดการพองตัว ความแข็งแรงของโครงสร้างผลิตภัณฑ์กากฉนึ่กจึงถูกทำลาย การบวมตัวดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในระหว่างการแข็งตัว เรซินจะลอยตัวสู่ด้านบนของผลิตภัณฑ์กากฉนึ่ก เพื่อทดสอบการดูดซับน้ำของเรซินจึงนำผลิตภัณฑ์กากฉนึ่กไปแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 300 ลบ.ซม. หลังจากปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที พบว่า ผลิตภัณฑ์กากฉนึ่กเกิดการแตก และ ค่อย ๆ หลุดออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากฉนึ่กประเภทเรซิน จึงหยุดลง ไม่มีนำผลิตภัณฑ์กากฉนึ่กประเภทเรซินไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4-4 ผลิตภัณฑ์กากฉนึ่กประเภทเรซินหลังนำออกจากแบบ และ วางทิ้งไว้ในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-4 ค่าความหนาแน่น และ ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฟันแต่ละอัตราส่วนผสมของกาก

ประเภทกาก	อัตราผสมของกาก (%โดยน้ำหนัก)	ค่าการทนทานต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)
ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (10%STX)	0%	17.50 ± 3.33
	20%	20.51 ± 0.52
	30%	29.31 ± 3.81
	40%	40.39 ± 2.69
ตะกอนสลิคซ์ (ปส.)	20%	19.60 ± 2.91
	30%	24.14 ± 9.45
	40%	33.22 ± 2.88
ตะกอนสลิคซ์ (GENCO)	20%	12.62 ± 3.60
	25%	9.72 ± 3.57
	28%	7.78 ± 2.51
	35%	5.40 ± 1.07



ตารางที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของกากประเภทต่าง ๆ กับ ค่าการทนทานต่อแรงกด

4.5 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกดหลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน

สิ่งที่ต้องพิจารณาหลังผ่านการทดสอบการแช่น้ำ 90 วัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์กากผนิก และ การเปลี่ยนแปลงของการทนทานต่อแรงกด

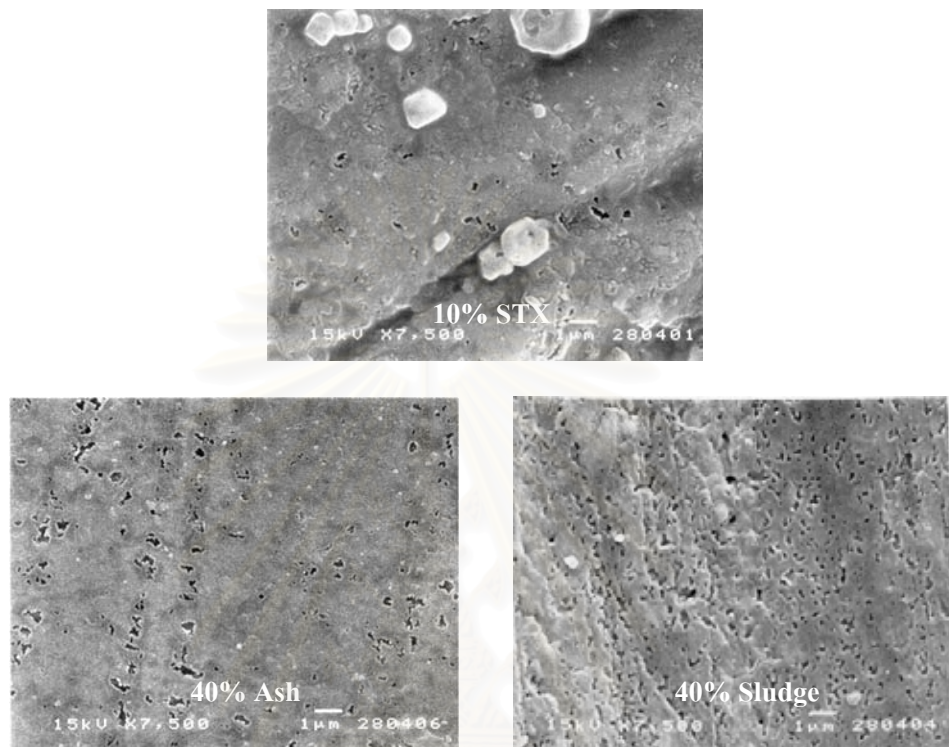
4.5.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์กากผนิก

ผลิตภัณฑ์กากผนิกประเภทเก้าและประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) หลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 90 วัน พบว่า ผลิตภัณฑ์กากผนิกประเภทเก้าที่อัตราส่วนผสมกาก 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก และ ผลิตภัณฑ์กากผนิกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 20% โดยน้ำหนัก ไม่เกิดการบวมตัวหรือเสีรูปร่างและไม่มีการแตกหรือมีรอยแตกริ้วเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-6 แต่มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเพียงเล็กน้อย ประมาณ 0.34 % – 0.89 %

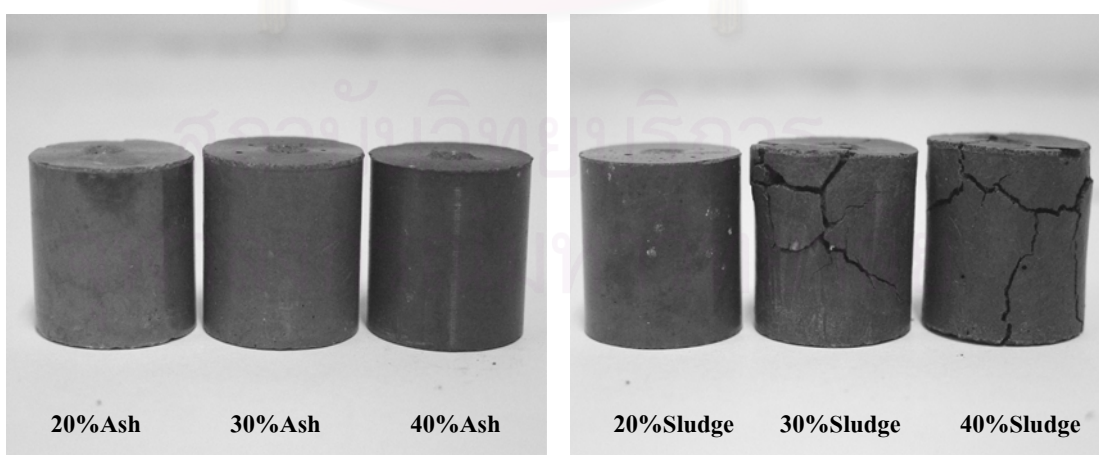
ผลิตภัณฑ์กากผนิกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่มีอัตราส่วนผสมกาก 30% และ 40% โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 47 วัน พบว่า ผลิตภัณฑ์กากผนิกเกิดการแตกและการบวมตัวบริเวณด้านบนของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 4-6 ข การบวมตัวนี้เกิดขึ้นในแนวเดียวกับแนวแกนของผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ สิ่งที่สามารถสังเกตได้หลังจากที่นำผลิตภัณฑ์กากผนิกแต่ละชิ้นงานขึ้นจากน้ำ แล้วนำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติก ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อรอไปทำการทดสอบการทนทานต่อแรงกด คือ มีไอน้ำจำนวนมากเกาะอยู่ภายในถุงพลาสติกที่บรรจุผลิตภัณฑ์กากผนิกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกากทุกอันดับ ส่วนในถุงพลาสติกที่บรรจุผลิตภัณฑ์กากผนิกประเภทเก้า พบว่า มีไอน้ำเกาะบ้างเพียงเล็กน้อยหรือไม่เลย แสดงให้เห็นว่า ในระหว่างการแช่น้ำ กากประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ดูชื้นน้ำเอาไว้มากกว่ากากประเภทเก้า และหลังจากที่นำผลิตภัณฑ์กากผนิกขึ้นจากน้ำ น้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์กากผนิกก็จะค่อย ๆ ระเหยกลายเป็นไอน้ำมาเกาะที่ด้านข้างของถุงพลาสติก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ในระหว่างการเตรียมผลิตภัณฑ์กากผนิกซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง น้ำที่ยังหลงเหลืออยู่ในกากจะถูกกำจัดให้หมดไปทำให้กากเกิดการหดตัว เมื่อผลิตภัณฑ์กากผนิกมีโอกาสสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น อนุภาคของกากซึ่งอยู่บริเวณผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์กากผนิกที่ไม่ได้ถูกผนิกอย่างสมบูรณ์ จะดูดซับน้ำเอาไว้และเกิดการพองตัว มีผลทำให้เกิดรอยแตกบนผิวของผลิตภัณฑ์กากผนิก และส่งผลต่อเนื่องทำให้เกิดรอยร้าวเข้าไปถึงแกนกลาง น้ำสามารถแทรกผ่านเข้าไปตามรอยร้าวอนุภาคของกากที่อยู่ตรงบริเวณผิวด้านนอกของรอยร้าวจะดูดซับน้ำเอาไว้ ผลิตภัณฑ์กากผนิกจึงเกิดการแตกและบวมตัว เป็นผลทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์กากผนิกสูญเสียความแข็งแรง นอกจากนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์กากผนิก คือ จำนวนรูพรุนที่บริเวณผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์กากผนิก จากภาพถ่ายจาก

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) พบว่า บริเวณผิวรอบนอกของผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทตะกอนสัจ (ปส.) มีจำนวนรูพรุนมากกว่าผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทเฒ่า จึงทำให้ผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทตะกอนสัจ (ปส.) มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมากกว่า



รูปที่ 4-6 ก ภาพถ่ายจุลภาค ผิววัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์, ผลิตภัณฑ์กากพื้เฒ่า 40wt% และ ตะกอนสัจ (ปส.) 40wt% ก่อนผ่านการทดสอบการแช่น้ำ 90 วัน



ข การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์กากพื้เฒ่า และ ตะกอนสัจ (ปส.) หลังผ่านการทดสอบการแช่น้ำ 90 วัน

4.5.2 การเปลี่ยนแปลงของการทนทานต่อแรงกด

ผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเฝ้าที่อัตราส่วนผสมของกาก 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักร หลังผ่านการทดสอบการแช่น้ำ จะมีค่าการทนทานต่อแรงกด ดังนี้ 18.22, 19.87 และ 28.22 เมกะปาสกาล เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเฝ้าที่ไม่ผ่านการทดสอบแช่น้ำ พบว่า มีค่าลดลงประมาณ 11% – 32%

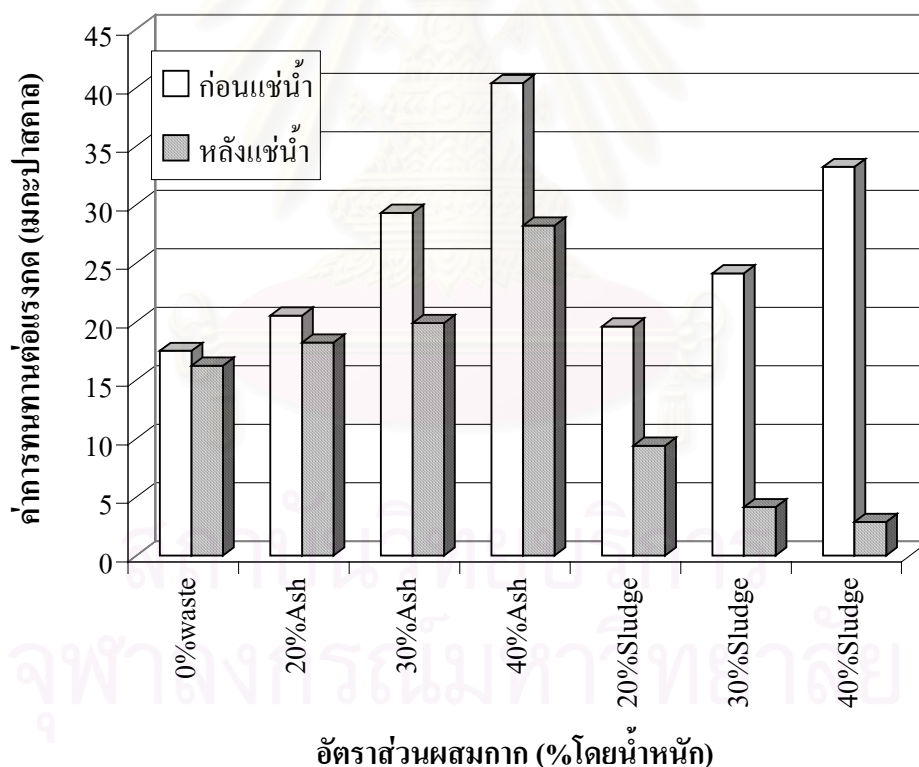
ผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 20% โดยน้ำหนักร หลังผ่านการแช่น้ำ จะมีค่าการทนทานต่อแรงกด 9.42 เมกะปาสกาล ซึ่งลดลงประมาณ 52% สำหรับ ผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 30% และ 40% โดยน้ำหนักร หลังผ่านการแช่น้ำ 47 วัน จะมีค่าการทนทานต่อแรงกด 4.14 และ 2.89 เมกะปาสกาลตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลง 83% - 91%

