

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันความก้าวหน้าในทางนิวเคลียร์เทคโนโลยีมีเพิ่มขึ้น โดยได้มีการนำสารกัมมันตรังสีไปใช้กันอยู่แพร่หลายในแทบทุกสาขาวิชา เช่น ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรม ในงานด้านวิจัยและค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์ เป็นสาเหตุให้ปริมาณของกากกัมมันตรังสีเพิ่มสูงขึ้นตลอดเวลาเช่นกัน กากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นนี้จะต้องมีการจัดการกัมมันตรังสีออกเสียก่อนที่จะปลดปล่อยออกสู่สภาวะแวดล้อม

กากกัมมันตรังสีแบ่งได้เป็นหลายชนิด มีทั้งสภาวะที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ และยังแบ่งเป็นพวกที่มีความแรงของกัมมันตรังสีต่าง ๆ ได้แก่ กากกัมมันตรังสีที่มีระดับความแรงรังสีสูง (high activity radioactive waste) กากกัมมันตรังสีที่มีระดับความแรงปานกลาง และกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ (low and intermediate radioactive waste) กากกัมมันตรังสีบางชนิดมีอายุครึ่ง (half life) ค่อนข้างยาว การที่จะเก็บไว้รอให้ความแรงของกัมมันตรังสีลดลง ต้องใช้เวลานาน ทำให้ไม่สะดวกในการเก็บรักษาไว้เฉย ๆ การจัดการกัมมันตรังสีก่อนที่จะปลดปล่อยสู่สภาพแวดล้อม เช่น หักทะเล หรือ ฝังในถ้ำ จึงจำเป็นอย่างยิ่ง ผลจากการจัดการกากกัมมันตรังสีนี้เอง ทำให้เกิดมีกากกัมมันตรังสีเกิดขึ้นที่จะต้องเก็บให้ปลอดภัยต่อไป วิธีการฝังกากกัมมันตรังสีเข้าไปในสารพวกคอนกรีต (Concrete) ยางมะตอย (Bitumen) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กัน เนื่องจากสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการเก็บกักกากกัมมันตรังสีเหล่านี้ได้

ในประเทศไทยมีสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่า กัมกริต (Gumcrete) ซึ่งเป็นส่วนผสมของยางกับซีเมนต์ ตามธรรมชาติใช้ประโยชน์ในการอุดรอยรั่วต่าง ๆ อย่างเช่น อุดหลังคา เป็นต้น สารกัมกริตอาจเป็นประโยชน์ในการเก็บกากกัมมันตรังสีได้ ในการศึกษาวิจัยนี้จึงทดลองใช้กัมกริตในการฝังสารกัมมันตรังสีด้วย นอกเหนือไปจากคอนกรีตธรรมด้ายางมะตอย ซึ่งจะใช้เป็นประโยชน์ในการเก็บกากกัมมันตรังสีในอนาคตของเมืองไทยได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิจัยเบื้องต้น เพื่อที่จะค้นหาสารประกอบที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาเติมกากกัมมันตรังสีของแข็งพวกที่มีระดับความแรงต่ำและปานกลาง ให้ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และยังศึกษาถึงลักษณะที่เหมาะสมของสารประกอบกับกากกัมมันตรังสีเพื่อเป็นแนวทางในการเก็บกากกัมมันตรังสีที่เป็นของแข็งในอนาคต โดยคำนึงถึงวิธีการและความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะจำกัดขอบเขตโดยศึกษาเฉพาะกากกัมมันตรังสีของแข็งชนิดที่เรียกว่า สลัดจ์ (Sludge) จากโรงงานขจัดกากกัมมันตรังสี และเรซิน (Resin) จากเครื่องทำความสะอาดน้ำบ่อเครื่องปฏิกรณ์ของสำนักงาน พปส. เท่านั้น โดยใช้สารประกอบพวก ยางมะตอย คอนกรีต และกัมกริต เป็นตัวเก็บกักกากกัมมันตรังสีเหล่านี้

นอกจากนี้ยังศึกษาอัตราการรั่วของกัมมันตรังสี (leaching rate) ในน้ำประปา น้ำคลอง และน้ำทะเล ในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารประกอบที่ใช้ในการเก็บกักกากกัมมันตรังสีเหล่านี้

## 1.4 แผนการวิจัย

การศึกษาและวิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้ :-

- 1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของกากกัมมันตรังสีในรูปของ สลัดจ์ และเรซิน
- 1.4.2 ศึกษาการทำกากกัมมันตรังสีในรูปสลัดจ์ให้แห้ง โดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์มาระเหยน้ำให้แห้ง (Solar Evaporation) เพื่อนำมาเป็นตัวอย่างในการเติมกับ ยางมะตอย คอนกรีต และกัมกริตต่อไป
- 1.4.3 ศึกษาการเติมกากกัมมันตรังสีกับสารพวก ยางมะตอย คอนกรีต และกัมกริต ในลักษณะต่าง ๆ กัน