อย่างไรก็ตาม ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนึกทั้งหมดนี้หลังผ่านการทดสอบแช่น้ำ ก็ยังคงมีค่าสูงกว่า 0.41 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USNRC

จากตารางที่ 4-5 พบว่า ผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเฝ้ามีอัตราการลดลงของค่าการทนทานต่อแรงกดน้อยกว่าผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) เนื่องจาก ในผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเฝ้ามีความพรุนน้อยกว่า และประกอบด้วย เฝ้ามีคุณสมบัติเป็นวัสดุ pozzolan โดยมีส่วนประกอบหลัก คือ SiO_2 31.84 % โดยน้ำหนักร, Al_2O_3 16.26 % โดยน้ำหนักร และ CaO 12.95 % โดยน้ำหนักร ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Analysis เมื่อเฝ้าสัมผัสกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น free lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ Calcium silicate hydrate และ Calcium aluminate hydrate ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมเกาะ (Cementitious)

ตารางที่ 4-5 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน

ประเภทกาก	อัตราผสมของกาก (%โดยน้ำหนัก)	ค่าการทนทานต่อแรงกด (เมกะปาสกาล)	%ที่ลดลงของ ค่าการทนทานต่อแรงกด
ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (10%STX)	0%	16.25 ± 2.31	7.14 %
เถ้า	20%	18.22 ± 1.40	11.16%
	30%	19.87 ± 4.51	32.21%
	40%	28.22 ± 1.49	30.13%
ตะกอนสลัดจ์ (ปส.)	20%	9.41 ± 1.68	52.01%
	30%	4.14 ± 0.86	82.83%
	40%	2.89 ± 0.89	91.29%



รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทเถ้า และ ตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ก่อนและหลังแช่น้ำ 90 วัน

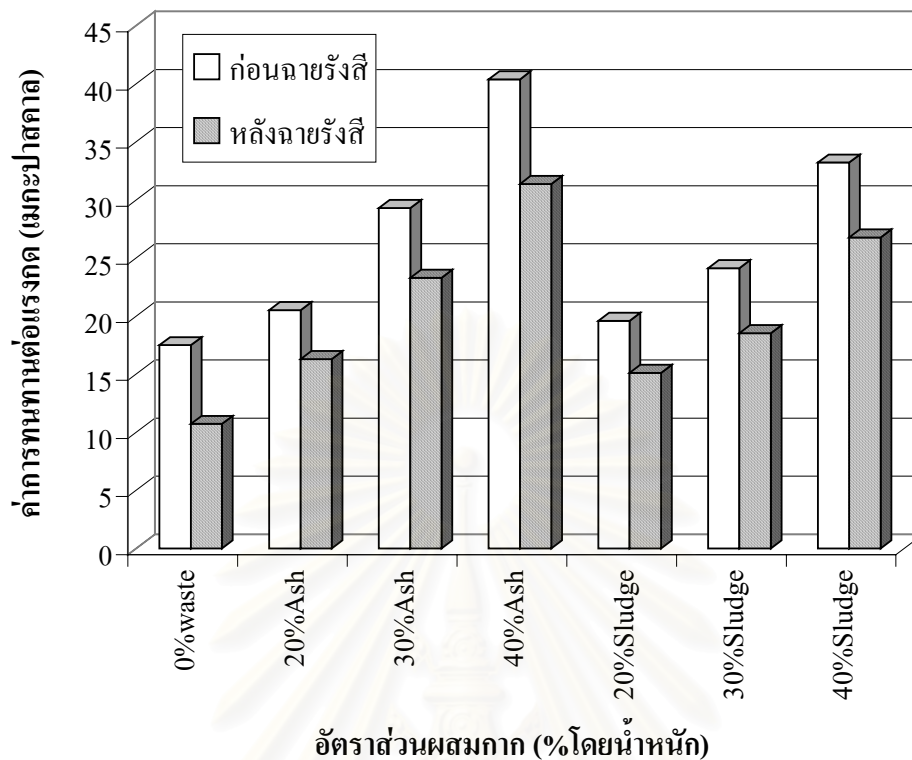
4.6 ผลการทดสอบความทนทานต่อรังสี

ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทเถ้าและตะกอนสลัดจ์หลังผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 10^8 rad (1 MGy) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกหลังผ่านการฉายรังสี 1 MGy

ประเภทกาก	อัตราผสมของกาก (%โดยน้ำหนัก)	ค่าการทนทานต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	%ที่ลดลงของ ค่าการทนทานต่อแรงกด
ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (10%STX)	0%	10.72 ± 1.87	38.72 %
เถ้า	20%	16.31 ± 1.40	20.46%
	30%	23.29 ± 3.36	20.54%
	40%	31.38 ± 1.72	22.31%
ตะกอนสลัดจ์ (พป.)	20%	15.13 ± 1.34	22.82%
	30%	18.55 ± 1.90	23.16%
	40%	26.77 ± 1.49	19.41%

พบว่า ผลิตภัณฑ์กากพริกทั้งสองประเภทมีค่าการทนทานต่อแรงกดลดลงโดยเฉลี่ย 20% แต่ก็ยังคงมีค่าสูงกว่า 3.5 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ถูกกำหนดโดย USNRC และหลังจากการฉายรังสีไม่พบรอยแตก รอยร้าว และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพใด ๆ บนตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากพริก ดังนั้นการที่ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกมีค่าลดลงนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ และ/หรือ ของกาก แต่เนื่องจากในการวิจัยนี้ไม่ได้มีการนำผลิตภัณฑ์กากพริกก่อนและหลังผ่านฉายรังสีไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล จึงไม่สามารถสรุปถึงสาเหตุของการลดลงของค่าการทนทานต่อแรงกดนี้ได้อย่างแน่ชัด



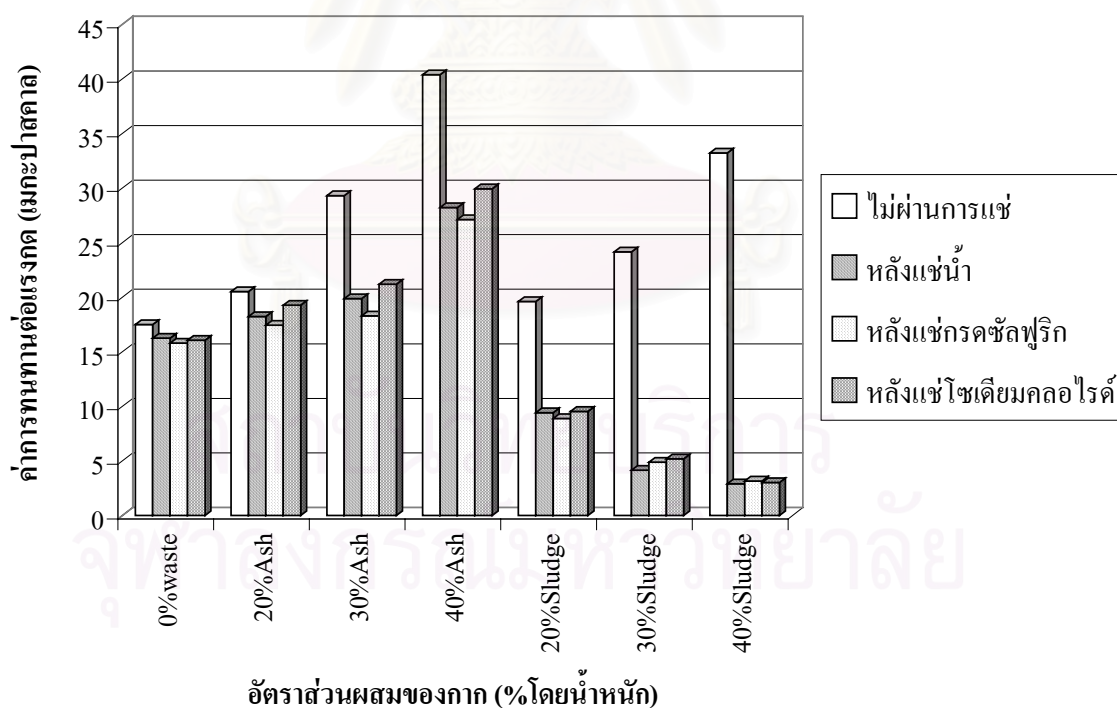
รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบค่าการทันทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากผนังประเภทเถ้าและตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ก่อนและหลังฉายรังสี 1 MGy

4.7 ผลการทดสอบการทันทานต่อสารเคมี

ผลิตภัณฑ์กากผนังประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมกาก 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก และผลิตภัณฑ์กากผนังประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 20% โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 10% และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10% นาน 56 วัน พบว่า ไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ แต่ในผลิตภัณฑ์กากผนังประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 30% และ 40% โดยน้ำหนัก หลังจากการแช่ในสารละลายทั้งสองชนิดแล้ว พบว่า บนผลิตภัณฑ์กากผนังเกิดรอยแตกและเกิดการบวมตัว ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกับผลิตภัณฑ์กากผนังที่ผ่านการทดสอบแช่น้ำ

ตารางที่ 4-7 เปรียบเทียบการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากหมักหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน, สารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10% นาน 56 วัน

ประเภทกาก	ค่าการทนทานต่อแรงกด (เมกะปาสกาล)		
	หลังการแช่น้ำ	หลังการแช่ H ₂ SO ₄	หลังการแช่ NaCl
0% กาก (10%STX)	16.25 ± 2.31	15.79 ± 2.00	16.05 ± 0.63
20% เถົ່	18.22 ± 1.40	17.43 ± 1.21	19.27 ± 1.48
30% เถົ່	19.87 ± 4.51	18.29 ± 2.69	21.18 ± 0.75
40% เถົ່	28.22 ± 1.49	27.10 ± 5.26	29.93 ± 1.95
20% ตะกอนสลัดจ์	9.41 ± 1.68	8.88 ± 1.09	9.54 ± 0.06
30% ตะกอนสลัดจ์	4.14 ± 0.86	4.87 ± 1.19	5.20 ± 0.63
40% ตะกอนสลัดจ์	2.89 ± 0.89	3.16 ± 0.71	3.03 ± 0.69



รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากหมักหลังผ่านการแช่น้ำ 90 วัน, สารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10% นาน 56 วัน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์กากฟนิกที่ผ่านการแช่ในสารละลายไปทดสอบการทนทานต่อแรงกด ค่าการทนทานต่อแรงกดมีค่าลดลงในทิศทางเดียวและมีค่าใกล้เคียงกับค่าการทนทานต่อแรงกดของ ผลิตภัณฑ์กากฟนิกที่ผ่านการแช่ในน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4-7 และกราฟในรูปที่ 4-9 แสดงว่า การที่ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ กากฟนิกหลังผ่านการแช่ในสารละลายมีค่าลดลง เป็นผล เนื่องมาจากการดูดซับน้ำของกากที่ถูกฟนิกอยู่เท่านั้น ไม่ได้เป็นผลมาจากการกระทำของสารละลายทั้งสอง

4.8 ผลการทนทานต่อการชะล้างโลหะหนัก

จากตารางที่ 4-8 พบว่า ปริมาณการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากฟนิกประเภทเอ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของกาก และมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย U.S. EPA เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมเดียวกันของผลิตภัณฑ์กากฟนิกประเภทเอ้า พบว่า ปริมาณการถูกชะล้างปรอทมีค่าน้อยกว่าปริมาณการชะล้างแคดเมียม และ ตะกั่ว ตามลำดับ เนื่องจากปรอท แคดเมียม และตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีอยู่ในกาก เมื่อถูกฟนิกด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะเกิดการจับตัวกับกำมะถันเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ ที่มีความเสถียรภาพสูง และมีความสามารถในการละลายต่ำ ความสามารถในการละลายของปรอทซัลไฟด์ มีค่าต่ำกว่าแคดเมียมซัลไฟด์ และ ตะกั่วซัลไฟด์ ตามลำดับ ดังนี้

ปรอทซัลไฟด์ (Hg ₂ S)	9.0×10^{-20}	มก./ล.
แคดเมียมซัลไฟด์ (Cd ₂ S)	6.7×10^{-10}	มก./ล.
ตะกั่วซัลไฟด์ (Pb ₂ S)	3.8×10^{-9}	มก./ล.

เป็นผลให้ตะกั่วสามารถชะล้างออกมาจากผลิตภัณฑ์กากฟนิกได้มากกว่าแคดเมียม และ ปรอท ตามลำดับ

ตารางที่ 4-8 ปริมาณการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากฟนิกประเภทเอ้า

โลหะหนัก	ปริมาณการชะล้าง (มก./ล.)			เกณฑ์มาตรฐาน
	อัตราส่วนผสมกากประเภทเอ้า (%โดยน้ำหนัก)			
	20%	30%	40%	
ปรอท (มก./ล.)	0.031	0.035	0.050	0.2
แคดเมียม (มก./ล.)	0.052	0.055	0.071	1.0
ตะกั่ว (มก./ล.)	0.177	0.183	0.300	5.0

จากตารางที่ 4-9 พบว่า ปริมาณการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากฝักรูปประเภทตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียของสำนักงานประมาณเพื่อสันติ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของกาก และเกือบทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย U.S. EPA มีเพียงปริมาณการชะล้างตะกั่วจากผลิตภัณฑ์กากฝักรูปประเภทตะกอนสลัดจ์ที่อัตราส่วนผสมของกาก 40% เท่านั้นที่มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมเดียวกันของผลิตภัณฑ์กากฝักรูปประเภทตะกอนสลัดจ์นี้ พบว่า ปริมาณการชะล้างปรอทมีค่าน้อยกว่าปริมาณการชะล้างแคดเมียม และ ตะกั่ว ตามลำดับ เนื่องมาจากความสามารถในการละลายของโลหะประเภทนั้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

ตารางที่ 4-9 ปริมาณการชะล้างโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กากฝักรูปประเภทตะกอนสลัดจ์

โลหะหนัก	ปริมาณการชะล้าง (มก./ล.)			เกณฑ์มาตรฐาน
	อัตราส่วนผสมตะกอนสลัดจ์ (ปส.) (%โดยน้ำหนัก)			
	20%	30%	40%	
ปรอท (มก./ล.)	0.058	0.075	0.093	0.2
แคดเมียม (มก./ล.)	0.097	0.108	0.202	1.0
ตะกั่ว (มก./ล.)	1.909	2.661	5.254	5.0

4.9 ผลการทดสอบความทนทานต่อการชะล้างนิวไคลด์กัมมันตรังสี

การทนทานต่อการชะล้างของนิวไคลด์รังสีสามารถพิจารณาจาก

4.9.1 ดัชนีการชะล้าง (Leachability Index; L) เป็นค่าที่เทียบการชะล้างของนิวไคลด์รังสีตามทฤษฎี Mass-transport theory ซึ่งมีค่าผกผันกับ logarithm ของสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusion; D) นั่นคือ ถ้าค่าดัชนีการชะล้างมีค่าสูงขึ้น ปริมาณของนิวไคลด์รังสีก็จะถูกชะออกมาจากผลิตภัณฑ์กากฝักรูปในระดับที่ต่ำลง^{[7][29]}

จากตารางที่ 4-10 ซึ่งแสดงค่าดัชนีการชะล้างของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฝักรูปที่ได้จากการวิจัยนี้ พบว่า ผลิตภัณฑ์กากฝักรูปประเภทแก้ว และ ประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) มีค่าดัชนีการชะล้างของ Cs-137 สูงกว่า 6.0 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USNRC แสดงให้เห็นว่า ปริมาณนิวไคลด์รังสีในผลิตภัณฑ์กากฝักรูปถูกชะออกมาในระดับที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนด ซึ่งเป็นระดับที่ปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังพบว่า ดัชนีการชะล้างของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฝักรูปประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) มีค่าลดลงตามปริมาณกากที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า

ว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของตะกอนสลัดจ์ (ปส.) เพิ่มขึ้น นิวไคลด์รังสีก็จะถูกชะออกมาในปริมาณที่มากขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากกลไกการแพร่ของสารซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวสัมผัสของตัวอย่าง โดย นิวไคลด์รังสีจะเกิดการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของนิวไคลด์รังสีสูง (บริเวณผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์กากผงนึ่ง) ไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นของนิวไคลด์รังสีต่ำ (น้ำชะ หรือ Leachant) ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนผสมของกากจึงมีผลให้กากบริเวณผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์กากผงนึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น และ นิวไคลด์รังสีจึงสามารถแพร่ออกสู่น้ำชะได้มากขึ้น

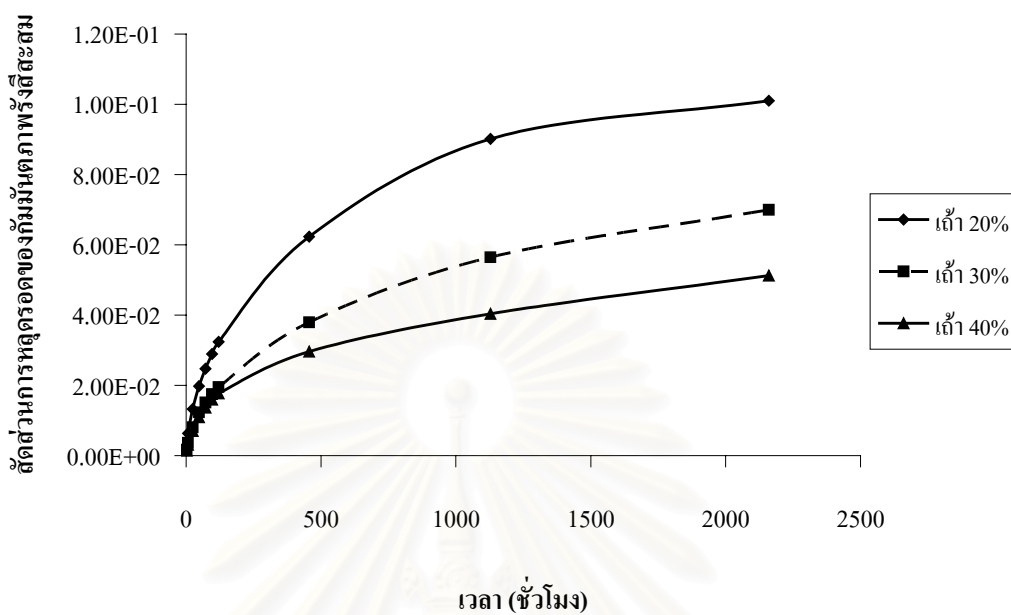
ในทางตรงกันข้าม ดัชนีการชะล้างของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากผงนึ่งประเภทนี้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจาก ใต้มีคุณสมบัติเป็น pozzolan จึงสามารถหน่วงรังสีนิวไคลด์รังสีได้ ยิ่งเพิ่มปริมาณแล้วความสามารถในการหน่วงรังสีก็จะเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4-10 ดัชนีการชะล้างของผลิตภัณฑ์กากผงนึ่งที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

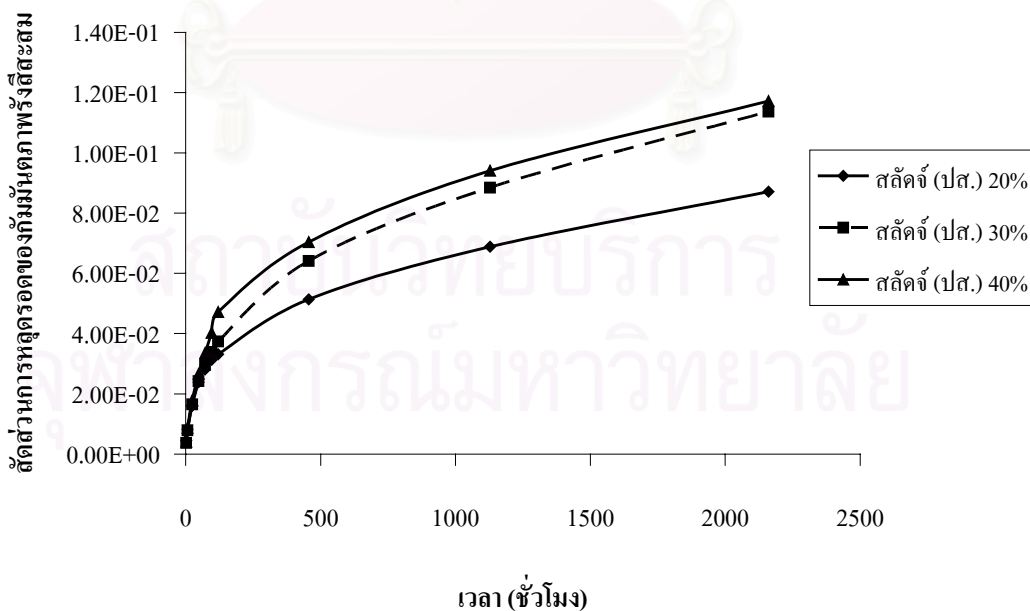
ประเภทของกาก	อัตราส่วนผสมของกาก (%โดยน้ำหนัก)	ดัชนีการชะล้างของ Cs-137
เถ้า	20%	9.61
	30%	9.99
	40%	10.16
ตะกอนสลัดจ์ (ปส.)	20%	9.67
	30%	9.48
	40%	9.35

4.9.2 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสม (Cumulative activity released fraction) เป็นสัดส่วนของปริมาณนิวไคลด์รังสีที่หลุดออกมาจากผลิตภัณฑ์กากผงนึ่งในระยะเวลาต่าง ๆ ในช่วง 3 เดือน เทียบกับ ปริมาณนิวไคลด์รังสีเริ่มต้นทั้งหมดที่มีในผลิตภัณฑ์¹⁷⁾ ค่าสัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีสะสม ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

จากรูปที่ 4-10 และ 4-11 พบว่า ความชันของกราฟมีค่าสูงที่สุดในช่วง 120 ชั่วโมงแรก (5 วัน) หลังจากนั้นความชันของกราฟจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการแพร่หรือการหลุดรอดของนิวไคลด์รังสีในทุกชั้นผลิตภัณฑ์กากผงนึ่งมีลักษณะคล้ายกัน คือ ในช่วงระยะ 5 วันแรก ตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 1 จนถึงช่วงเวลาที่ 7 การแพร่ของนิวไคลด์รังสีออกจากผลิตภัณฑ์กากผงนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก หลังจากนั้นสัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตรังสีจะมีแนวโน้มลดลงจนเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นผลดีต่อการฝังกลบกากกัมมันตรังสี เพราะ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งการแพร่ของนิวไคลด์รังสีออกสู่สิ่งแวดล้อมจะไม่สูงเพิ่มขึ้นอีก



รูปที่ 4-10 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสมของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์
กากหนักประเภทน้ำมัน



รูปที่ 4-11 สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสมของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์
กากหนักประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.)

4.10 ผลการเติมสารเสริมความแข็งแรง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองเติมสารเสริมความแข็งแรงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์กากผงในอัตราส่วนผสม 0.5% โดยน้ำหนัก โดยเลือกใช้วัสดุประเภทไฟเบอร์กลาส มาเติมลงในผลิตภัณฑ์กากผงประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสม 40% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อทำการทดลองผสมไฟเบอร์กลาสลงไปพบว่าส่วนผสมที่ได้ที่มีความเหนียวเกินไปจนไม่สามารถทำการกวนผสมได้ จึงได้ทำการลดอัตราส่วนผสมของกากลงเป็น 30% โดยน้ำหนัก และ 25% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนผสมของกากที่สามารถทำให้การปฏิบัติงานดำเนินไปได้อย่างสะดวก คือ 25% โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการทดลองเติมสารเสริมความแข็งแรงจึงเลือกเตรียมผลิตภัณฑ์กากผงที่มีอัตราส่วนผสมของกาก 25% โดยน้ำหนัก

จากผลการสังเกต พบว่า ไฟเบอร์กลาสที่มีขนาดเป็นเส้นฝอยเล็ก ๆ ที่ถูกผสมลงในระหว่างการกวนผสม จะไปขัดขวางการกวนผสมเนื่องจากทำให้ส่วนผสมเกิดการจับกันเป็นก้อน และเมื่อเวลาผ่านไปของผสมที่ได้จะเริ่มหลอมเหลวอีกครั้งไม่เกิดการจับกันเป็นก้อน แต่ไฟเบอร์กลาสส่วนใหญ่จะเกิดการแยกชั้นลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของส่วนผสม ทำให้ผลิตภัณฑ์กากผงที่ได้ไม่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

สำหรับการวางไฟเบอร์กลาสในแบบหล่อคล้ายกับลักษณะของการใส่เหล็กเส้นเพื่อเสริมแรงในงานคอนกรีต ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.4.7 พบว่า ไฟเบอร์กลาสที่วางไว้ในแบบหล่อไม่จับตัวกับส่วนผสมที่ถูกเทลงมา และยังส่งผลให้เกิดโพรงตรงบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์กากผง

การไม่จับตัวกันของชิ้นไฟเบอร์กลาสทั้ง 3 รูปแบบ กับ ส่วนผสมอื่นๆ จะเป็นผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างผลิตภัณฑ์กากผงถูกทำลาย ดังนั้นในขั้นตอนการทดลองต่อไปจึงไม่มีการนำไฟเบอร์กลาสมาเติมเพื่อเป็นสารเสริมแรง

4.11 ผลการเติมสารต้านทานการชะล้างโลหะหนัก

ในการทดลองนี้มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งเป็นสารที่ใช้เป็นตัวต้านทานการถูกชะล้างของโลหะหนักในหลายงานวิจัย ลงไปในผลิตภัณฑ์กากผงในอัตราส่วนผสม 7% โดยน้ำหนัก โดยเลือกผสมโซเดียมซัลไฟด์ลงในผลิตภัณฑ์กากผงที่มีอัตราส่วนผสมของกาก 40% โดยน้ำหนัก เนื่องจากผลิตภัณฑ์กากผงหลังจากปล่อยให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าผิวของเหลวสีน้ำตาลเหลืองซึมออกมาบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์กากผง และเฉพาะที่บริเวณผิวของของเหลวที่ซึมออกมาจะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นผลึก ดังรูปที่ 4-11 เมื่อทำการเขี่ยผลึกและของเหลวที่เกิดขึ้นให้หมดไปและปล่อยให้ผลิตภัณฑ์กากผงตั้งทิ้งไว้อีกครั้งพบว่าเกิดปรากฏการณ์ดังเช่นเดิม จึงได้