1.4.4. ศึกษาอัตราการรั่วของกัมมันตรังสีในน้ำประปา น้ำคลอง และน้ำทะเล

1.4.5. ศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อนำมาสรุปผลทั้งข้อดีและข้อเสีย ตลอดจนวิธีการและความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัยนี้

เพื่อเป็นการเตรียมหาวิธีการและแนวทางในการเก็บกักกากกัมมันตรังสีชนิดที่เป็นของแข็งให้ปลอดภัยก่อนที่จะนำไปทิ้งในสภาพแวดล้อมของธรรมชาติ เนื่องจากการใช้สารกัมมันตรังสีในสถานต่าง ๆ มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ ปริมาณของกากกัมมันตรังสีก็จะมีเพิ่มมากขึ้น การจัดการกากกัมมันตรังสีจึงมีความสำคัญและจำเป็นขึ้นทุกที และจากข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ อาจนำไปวางแผนในการเก็บกักกัมมันตรังสีในอนาคตของสำนักงาน พส. เอง และอาจเป็นประโยชน์ต่อการจัดการกากกัมมันตรังสีของโรงไฟฟ้าปรมาณูที่มีขึ้นในอนาคตอีกด้วย

1.6 การสำรวจการวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งได้กระทำมาแล้ว

1.6.1 การวิจัยและทดลองการกักกัมมันตรังสีในยางมะตอยและซีเมนต์

เนื่องจากวิวัฒนาการในคานิวเคลียร์เทคโนโลยีได้ก้าวหน้าขึ้นไปอย่างรวดเร็ว มีการนำสารกัมมันตรังสีไปใช้ในสถานวิชาการ และอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังนั้น ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือ การเพิ่มปริมาณของกากกัมมันตรังสี ซึ่งจะคงทำการจัดการกัมมันตรังสีให้อยู่ในระดับปลอดภัย ก่อนที่จะนำไปทิ้งในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กากกัมมันตรังสีที่มีปัญหามากในการจัดการก็คือ พวกที่มีความแรงของกัมมันตรังสีในระดับปานกลางและระดับต่ำ ซึ่งกากกัมมันตรังสีเหล่านี้มักจะเป็นพวกกัมมันตรังสีที่มีอายุครึ่งยาวนาน และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตถ้าเกิดเข้าไปในร่างกาย ดังนั้น ในแทบทุกประเทศทั่วโลกที่มีการใช้สารกัมมันตรังสี จึงได้ทำการค้นคว้าและวิจัยเพื่อหาวิธีการจัดการกัมมันตรังสี เพื่อที่จะนำกากเหล่านี้ไปทิ้งสู่สภาพแวดล้อมตามธรรมชาติอย่างปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต งานวิจัยคานี้ได้ทำกันอย่างมากมายและมีหลายวิธีการ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจก็คือ การกักกัมมันตรังสีเหล่านี้เข้าไปในสารบางพวก ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมติดแน่นกับกากกัมมันตรังสีเหล่านี้ ได้แก่ ซีเมนต์ และยางมะตอย ทั้งนี้ จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการกักกัมมันตรังสีเข้าไปในสารพวกนี้ การทดลองได้ทำกันอย่างกว้างขวาง

พอจะสรุปได้ดังนี้ :-

ปี 1963 Blanco แห่ง ORNL ประเทศอเมริกาได้ทดลองฉีกกากกัมมันตรังสีเข้าไปในยางมะคอบ หรือสารพอลาสติก (Plastic) แล้วนำไปเก็บหรือฝังไว้ การศึกษาได้ทดลองกับกากกัมมันตรังสีระดับต่ำและปานกลางทุกชนิด วิธีการนี้เป็นวิธีการง่าย ๆ ค่าใช้จ่ายถูกเหมาะสมกับกากกัมมันตรังสีทุกชนิด การทดลองได้ทำการฉีกกากกัมมันตรังสีเข้าไปในยางมะคอบ ในสัดส่วนต่าง ๆ กันตั้งแต่ 20 - 60 % และได้นำไปทดสอบการรั่วของกัมมันตรังสี (leaching test) ได้ผลพอสรุปได้ คือ อัตราการรั่วของ  $^{134}\text{Cs}$  ในการผสมกากกัมมันตรังสีเข้าไป 60% มีค่า  $3 \times 10^{-4}$  กรัม.ซม. $^{-2}$ วัน $^{-1}