นำผลิตภัณฑ์กากฉนิกที่ได้นำไปทดลองแช่ในน้ำเพื่อดูการชะละลายเบื้องต้น จากการสังเกตพบว่าของเหลวสีเหลืองได้ถูกชะออกมาตลอดเวลา

ดังนั้นจึงสรุปในเบื้องต้นว่าโซเดียมซัลไฟด์ที่เติมลงไปมีปริมาณมากเกินไปทำให้โซเดียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่เหลืออยู่ โซเดียมซัลไฟด์นี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ดังนั้น เมื่อมีความชื้นซึมไปตามรูพรุนโซเดียมซัลไฟด์จะละลายออกมาตามรูพรุน สังเกตได้จากของเหลวสีน้ำตาลที่ซึมออกมาตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่า การเติมโซเดียมซัลไฟด์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักลงในผลิตภัณฑ์กากฉนิกที่เตรียมได้จากซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่ได้จากการผสมกับของผงกำมะถัน กับ STX™ นี้ อาจมีปริมาณมากเกินไป



รูปที่ 4-12 ผลิตภัณฑ์กากฉนิกที่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้ได้นำวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่มีการใช้ในงานก่อสร้างนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งเป็นการวิจัยที่ยังไม่เคยมีการทำมาก่อนในระดับนานาชาติ โดยวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการทำปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างกำมะถัน กับ สารตัดแปรสมบัติ STX™ ที่อัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก มีค่าการทนทานต่อแรงกดประมาณ 17.50 เมกะปาสคาล ผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่ได้ถูกนำไปใช้ผลิตกากของเสียอันตรายและกากกัมมันตรังสีผสมประเภทต่าง ๆ

ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกาก คือ ขนาดอนุภาคของกาก ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคของกากไม่มีผลต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์กากผสม และ อัตราส่วนผสมของกากประเภทต่าง ๆ ซึ่งผลการวิจัย สามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1 กากของเสียอันตราย (Hazardous waste)

กากของเสียอันตรายประเภทตะกอนสลัดจ์ (GENCO) มีความหนาแน่น 0.2054 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งมี clay เป็นองค์ประกอบ เมื่อนำมาผสมด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ในอัตราส่วนผสมของกาก 20%, 25%, 28% และ 35% โดยน้ำหนัก จะได้ผลิตภัณฑ์กากผสมที่มีค่าการทนทานต่อแรงกดทุกชิ้นงานสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USNRC แต่มีค่าต่ำกว่าค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ที่ ไม่มีการเติมกาก และมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนผสมของกากที่เพิ่มขึ้น

ถึงแม้ว่า ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากผสมประเภทตะกอนสลัดจ์ (GENCO) จะมีค่ามากกว่ามาตรฐานซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 0.41 เมกะปาสคาล แต่เนื่องจากกากประเภทนี้มีองค์ประกอบของ clay ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถดูดซับน้ำได้ดี ดังนั้น ถ้าผลิตภัณฑ์กากผสมมีโอกาสได้สัมผัสกับความชื้นหรือน้ำเป็นเวลานาน อนุภาคของ clay ที่ไม่ได้ถูกผนึกอย่างสมบูรณ์ จะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ทำให้ผลิตภัณฑ์กากผสมบวมและแตก และอาจส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากผสมมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.41 เมกะปาสคาล

จากเหตุผลข้างต้น ทำให้กากของเสียอันตรายประเภทตะกอนสลัดจ์ที่มี clay เป็นองค์ประกอบไม่เหมาะสมต่อการนำไปผสมด้วยวัสดุประเภทซัลเฟอร์โพลีเมอร์

ถึงแม้ว่า กากประเภทตะกอนสลัดจ์ (GENCO) จะถูกใช้เป็นตัวแทนกากของเสียอันตรายในงานวิจัยนี้ ก็ไม่ได้หมายความว่า วัสดุประเภทซัลเฟอร์โพลีเมอร์ไม่เหมาะสมต่อการนำไปผสมกากของเสียอันตรายทุกประเภท เนื่องจาก เมื่อนำซัลเฟอร์โพลีเมอร์ไปผสมกากประเภทอื่น ๆ และ

ตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกากของเสียอันตรายประเภทหนึ่งเพราะสามารถแผ่กัมมันตภาพรังสีและมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ จะได้ผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

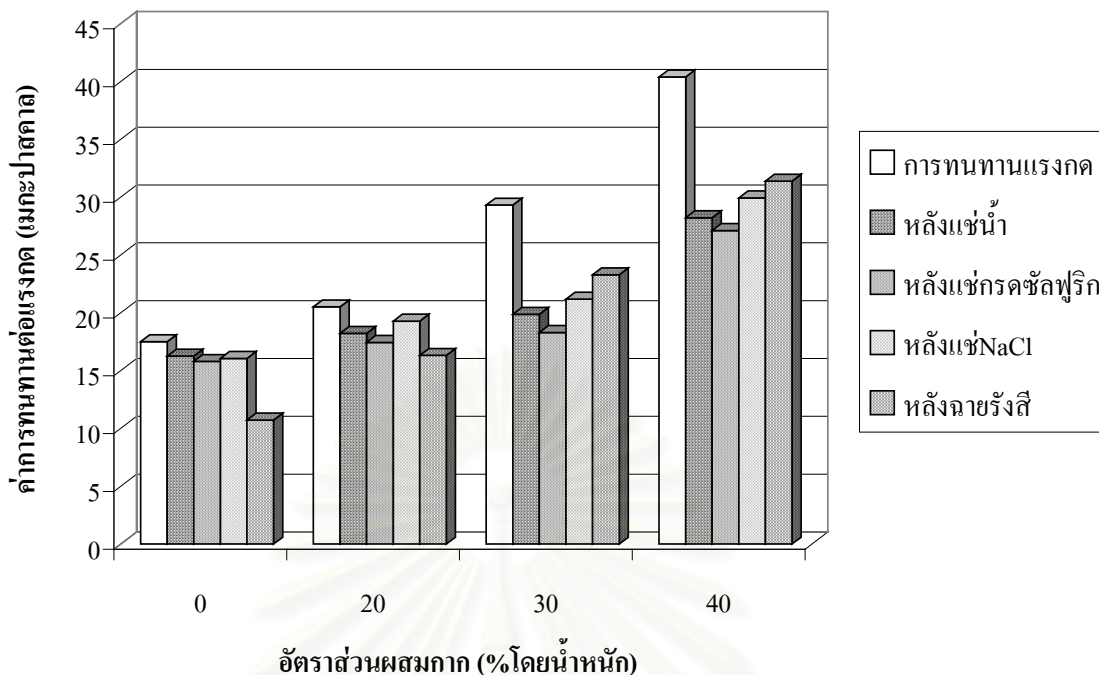
5.2 กากกัมมันตรังสีผสม (Radioactive mixed waste)

กากกัมมันตรังสีผสมเป็นกากกัมมันตรังสีที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่

5.2.1 กากประเภทเถ้า (Incinerator ash)

กากประเภทเถ้าที่ใช้ในการวิจัยมีความหนาแน่น 0.2379 กรัม/ลบ.ซม. และเป็นวัสดุ pozzolan ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมเกาะ ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนผสมของกากประเภทเถ้าในผลิตภัณฑ์กากฉนีกมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์กากฉนีกมีค่าการทนทานต่อแรงกดเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของกาก แต่เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการผลิต จึงทำให้ฉนีกกากประเภทเถ้าได้ที่อัตราส่วนผสมของกากสูงสุด 40% โดยน้ำหนักเท่านั้น โดยผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่ได้มีค่าการทนทานต่อแรงกดประมาณ 40.39 เมกะปาสคาล ถ้ามีการปรับปรุงกระบวนการผลิต คาดว่าสามารถเพิ่มอัตราส่วนผสมของกากได้สูงกว่า 40% โดยน้ำหนัก

ผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าทุกอัตราส่วนผสม หลังผ่านการทดสอบการแช่น้ำ การทนทานต่อรังสี และการทนทานต่อสารเคมี พบว่า ผลิตภัณฑ์กากฉนีกมีค่าการทนทานต่อแรงกดลดลงประมาณ 11-30% โดยความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนผสมของกากที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5-1 แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์กากฉนีกที่ผ่านการทดสอบข้างต้นยังคงมีค่าการทนทานต่อแรงกดสูงเกินกว่า 0.41 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดโดย USNRC ในการจัดเก็บ และ จัดทิ้งกากกัมมันตรังสี



รูปที่ 5-1 การลดลงของค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทเจ้าหลังผ่านการทดสอบต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติการทนทานต่อการชะล้างโลหะหนักและสารกัมมันตรังสี พบว่าโปรอท แคลเมียม และ ตะกั่ว มีปริมาณถูกชะออกมาสูงขึ้นตามอัตราส่วนผสมของกาก แต่ยังคงต่ำกว่าค่ามาตรฐานซึ่งกำหนดโดย USEPA แสดงว่า กากของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสามารถถูกพริกได้ดีด้วยวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ โดยจะจับตัวกับกำมะถันเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ที่มีความเสถียรภาพสูง จึงถูกชะออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก

ดัชนีการชะล้างซึ่งแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Cs-137 จากผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทเจ้าทุกอัตราส่วนผสม มีค่า 9.61 – 10.16 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย USNRC แสดงว่า ผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์สามารถหน่วงรั้งการหลุดรอดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากกากประเภทเจ้าได้ดี

จากผลการทดสอบคุณสมบัติข้างต้นทั้งหมด สรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมสูงสุดของกากประเภทเจ้าที่สามารถพริกด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ คือ 40%โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกจำกัดโดยขีดความสามารถของกระบวนการผลิต และจากงานวิจัยที่ผ่านมา^{[7][12][13]} พบว่า อัตราส่วนผสมสูงสุดของกากประเภทเจ้าที่สามารถพริกด้วยซีเมนต์และโพลีเอทีลีนมีค่าเท่ากัน คือ 40%โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 5-1 แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์กากพริกของซีเมนต์และโพลีเอทีลีนที่ได้จะมีค่าการทนทานต่อแรงกดต่ำกว่าผลิตภัณฑ์กากพริกของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5-2

5.2.2 กากประเภทตะกอนสลัดจ์ (จากระบบบำบัดน้ำเสีย สำนักงานประมาณเพื่อสันติ)

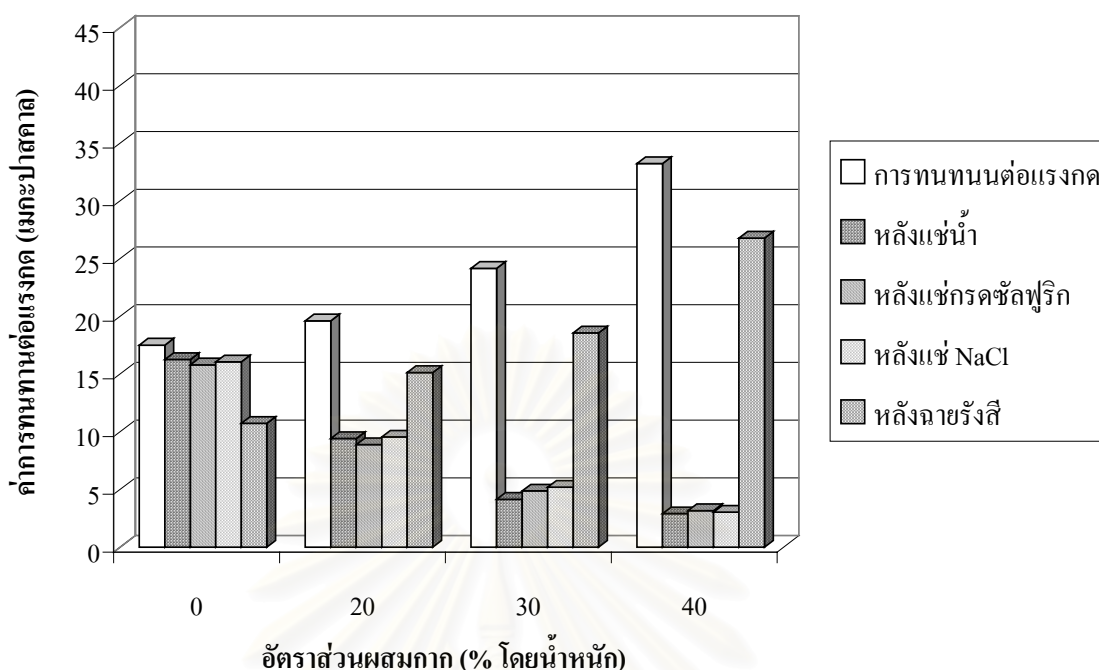
กากตะกอนสลัดจ์ (ปส.) มีความหนาแน่น 0.9541 กรัม/ลบ.ซม. มีคุณสมบัติดูดซับความชื้นได้ดี เมื่อนำมาผึ่งด้วยวัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ จะได้ผลิตภัณฑ์กากผึ่งที่มีค่าการทนทานต่อแรงกดสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของกากเช่นเดียวกับกากประเภทเถ้า และ ค่าการทนทานต่อแรงกดลดลง ประมาณ 19% - 90% หลังจากที่ผ่านมาการทดสอบการแช่น้ำ การทนทานต่อสารเคมี และการทนทานต่อรังสี แต่ยังคงสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ (0.41 เมกะปาสคาล) ที่กำหนดโดย USNRC ดังแสดงในรูปที่ 5-2

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติการทนทานต่อการถูกชะโลหะหนักและสารกัมมันตรังสีจากผลิตภัณฑ์กากผึ่งประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ทุกอัตราส่วนผสมของกาก พบว่า โปรท แคมเมียม และ ตะกั่ว ถูกชะออกมาในระดับที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานซึ่งกำหนดโดย USEPA ยกเว้น ที่อัตราส่วนผสมของกาก 40% โดยน้ำหนัก มีปริมาณตะกั่วถูกชะออกมาสูงกว่าเกณฑ์ ดังนั้น ที่อัตราส่วนผสมนี้ จึงไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ดัชนีการชะล้างซึ่งแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Cs-137 ของทุกชิ้นงานมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย USNRC แสดงว่า ผลิตภัณฑ์ซัลเฟอร์โพลีเมอร์สามารถหน่วงรั้งการหลุดรอดของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากกากประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ได้ดี

จากผลการทดสอบคุณสมบัติข้างต้นทั้งหมด สรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมสูงสุดของกากประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่เหมาะสมต่อการผึ่งด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ คือ 20% โดยน้ำหนัก เพราะ ในระหว่างการทดสอบการแช่น้ำ และทดสอบการทนทานต่อสารเคมี ผลิตภัณฑ์กากผึ่งที่อัตราส่วนผสมของกาก 30% และ 40% โดยน้ำหนัก เกิดการบวมตัวในแนวแกนและเกิดรอยแตกซึ่งในทางปฏิบัติอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อภาชนะบรรจุกากได้ ดังนั้น วัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาผึ่งกากตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่มีอัตราส่วนผสมของกากเกิน 20% โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์กากผึ่งที่ได้ทั้งหมดจะให้ค่าการทนทานต่อแรงกดสูงกว่าขั้นต่ำของเกณฑ์มาตรฐานหลังผ่านการทดสอบต่าง ๆ แล้วก็ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-2 การลดลงของค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทตะกอน
สลัดจ์ (พป.) หลังผ่านการทดสอบต่าง ๆ

5.2.3 กากประเภทเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้แล้ว

กากประเภทเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้แล้ว มีความหนาแน่น 0.6341 กรัม/ลบ.ซม. มี
ไขมันและดูดความชื้นได้ดี ดังนั้น เมื่อผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทเรซินได้สัมผัสกับน้ำหรือ
ความชื้นในบรรยากาศ จะเกิดการบวมและแตกตัว เป็นผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างของ
ผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทเรซิน ถูกทำลายอย่างสิ้นเชิง และประกอบกับการที่เรซินมีไขมันไม่
สามารถเกิดการจับตัวหรือเกาะกับเนื้อของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ได้ จึงทำให้เรซินไม่เหมาะสมที่จะทำ
การพื้กด้วยวัสดุพื้กประเภทซัลเฟอร์โพลีเมอร์ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา เรซินสามารถถูก
พื้กในวัสดุพื้กประเภทซีเมนต์ และ โพลีเอทีลิน ที่อัตราส่วนผสมของกาก เท่ากับ 13% และ
30% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบอัตราส่วนผสมสูงสุดของกากประเภทต่าง ๆ ที่สามารถพ่นได้ในวัสดุพ่นีกากประเภทซัลเฟอร์โพลีเมอร์, ซีเมนต์ และ โพลีเอทีลีน

วัสดุพ่นีกาก	อัตราส่วนผสมของกาก (%โดยน้ำหนัก)		
	เถ้า	ตะกอนสลัดจ์	เรซินแลกเปลี่ยนไอออน
ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ (by STX™)	40%	20%	ไม่เหมาะสม
CHEMENT2000 ^{[12][13]}	43%	ไม่พบข้อมูล	ไม่เหมาะสม
ซีเมนต์ ^[7]	40%	ไม่พบข้อมูล	13%
โพลีเอทีลีน ^[7]	40%	50%	30%

จากตารางที่ 5-1 พบว่า ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่เตรียมได้จาก STX™ มีความสามารถในการพ่นีกากประเภทเถ้าได้ดีเท่ากับวัสดุพ่นีกากประเภทอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นผลจากขีดจำกัดของกระบวนการผลิต ถ้ามีการปรับปรุงกระบวนการผลิตอาจสามารถพ่นีกากประเภทเถ้าในอัตราส่วนผสมที่มากกว่า 40% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาที่กากประเภทเรซิน พบว่า วัสดุพ่นีกากประเภทซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ทั้งที่เตรียมได้จากในงานวิจัยนี้ (เตรียมจาก STX™) และ จากงานวิจัยที่ผ่านมา (CHEMENT2000) ไม่เหมาะสมต่อการนำไปพ่นีกากประเภทเรซิน ในขณะที่วัสดุพ่นีกากประเภทซีเมนต์และโพลีเอทีลีนสามารถพ่นีกากประเภทเรซินที่อัตราส่วนผสมของกาก 13% และ 30% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

สำหรับอัตราส่วนผสมของกากประเภทตะกอนสลัดจ์ในวัสดุพ่นีกากประเภทต่าง ๆ ไม่สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจาก กากประเภทตะกอนสลัดจ์ที่ใช้ในแต่ละงานวิจัยมีความหลากหลายแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวิธีการและสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน

ถึงแม้ว่า ซัลเฟอร์โพลีเมอร์จะพ่นีกากได้ในอัตราส่วนผสมที่ใกล้เคียงหรืออาจจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพ่นีกากประเภทอื่น ๆ แต่ที่อัตราส่วนผสมของกากเท่ากันและกากชนิดเดียวกัน ผลติภัณฑ์กากพ่นีกของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ จะมีค่าการทนทานต่อแรงกดสูงกว่าผลติภัณฑ์กากพ่นีกของวัสดุพ่นีกากประเภทอื่น ๆ หลายเท่า ดังแสดงในตารางที่ 5-2

เมื่อพิจารณาที่ความสามารถในหน่วงรั้งหรือความสามารถด้านการชะล้างโลหะหนัก พบว่า โลหะหนักที่ถูกพ่นีกอยู่ในผลติภัณฑ์กากพ่นีกของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ถูกชะออกมาใน

ปริมาณที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด ดังผลการทดลองในข้อที่ 4.8 ทั้งนี้เนื่องจาก ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบหลัก กำมะถันเหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนของโลหะซัลไฟด์ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ ดังนั้นซัลเฟอร์โพลีเมอร์จึงเหมาะสมต่อการนำไปพ่นกากที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจากตารางที่ 5-2 พบว่า วัสดุพ่นกากประเภทซีเมนต์ไม่เหมาะสมต่อการนำไปพ่นกากที่มีโลหะหนักประเภท พรอท และ ตะกั่ว ในระดับความเข้มข้นสูง ส่วนวัสดุโพลีเอทีลินไม่พบว่ามีกานนำไปพ่นกากของเสียอันตราย

จากผลการทดลองการทนทานต่อรังสี พบว่า ผลิตรกัณฑ์กากพ่นกาทุกอ้อตราส่วนผสมในซัลเฟอร์โพลีเมอร์ มีความสามารถทนทานต่อรังสีปริมาณ 10^8 rad (1MGy) ได้ ดังนั้น จึงสามารถใช้ซัลเฟอร์โพลีเมอร์ไปพ่นกากกัมมันตรังสีที่มีปริมาณรังสีเท่ากับหรือมากกว่า 10^8 rad จากตารางที่ 5-2 พบว่า วัสดุประเภทโพลีเอทีลินไม่เหมาะสมต่อการนำไปพ่นกากที่มีปริมาณรังสีมากกว่า 10^8 rad

ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบคุณภาพของผลิตรกัณฑ์กากพ่นกาทุกอ้อตราส่วนผสมด้วยวัสดุพ่นกากประเภทต่าง ๆ ^[31]

วัสดุพ่นกาก	ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตรกัณฑ์กากพ่นกาก (psi)	อัตราส่วนผสมกากสูงสุดที่สามารถพ่นได้ (%โดยน้ำหนัก)	หมายเหตุ
ซัลเฟอร์โพลีเมอร์	4000	40% – 55%	ไม่เหมาะกับกากประเภทเรซิน เหมาะกับกากที่มีโลหะหนักปนเปื้อน
ซีเมนต์	1000	ถ้ากากมีองค์ประกอบของโลหะหนัก จะทำให้พ่นกากได้ในอัตราส่วนผสมของกากต่ำ	ไม่เหมาะกับกากที่มี Hg, Pb, Na, Cl ระดับความเข้มข้นสูง
โพลีเอทีลิน	2500	20% - 70%	ไม่เหมาะกับกากกัมมันตรังสีที่ให้ปริมาณรังสี มากกว่า 10^8 rad และยังไม่มีการทดสอบกับกากที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

จากผลการทดลองและคุณสมบัติข้างต้นของซัลเฟอร์โพลีเมอร์ที่เตรียมได้จาก STX™ ในงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่า วัสดุซัลเฟอร์โพลีเมอร์มีความเหมาะสมต่อการนำไปพ่นีกากกัมมันตรังสีผสมซึ่งมีทั้งองค์ประกอบของนิวไคลด์รังสีและโลหะหนัก อีกทั้ง ในกระบวนการพ่นีกากด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ไม่จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดถังและอุปกรณ์กวนผสมหลังจากปฏิบัติงานเสร็จเรียบร้อย ทำให้ไม่มีกากของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการพ่นีกากด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ ในทางตรงกันข้าม กระบวนการพ่นีกากโดยใช้วัสดุพ่นีกากประเภทอื่นจำเป็นต้องทำความสะอาดอุปกรณ์ทุกครั้งหลังปฏิบัติงานเสร็จ ทำให้เกิดกากของเสียอันดับสอง (Secondary waste) ที่ปนเปื้อนด้วยนิวไคลด์รังสี

กระบวนการพ่นีกากที่ได้ดำเนินการวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้งานได้ทันที และสามารถขยายงานเป็นระดับ pilot scale ได้ ดังนั้น จึงเป็นทางเลือกทางหนึ่งเพื่อใช้ในการพ่นีกากกัมมันตรังสีและกากของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย

5.3 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการพ่นีกากด้วยซัลเฟอร์โพลีเมอร์ จึงขอเสนอแนะแนวทาง ดังนี้

- ในระบบกวนและผสมกาคควรทำการติดตั้งอุปกรณ์ระบายอากาศ เพื่อที่จะสามารถกำจัดไอน้ำที่หลงเหลืออยู่ในส่วนผสมให้หมดไป และเพื่อความปลอดภัยในระหว่างการปฏิบัติงาน
- ควรมีการปรับปรุงรูปร่างและขนาดของใบพัดกวนผสม รวมทั้งควรเพิ่มกำลังการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งอาจมีผลต่อการเพิ่มอัตราส่วนผสมของกาคให้สูงขึ้น
- ในระหว่างที่ผลิตภัณฑ์กาคพ่นีกำลังเย็นและแข็งตัว ควรจะหาวิธีการทำให้ผลิตภัณฑ์กาคพ่นีก่อๆ ลดอุณหภูมิลง เช่น การนำผลิตภัณฑ์กาคพ่นีกที่ยังอยู่ในแบบหล่อไปใส่ในตู้อบ และค่อยๆ ลดอุณหภูมิของตู้อบลง
- ควรมีการนำสารเสริมความแข็งแรง และ สารต้านทานการถูกชะล้างของโลหะหนักประเภทอื่น นอกเหนือจากไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาทดลองเติมลงในผลิตภัณฑ์กาคพ่นีก
- เมื่อนำกาคไปอบเพื่อกำจัดน้ำออกจากองค์ประกอบของกาค หลังจากนำกาคออกจากตู้อบตัวอย่างแล้ว ควรจะนำกาคไปทำการพ่นีกทันที หรืออาจเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อป้องกันไม่ให้กาคดูดความชื้นก่อนที่จะถูกนำไปทดลองพ่นีก
- ควรมีการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของโลหะหนักก่อนและหลังการพ่นีกในซัลเฟอร์โพลีเมอร์ เพื่อบ่งบอกให้แน่ชัดว่า โลหะหนักเหล่านี้จับตัวกันอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ หรือ โลหะซัลไฟด์

- หลังการทดสอบการทนทานต่อสารเคมี ควรนำสารละลายกรดซัลฟูริก และ สารละลาย โซเดียมคลอไรด์ ไปทดสอบหาปริมาณการถูกชะของสารรังสี

5.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการวิจัย

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)*
1. ค่าสารเคมี	30,000
2. ค่าวัสดุอุปกรณ์ชุดกวนผสม	40,000
3. ค่าเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	10,000
4. ค่าแบบหล่อ/ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กากผนัง	10,000
5. ค่าทดสอบ/วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์กากผนัง	60,000
6. ค่าฉายรังสีตัวอย่าง	30,000
7. ค่าจัดทำวิทยานิพนธ์	10,000
8. เบ็ดเตล็ด	10,000
รวมทั้งสิ้น	200,000

หมายเหตุ*สนับสนุน โดยงบประมาณทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท-เอก

ในสถาบันอุดมศึกษาของรัฐ ทบวงมหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2544 จำนวน 78,750 บาท

และ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 13,600 บาท

** ได้รับการอนุเคราะห์สารรังสีมาตรฐานจากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

*** ได้รับความอนุเคราะห์สนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทดสอบการทนทานต่อแรงกด

**** ได้รับการอนุเคราะห์ฉายรังสีจากบริษัท ไอโซตรอน (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารอ้างอิง

1. กองขจัดกากกัมมันตรังสี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. รายงานประจำปี 2541 – 2542. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. กรุงเทพฯ : 2544.
2. บริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำกัด (มหาชน). ข้อมูลโครงการ. สำนักงานกำจัดกากอุตสาหกรรมมาบตพุด. จังหวัดระยอง : 2541.
3. Kalb, P., and others. Encapsulation Fly-Ash-Contaminated Mixed Waste with Sulfur Polymer [Online]. The US Department of Energy, 1995. Available form: http://www.bnl.gov/techxfer/tech_briefs/14.html. [2000, May 20]
4. U.S. Environmental Protection Agency. Stabilization/Solidification Process for Mixed Waste (EPA 402-12-96-014) [Online].1996. Available form: http://www.epa.gov/radiation/mixed-waste/mw_pg7.ht#ms_ss. [2001, January 24].
5. Colombo, P. ,and others. Process for the encapsulation and stabilization of radioactive, hazardous and mixed waste (US Patent No.5768234). [Online]. US Patent & Trademark Office,1997. Available form: <http://www.uspto.gov> [2000, June 1]
6. U.S. Environmental Protection Agency. MLLW Technical Dictionary [Online]. (n.d.). Available form: http://www.inel.gov/dictionary_mllw_contents.htm. [2001, April 25]
7. บุญฉวี ศรีหมอก. การใช้โพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นตัวทำให้สารแข็งตัวสำหรับการฝังกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. :2539
8. Department of Energy. Sulfur Polymer Encapsulation. [Online]. (n.d.). Available form: http://www.doe.gov/em_home/radioactive_waste. [2001, April 27]
9. Vroom, Alan. Re:source of SPC information. [E-mail]. 2001. [2001, January 12]
10. STARcrete™ Technology Inc.. STARcrete The First Commercial Sulfur Concrete-The Concrete Answer to Corrosion Problems- Acid Resistant Concrete [Online]. 2000. Available form: <http://www.starcrete.com> [2001, June 19]
11. Kalb, P., and others. Sulfur Polymer Stabilization/Solidification of Elemental Mercury Mixed Waste. [Online]. Brookhaven National Laboratory, NY. Available form: <http://www.hanford.gov/eis/twrseis/volume-2/appenbappb9-11.htm> [2000, June 1]

12. Mattus, C., and others. Demonstration of Mixed Waste Debris Macroencapsulation Using Sulfur Polymer Cement. [Online]. The Department of Energy, Mixed Waste Focus Areas, 1997. Available form: <http://www.ornl.gov> [2000, June 1]
13. Arnold, G., and others. Modified Sulfur Cement Solidification of Low-Level wastes. [Microfilm]. Nuclear Waste Research Group, Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, 1985.
14. Ross, Darnell G.. Sulfur Polymer Cement, A Solidification and Stabilization Agent For Radioactive and Hazardous Wastes. [Microfilm]. Idaho National Engineering Lab., EG&G Idaho, Inc., ID, 1993.
15. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. การป้องกันอันตรายจากรังสี ระดับ 2. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. กรุงเทพฯ : 2544.
16. Berline, Robert E. and Stanton, Catherine C.. Radioactive waste management. John Wiley & Sons, 1989.
17. EM.. Mixed Low-Level Waste. [Online]. Office of Environmental Management , The Department of Energy, 1996. Available form: <http://www.hanford.gov/wastemst/doe.gov>. [2002, May 16]
18. Wentz, Charles A., Hazardous Waste Management. 2nd edition. McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 1995.
19. Mattus C. H., and Mattus A. J.,. Evaluation of Sulfur Polymer Cement as A Waste Form for The Immobilization of Low-Level Radioactive or Mixed Waste. [Microfilm]. Oak Ridge National Laboratory, 1994.
20. American Society for Testing and Materials. ASTM C 1159 – 98 : Standard Specification for Sulfur Polymer Cement and Sulfur Modifier for Use in Chemical-Resistant, Rigid Sulfur Concrete. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 2000.
21. STARcrete™ Technologies Inc.. Laboratory Procedure for Producing STARcrete™ Test Specimens. STARcrete™ Technologies Inc., 2000.
22. STARcrete™ Technologies Inc.. Material Safety Data Sheet. STARcrete™ Technologies Inc., 2000.
23. Martin Resources Inc.. Material Safety Data Sheet CEMENT 2000. [Online]. Martin Resource Co.,Ltd., 2000. Available form: <http://www.chemprufconcrete.com/properties.htm>. [2001, December 25]

24. รศ.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. วิทยาศาสตร์โพลีเมอร์ 1. เอกสารประกอบการสอน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ : 2542
25. American Society for Testing and Materials. ASTM C1312 – 97 : Standard Practice for Making and Conditioning Chemical-Resistant Sulfur Polymer Cement Concrete Test Specimens in The Laboratory. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 2000.
26. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Availability of Revised Staff Technical Position on Waste Form. U.S. Government Printing Office, U.S.A. ,1991.
27. American Society for Testing and Materials. ASTM C579-96 : Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 2000.
28. American Society for Testing and Materials. ASTM C267-97 : Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 2000
29. American Nuclear Society. American National Standard Measurement of The Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Wastes by a Short-Term Test Procedure. American Nuclear Society, Illinois, U.S.A., 1986.
30. นฤมิต คินีมาน. การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. :2538
31. Poter, Craig L.. Exiting RCRA Subtitle C Regulation Data Supporting A New Regulatory Path for Immobilized Mixed Debris. [Online]. Jetseal, Inc. (n.d.). Available form: <http://www.ornl.gov> [2000, June 1]



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ค่าความหนาแน่น และ ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากผนัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-1 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์ซีลเฟอร์โพลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมของ STX™ ต่าง ๆ

อัตราส่วนผสม ของSTX™ (%โดยน้ำหนัก)	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทนทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% STX	25.992	2.0196	2.0354	0.0155	360	7.1047	6.8416	1.2058
	26.206	2.0362			400	7.8941		
	26.39	2.0505			280	5.5259		
5% STX	25.905	2.0128	1.9250	0.0767	560	11.0517	11.2491	1.4900
	24.338	1.8911			500	9.8676		
	24.081	1.8711			650	12.8279		
10% STX	23.892	1.8564	1.9509	0.0818	770	15.1961	17.4986	3.3278
	25.717	1.9982			810	15.9856		
	25.715	1.9981			1080	21.3141		
15% STX	26.305	2.0439	2.0257	0.0601	950	18.7485	19.8010	1.2058
	26.699	2.0745			1070	21.1167		
	25.207	1.9586			990	19.5379		
20% STX	25.621	1.9908	2.0192	0.0340	1440	28.4188	23.2218	6.0518
	25.870	2.0101			1250	24.6691		
	26.471	2.0568			840	16.5776		

ตาราง ก-2 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทเนื้อที่อัตราส่วนผสมของกาก 40% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ

ขนาดอนุภาค	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
10% STX (Blank)	25.297	1.9656	1.9100	0.0546	360	7.1047	6.8416	1.2058
	23.892	1.8564			400	7.8941		
	24.557	1.9081			280	5.5259		
Mesh18	25.822	2.0064	2.0020	0.0211	1900	37.4970	39.6021	2.5453
	26.006	2.0207			2150	42.4308		
	25.471	1.9791			1970	38.8784		
Mesh25	26.149	2.0318	2.0158	0.0169	1800	35.5235	37.4312	1.8757
	25.967	2.0176			1900	37.4970		
	25.715	1.9981			1990	39.2732		
Mesh40	25.870	2.0101	2.0102	0.0206	2070	40.8520	39.0100	1.7798
	26.137	2.0308			1970	38.8784		
	25.607	1.9897			1890	37.2996		

ตาราง ก-3 ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากผักรวมประเภทเดี่ยวแต่ละอัตราส่วนผสมของกากเพื่อใช้สำหรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากผักรวม

ประเภทกาก	ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)			ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)			ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย แต่ละครั้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ทั้งหมด (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)
		1	2	3	1	2	3			
20%ASH	1	25.369	26.477	25.792	1.971	2.057	2.004	2.0108	2.0092	0.0202
	2	25.765	25.096	25.905	2.002	1.950	2.013	1.9882		
	3	25.699	26.725	25.895	1.997	2.077	2.012	2.0285		
30%ASH	1	25.376	26.052	25.642	1.972	2.024	1.992	1.9961	2.0043	0.0075
	2	26.122	25.725	25.793	2.030	1.999	2.004	2.0109		
	3	26.087	25.612	25.744	2.027	1.990	2.000	2.0058		
40%ASH	1	27.085	25.402	25.513	2.105	1.974	1.982	2.0202	2.0219	0.0143
	2	25.857	27.122	25.669	2.009	2.107	1.994	2.0370		
	3	25.417	27.006	25.124	1.975	2.098	1.952	2.0085		

ตาราง ก-4 ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทตะกอนสัจ (ปส.) แต่ละอัตราส่วนผสมของกากเพื่อใช้สำหรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์กากพริก

ประเภทกาก	ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)			ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)			ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย แต่ละครั้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ทั้งหมด (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)
		1	2	3	1	2	3			
20%SLUDGE	1	25.175	25.098	24.203	1.956	1.950	1.881	1.9289	1.9350	0.0060
	2	24.545	25.035	25.140	1.907	1.945	1.953	1.9352		
	3	25.445	24.168	25.325	1.977	1.878	1.968	1.9409		
30%SLUDGE	1	24.596	25.69	25.067	1.911	1.996	1.948	1.9516	1.9688	0.0149
	2	25.708	25.028	25.635	1.998	1.945	1.992	1.9780		
	3	25.257	25.602	25.463	1.962	1.989	1.978	1.9767		
40%SLUDGE	1	25.315	24.485	24.693	1.967	1.902	1.919	1.9294	1.9515	0.0207
	2	24.694	25.573	25.208	1.919	1.987	1.959	1.9548		
	3	25.644	25.481	24.948	1.993	1.980	1.938	1.9703		

ตาราง ก-5 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพริกประเภทเนื้อที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (การทดสอบการทนทานต่อแรงกด)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% ASH	23.892	1.8564	1.9508	0.0818	770	15.1961	17.4986	3.3278
	25.717	1.9982			810	15.9856		
	25.715	1.9980			1080	21.3141		
20% ASH	26.673	2.0725	2.0605	0.0437	1070	21.1167	20.5115	0.5245
	26.988	2.0970			1025	20.2286		
	25.895	2.0120			1023	20.1892		
30% ASH	27.024	2.0998	2.0337	0.0660	1670	32.9579	29.3068	3.8077
	25.325	1.9678			1285	25.3598		
	26.172	2.0336			1500	29.6029		
40% ASH	27.822	2.1618	2.0531	0.0942	2200	43.4176	40.3915	2.6867
	25.669	1.9945			2000	39.4705		
	25.781	2.0032			1940	38.2864		

ตาราง ก-6 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนึ่ประเภทเ้าที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล ก่อนแช่น้ำ (กรัม)	มวล หลังแช่น้ำ (กรัม)	ความหนาแน่น ก่อนแช่น้ำ (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% ASH	25.680	25.792	1.9953	2.0108	0.0136	870	17.1697	16.2487	2.3128
	25.945	26.066	2.0159			690	13.6173		
	26.012	26.117	2.0211			910	17.9591		
20% ASH	25.161	25.386	1.9550	2.0084	0.0950	910	17.9591	18.2222	1.4001
	27.260	27.390	2.1181			1000	19.7353		
	25.125	25.272	1.9522			860	16.9723		
30% ASH	25.869	26.000	2.0100	2.0356	0.0674	1080	21.3141	19.8668	4.5190
	27.182	27.341	2.1120			1190	23.4850		
	25.542	25.682	1.9846			750	14.8014		
40% ASH	25.417	25.604	1.9749	2.0398	0.0563	1360	26.8399	28.2214	1.4900
	26.710	26.822	2.0754			1420	28.0241		
	26.628	26.719	2.0690			1510	29.8002		

ตาราง ก-7 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพืชมักาประเภทเจ้าหลังผ่านการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (การทนทานต่อสารเคมี)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล ก่อนแช่ (กรัม)	มวล หลังแช่ (กรัม)	ความหนาแน่น	ความหนาแน่น เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้	การทนทาน ต่อแรงกด	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	(กรัม)	(กรัม)	(กรัม/ลบ.ซม.)	(กรัม/ลบ.ซม.)	(กรัม/ลบ.ซม.)	(กิโลกรัม)	(เมกะปาสคาล)	(เมกะปาสคาล)	(เมกะปาสคาล)
0% ASH	25.792	25.945	2.0040	2.0196	0.0136	690	13.6173	15.7882	2.0029
	26.066	26.087	2.0253			820	16.1829		
	26.117	26.210	2.0293			890	17.5644		
20% ASH	26.300	26.547	2.0725	2.0605	0.0437	870	17.1697	17.4328	1.2058
	25.029	25.378	2.0970			830	16.3803		
	25.030	25.167	2.0120			950	18.7485		
30% ASH	25.726	25.853	2.0998	2.0337	0.0660	1050	20.7220	18.2880	2.6939
	25.238	25.575	1.9678			780	15.3935		
	26.172	26.394	2.0336			950	18.7485		
40% ASH	25.417	25.607	2.1618	2.0531	0.0942	1200	23.6823	27.1031	5.2562
	25.785	25.912	1.9945			1680	33.1552		
	26.012	26.271	2.0032			1240	24.4717		

ตาราง ก-8 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเจ้าหลังผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทนทานต่อสารเคมี)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล หลังแช่ (กรัม)	มวล หลังแช่ (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% ASH	25.780	25.945	2.0031	2.0279	0.0321	790	15.5908	16.0513	0.6344
	26.567	26.671	2.0643			850	16.7750		
	25.952	26.176	2.0165			800	15.7882		
20% ASH	25.406	25.500	1.9740	1.9994	0.0331	980	19.3405	19.2748	1.4812
	26.214	26.314	2.0368			1050	20.7220		
	25.578	25.721	1.9874			900	17.7617		
30% ASH	25.937	26.164	2.0153	2.0065	0.0113	1030	20.3273	21.1825	0.7472
	25.874	26.001	2.0104			1090	21.5114		
	25.659	25.759	1.9937			1100	21.7088		
40% ASH	26.176	26.265	2.0339	2.0152	0.0168	1630	32.1685	29.9318	1.9470
	25.756	25.943	2.0012			1470	29.0108		
	25.874	26.012	2.0104			1450	28.6161		

ตาราง ก-9 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากฉนึ่ประเภทเ้าที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการฉายรังสี (การทนทานต่อรังสี)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% ASH	23.983	1.8635	1.9499	0.0761	510	10.0650	10.7228	1.8653
	25.825	2.0066			650	12.8279		
	25.478	1.9796			470	9.2756		
20% ASH	25.024	1.9444	1.9613	0.0198	890	17.5644	16.3145	1.4001
	25.521	1.9830			840	16.5776		
	25.179	1.9564			750	14.8014		
30% ASH	26.41	2.0521	2.0949	0.0476	1350	26.6426	23.2876	3.3550
	26.854	2.0866			1180	23.2876		
	27.622	2.1462			1010	19.9326		
40% ASH	29.378	2.2827	2.1933	0.0825	1630	32.1685	31.3791	1.7205
	28.024	2.1775			1650	32.5632		
	27.283	2.1199			1490	29.4055		

ตาราง ก-10 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทตะกอนสลัดจ์ (ฟป.) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (การทดสอบการทนทานต่อแรงกด)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสกาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสกาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสกาล)
0% SLUDGE	23.892	1.8564	1.9508	0.0818	770	15.1961	17.4986	3.3278
	25.717	1.9982			810	15.9856		
	25.715	1.9980			1080	21.3141		
20% SLUDGE	25.635	1.9918	1.9336	0.0680	880	17.3670	19.6037	2.9094
	25.098	1.9501			940	18.5511		
	23.924	1.8589			1160	22.8929		
30% SLUDGE	24.164	1.8775	1.9679	0.0790	1760	34.7340	24.1428	9.4489
	26.049	2.0240			1070	21.1167		
	25.768	2.0022			840	16.5776		
40% SLUDGE	24.419	1.8974	1.9183	0.0379	1530	30.1949	33.2210	2.8758
	25.251	1.9620			1820	35.9182		
	24.395	1.8955			1700	33.5499		

ตาราง ก-11 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพื้กประเภทตะกอนสลัดจ์ (ฟป.) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการแช่น้ำ 90 วัน

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล ก่อนแช่น้ำ (กรัม)	มวล หลังแช่น้ำ (กรัม)	ความหนาแน่น ก่อนแช่น้ำ (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% SLUDGE	25.680	25.792	1.9953	2.0108	0.0136	870	17.1697	16.2487	2.3128
	25.945	26.066	2.0159			690	13.6173		
	26.012	26.117	2.0211			910	17.9591		
20% SLUDGE	24.444	24.830	1.8993	1.8937	0.0147	540	10.6570	9.4071	1.6785
	24.515	24.703	1.9048			380	7.4994		
	24.157	24.456	1.8770			510	10.0650		
30% SLUDGE	25.690	25.958	1.9961	1.9504	0.0860	160	3.1576	4.1444	0.8602
	23.825	24.292	1.8512			240	4.7365		
	25.790	25.990	2.0039			230	4.5391		
40% SLUDGE	26.710	26.883	2.0754	1.9865	0.0783	150	2.9603	2.8945	0.8899
	24.805	24.962	1.9274			100	1.9735		
	25.185	25.305	1.9569			190	3.7497		

ตาราง ก-12 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทตะกอนสลัดจ์ (ฟป.) หลังผ่านการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (การทนทานต่อสารเคมี)

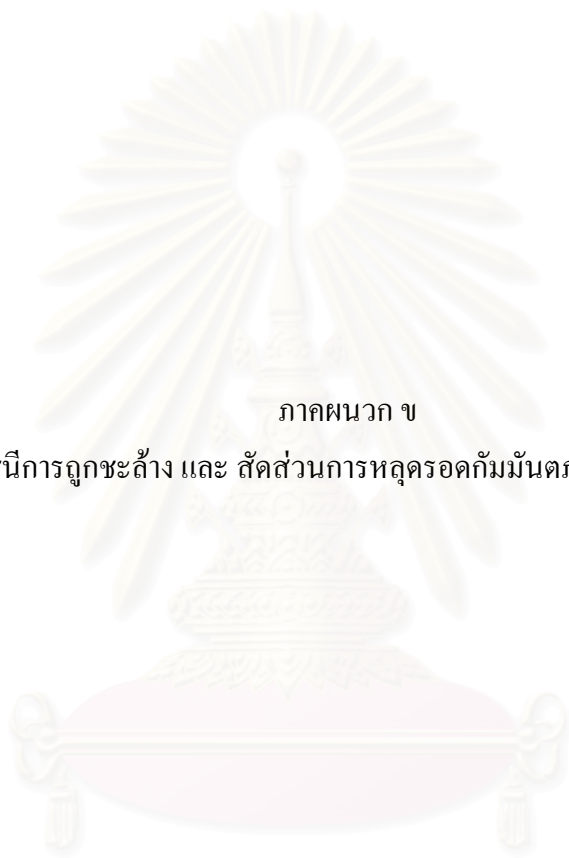
อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล ก่อนแช่ (กรัม)	มวล หลังแช่ (กรัม)	ความหนาแน่น ก่อนแช่น้ำ (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% SLUDGE	25.792	25.945	2.0040	2.0196	0.0136	690	13.6173	15.7882	2.0029
	26.066	26.087	2.0253			820	16.1829		
	26.117	26.210	2.0293			890	17.5644		
20% SLUDGE	24.830	25.101	1.9293	1.9163	0.0148	460	9.0782	8.8809	1.0988
	24.703	25.003	1.9194			390	7.6967		
	24.456	24.701	1.9002			500	9.8676		
30% SLUDGE	25.958	26.361	2.0169	1.9746	0.0755	310	6.1179	4.8680	1.1896
	24.292	24.556	1.8875			240	4.7365		
	25.990	26.321	2.0194			190	3.7497		
40% SLUDGE	26.883	27.242	2.0888	1.9982	0.0796	120	2.3682	3.1576	0.7116
	24.962	25.422	1.9395			170	3.3550		
	25.305	25.698	1.9662			190	3.7497		

ตาราง ก-13 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทตะกอนสลัดจ์ (พป.) หลังผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทนทานต่อสารเคมี)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล ก่อนแช่ (กรัม)	มวล หลังแช่ (กรัม)	ความหนาแน่น ก่อนแช่น้ำ (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% SLUDGE	25.780	25.945	2.0031	2.0279	0.0321	790	15.5908	16.0513	0.6344
	26.567	26.671	2.0643			850	16.7750		
	25.952	26.176	2.0165			800	15.7882		
20% SLUDGE	24.830	24.919	1.9293	1.9163	0.0148	450	8.8809	9.5387	0.6029
	24.703	24.770	1.9194			510	10.0650		
	24.456	24.554	1.9002			490	9.6703		
30% SLUDGE	25.958	26.092	2.0169	1.9746	0.0755	240	4.7365	5.1969	0.6344
	24.292	24.403	1.8875			250	4.9338		
	25.990	26.149	2.0194			300	5.9206		
40% SLUDGE	26.883	27.084	2.0888	1.9982	0.0796	150	2.9603	3.0261	0.6931
	24.962	25.182	1.9395			120	2.3682		
	25.305	25.495	1.9662			190	3.7497		

ตาราง ก-14 ค่าการทนทานต่อแรงกดของผลิตภัณฑ์กากพื้ประเภทตะกอนสลัดจ์ (ฟป.) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ หลังจากผ่านการฉายรังสี (การทนทานต่อรังสี)

อัตราส่วนผสม ของกาก (%โดยน้ำหนัก)	มวล (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ลบ.ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (กรัม/ลบ.ซม.)	น้ำหนักสูงสุด ที่สามารถรับได้ (กิโลกรัม)	การทนทาน ต่อแรงกด (เมกะปาสคาล)	การความทน ทาน ต่อแรงกดเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะปาสคาล)
0% SLUDGE	23.983	1.8635	1.9499	0.0761	510	10.0650	10.7228	1.8653
	25.825	2.0066			650	12.8279		
	25.478	1.9796			470	9.2756		
20% SLUDGE	25.098	1.9501	2.0052	0.0628	690	13.6173	15.1304	1.3434
	25.635	1.9918			790	15.5908		
	26.688	2.0737			820	16.1829		
30% SLUDGE	24.569	1.9090	1.9499	0.0438	1050	20.7220	18.5511	1.9032
	25.690	1.9961			900	17.7617		
	25.028	1.9447			870	17.1697		
40% SLUDGE	25.615	1.9903	1.9163	0.0641	1410	27.8267	26.7742	1.4943
	24.173	1.8782			1270	25.0638		
	24.200	1.8803			1390	27.4320		



ภาคผนวก ข

ดัชนีการถูกชะล้าง และ ตัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณค่าดัชนีการชะล้าง (Leachability Index Calculation)

การดำเนินการทดลอง และ การคำนวณเป็นไปตามมาตรฐาน ANS/ANSI 16.1 ดังนี้

1. สัดส่วนการหลุดรอดของกัมมันตภาพสะสม (Cumulative activity released fraction; F) เป็น สัดส่วนของปริมาณนิวไคลด์รังสีที่หลุดออกมาจากผลิตภัณฑ์กากฉนึกในระยะเวลาต่าง ๆ ในช่วง 3 เดือน เทียบกับ ปริมาณนิวไคลด์รังสีเริ่มต้นทั้งหมดที่มีในผลิตภัณฑ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$F = \frac{\sum a_n}{A_0}$$

เมื่อ a_n = ความแรงรังสีของนิวไคลด์ที่สนใจในน้ำชะ ณ ช่วงเวลาที่ n
 A_0 = ความแรงรังสีของนิวไคลด์ที่สนใจในผลิตภัณฑ์กากฉนึก ณ เวลา เริ่มต้น

ค่าที่ได้จะนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการหลุดรอดสะสม กับ ช่วงเวลา

2. ดัชนีการชะล้าง (Leachability Index; L) เป็นค่าที่เทียบการชะล้างของนิวไคลด์รังสีตามทฤษฎี Mass-transport theory ซึ่งมีค่าผกผันกับ logarithm ของสัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusion; D) สามารถคำนวณได้ดังสมการ ต่อไปนี้

สัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective diffusion; D)

$$D = \pi \times \frac{a_n / A_0}{(\Delta t)_n} \times \frac{V}{S} \times T$$

ดัชนีการชะล้าง (Leachability Index; L)

$$L_i = \frac{1}{10} \sum_{1}^{10} [\log(\beta / D)]_n$$

เมื่อ	a_n	=	ความแรงรังสีของนิโคลด์ที่สนใจในน้ำชะ ณ ช่วงเวลาที่ n
	A_0	=	ความแรงรังสีของนิโคลด์ที่สนใจในผลิตภัณฑ์กากปนีก ณ เวลาเริ่มต้น
	Δt	=	ระยะเวลาในแต่ละช่วงการชะล้าง (วินาที)
	V	=	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากปนีก (ลบ.ชม.)
	S	=	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากปนีก (ตร.ชม.)
	T	=	ระยะเวลาการชะล้างสะสม (วินาที)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-1 ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมกาก 20 wt%

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากฉนีก	ASH20	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฉนีก(V,cm ³)	12.8704
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฉนีก	2213.23	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากฉนีก(S,cm ²)	30.4024
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในน้ำ rinse ตัวอย่าง	1.52	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว(V/S) ²	0.1792
ความแรงรังสีหลัง rinse (A ₀)	2211.71	ปริมาตรของน้ำชะตัวอย่าง (V _L ,ml)	300

Leach interval (n)	(Δt_n)	T	a _n	a _n /A ₀	F = Sa _n /A ₀	$[(a_n/A_0)/(\Delta t_n)]^2$	Effective diffusivity ; D (cm ² /s)	Leachability index ; L _n log(1/D)
	(sec)	(sec)	(nCi)			(fraction/s) ²		
1	7,200	1,800	6.80	3.07E-03	3.07E-03	1.82E-13	1.85E-10	9.73
2	18,000	14,835	7.11	3.21E-03	6.29E-03	3.19E-14	2.66E-10	9.57
3	61,200	51,231	15.39	6.96E-03	1.32E-02	1.29E-14	3.73E-10	9.43
4	86,400	125,894	14.46	6.54E-03	1.98E-02	5.73E-15	4.06E-10	9.39
5	86,400	213,818	10.91	4.93E-03	2.47E-02	3.26E-15	3.92E-10	9.41
6	86,400	300,849	9.29	4.20E-03	2.89E-02	2.36E-15	4.00E-10	9.40
7	86,400	387,596	7.64	3.45E-03	3.24E-02	1.60E-15	3.49E-10	9.46
8	1,209,600	939,462	66.25	3.00E-02	6.23E-02	6.13E-16	3.24E-10	9.49
9	2,419,200	2,716,550	61.55	2.78E-02	9.02E-02	1.32E-16	2.02E-10	9.69
10	3,715,200	5,768,861	23.98	1.08E-02	1.01E-01	8.52E-18	2.77E-11	10.56
Average Leaching Index (L _i)								<u>9.61</u>

ตาราง ข-2 ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมกาก 30 wt%

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากฉนึก	ASH30	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฉนึก(V, cm^3)	12.8704
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฉนึก	4386.51	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากฉนึก(S, cm^2)	30.4024
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในน้ำ rinse ตัวอย่าง	3.6576	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว(V/S) ²	0.1792
ความแรงรังสีหลัง rinse (A_0)	4382.85	ปริมาตรของน้ำชะตัวอย่าง (V_L, ml)	300

Leach interval (n)	$(\Delta t)_n$	T	a_n	a_n/A_0	F = $S a_n/A_0$	$[(a_n/A_0)/(\Delta t)_n]^2$	Effective diffusivity ; D (cm^2/s)	Leachability index ; L_n $\log(1/D)$
	(sec)	(sec)	(nCi)			(fraction/s) ²		
1	7,200	1,800	7.21	1.64E-03	1.64E-03	5.22E-14	5.29E-11	10.28
2	18,000	14,835	8.59	1.96E-03	3.61E-03	1.19E-14	9.91E-11	10.00
3	61,200	51,231	19.58	4.47E-03	8.07E-03	5.33E-15	1.54E-10	9.81
4	86,400	125,894	18.67	4.26E-03	1.23E-02	2.43E-15	1.72E-10	9.76
5	86,400	213,818	12.25	2.79E-03	1.51E-02	1.05E-15	1.26E-10	9.90
6	86,400	300,849	10.31	2.35E-03	1.75E-02	7.41E-16	1.25E-10	9.90
7	86,400	387,596	8.93	2.04E-03	1.95E-02	5.56E-16	1.21E-10	9.92
8	1,209,600	939,462	80.77	1.84E-02	3.79E-02	2.32E-16	1.23E-10	9.91
9	2,419,200	2,716,550	81.19	1.85E-02	5.65E-02	5.86E-17	8.97E-11	10.05
10	3,715,200	5,768,861	59.09	1.35E-02	7.00E-02	1.32E-17	4.28E-11	10.37
Average Leaching Index (L_1)								<u>9.99</u>

ตาราง ข-3 ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากฉนีกประเภทเถ้าที่อัตราส่วนผสมกาก 40 wt%

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากฉนีก	ASH40	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฉนีก(V, cm^3)	12.8704
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฉนีก	5644.14	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากฉนีก(S, cm^2)	30.4024
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในน้ำ rinse ตัวอย่าง	2.9	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว(V/S) ²	0.1792
ความแรงรังสีหลัง rinse (A_0)	5641.24	ปริมาตรของน้ำชะตัวอย่าง (V_L, ml)	300

Leach interval (n)	$(\Delta t)_n$	T	a_n	a_n/A_0	F = $S a_n/A_0$	$[(a_n/A_0)/(\Delta t)_n]^2$	Effective diffusivity ; D (cm^2/s)	Leachability index ; L_n $\log(1/D)$
	(sec)	(sec)	(nCi)			(fraction/s) ²		
1	7,200	1,800	7.74	1.37E-03	1.37E-03	3.63E-14	3.68E-11	10.43
2	18,000	14,835	9.70	1.72E-03	3.09E-03	9.13E-15	7.62E-11	10.12
3	61,200	51,231	22.08	3.91E-03	7.01E-03	4.09E-15	1.18E-10	9.93
4	86,400	125,894	21.98	3.90E-03	1.09E-02	2.03E-15	1.44E-10	9.84
5	86,400	213,818	15.50	2.75E-03	1.36E-02	1.01E-15	1.22E-10	9.91
6	86,400	300,849	12.82	2.27E-03	1.59E-02	6.92E-16	1.17E-10	9.93
7	86,400	387,596	10.11	1.79E-03	1.77E-02	4.30E-16	9.39E-11	10.03
8	1,209,600	939,462	66.90	1.19E-02	2.96E-02	9.61E-17	5.08E-11	10.29
9	2,419,200	2,716,550	60.89	1.08E-02	4.04E-02	1.99E-17	3.04E-11	10.52
10	3,715,200	5,768,861	61.24	1.09E-02	5.12E-02	8.54E-18	2.77E-11	10.56
Average Leaching Index (L_1)								10.16

ตาราง ข-4 ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอดกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากผนึกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 20 wt%

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนึก	SLUDGE 20	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากผนึก(V, cm^3)	12.8704
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากผนึก	3228.99	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากผนึก(S, cm^2)	30.4024
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในน้ำ rinse ตัวอย่าง	0.1276	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว(V/S) ²	0.1792
ความแรงรังสีหลัง rinse (A_0)	3228.8624	ปริมาตรของน้ำชะตัวอย่าง (V_L, ml)	300

Leach interval (n)	$(\Delta t)_n$	T	a_n	a_n/A_0	$F = Sa_n/A_0$	$[(a_n/A_0)/(\Delta t)_n]^2$	Effective diffusivity ; D (cm^2/s)	Leachability index ; L_n $\log(1/D)$
	(sec)	(sec)	(nCi)			(fraction/s) ²		
1	7,200	1,800	14.63	4.53E-03	4.53E-03	3.96E-13	4.01E-10	9.40
2	18,000	14,835	11.66	3.61E-03	8.14E-03	4.03E-14	3.36E-10	9.47
3	61,200	51,231	25.34	7.85E-03	1.60E-02	1.65E-14	4.74E-10	9.32
4	86,400	125,894	25.50	7.90E-03	2.39E-02	8.36E-15	5.92E-10	9.23
5	86,400	213,818	13.48	4.17E-03	2.81E-02	2.33E-15	2.81E-10	9.55
6	86,400	300,849	10.31	3.19E-03	3.13E-02	1.37E-15	2.31E-10	9.64
7	86,400	387,596	6.11	1.89E-03	3.31E-02	4.79E-16	1.05E-10	9.98
8	1,209,600	939,462	58.90	1.82E-02	5.14E-02	2.27E-16	1.20E-10	9.92
9	2,419,200	2,716,550	56.30	1.74E-02	6.88E-02	5.19E-17	7.94E-11	10.10
10	3,715,200	5,768,861	59.06	1.83E-02	8.71E-02	2.42E-17	7.87E-11	10.10
Average Leaching Index (L_i)								9.67

ตาราง ข-5 ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากผนึกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 30 wt%

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากผนึก	SLUDGE 30	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากผนึก(V, cm^3)	12.8704
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากผนึก	5368.29	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากผนึก(S, cm^2)	30.4024
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในน้ำ rinse ตัวอย่าง	3.6576	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว(V/S) ²	0.1792
ความแรงรังสีหลัง rinse (A_0)	5364.63	ปริมาตรของน้ำชะตัวอย่าง (V_L, ml)	300

Leach interval (n)	$(\Delta t)_n$	T	a_n	a_n/A_0	$F = Sa_n/A_0$	$[(a_n/A_0)/(\Delta t)_n]^2$	Effective diffusivity ; D (cm^2/s)	Leachability index ; L_n $\log(1/D)$
	(sec)	(sec)	(nCi)			(fraction/s) ²		
1	7,200	1,800	19.60	3.65E-03	3.65E-03	2.58E-13	2.61E-10	9.58
2	18,000	14,835	22.71	4.23E-03	7.89E-03	5.53E-14	4.62E-10	9.34
3	61,200	51,231	46.10	8.59E-03	1.65E-02	1.97E-14	5.69E-10	9.25
4	86,400	125,894	41.56	7.75E-03	2.42E-02	8.04E-15	5.70E-10	9.24
5	86,400	213,818	28.73	5.36E-03	2.96E-02	3.84E-15	4.63E-10	9.33
6	86,400	300,849	23.09	4.30E-03	3.39E-02	2.48E-15	4.20E-10	9.38
7	86,400	387,596	18.77	3.50E-03	3.74E-02	1.64E-15	3.58E-10	9.45
8	1,209,600	939,462	143.38	2.67E-02	6.41E-02	4.88E-16	2.58E-10	9.59
9	2,419,200	2,716,550	130.38	2.43E-02	8.84E-02	1.01E-16	1.54E-10	9.81
10	3,715,200	5,768,861	135.45	2.52E-02	1.14E-01	4.62E-17	1.50E-10	9.82
Average Leaching Index (L_i)								9.48

ตาราง ข-6 ข้อมูลที่ใช้คำนวณดัชนีการชะล้าง และ สัดส่วนการหลุดรอกัมมันตภาพรังสีสะสม ในผลิตภัณฑ์กากฉนึกประเภทตะกอนสลัดจ์ (ปส.) ที่อัตราส่วนผสมกาก 40 wt%

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กากฉนึก	SLUDGE 40	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์กากฉนึก(V,cm ³)	12.8704
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในผลิตภัณฑ์กากฉนึก	5585.52	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์กากฉนึก(S,cm ²)	30.4024
ความแรงรังสีของ Cs-137 ในน้ำ rinse ตัวอย่าง	0.1557	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว(V/S) ²	0.1792
ความแรงรังสีหลัง rinse (A ₀)	5585.36	ปริมาตรของน้ำชะตัวอย่าง (V _L ,ml)	300

Leach interval (n)	$(\Delta t)_n$	T	a _n	a _n /A ₀	F = Sa _n /A ₀	$[(a_n/A_0)/(\Delta t)_n]^2$	Effective diffusivity ; D (cm ² /s)	Leachability index ; L _n log(1/D)
	(sec)	(sec)	(nCi)			(fraction/s) ²		
1	7,200	1,800	22.89	4.10E-03	4.10E-03	3.24E-13	3.28E-10	9.48
2	18,000	14,835	25.71	4.60E-03	8.70E-03	6.54E-14	5.46E-10	9.26
3	61,200	51,231	50.72	9.08E-03	1.78E-02	2.20E-14	6.35E-10	9.20
4	86,400	125,894	49.44	8.85E-03	2.66E-02	1.05E-14	7.44E-10	9.13
5	86,400	213,818	38.39	6.87E-03	3.35E-02	6.33E-15	7.62E-10	9.12
6	86,400	300,849	37.79	6.77E-03	4.03E-02	6.13E-15	1.04E-09	8.98
7	86,400	387,596	38.29	6.86E-03	4.71E-02	6.30E-15	1.37E-09	8.86
8	1,209,600	939,462	130.06	2.33E-02	7.04E-02	3.71E-16	1.96E-10	9.71
9	2,419,200	2,716,550	132.02	2.36E-02	9.40E-02	9.55E-17	1.46E-10	9.84
10	3,715,200	5,768,861	129.17	2.31E-02	1.17E-01	3.87E-17	1.26E-10	9.90
Average Leaching Index (L _i)								9.35

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิรรณ กฤษณานูวัตร เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2520 ที่จังหวัด
ชลบุรี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชลกันยานุกูล จังหวัดชลบุรี ได้รับปริญญา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม) จากคณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในปีการศึกษา
2542 ในสาขาวิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย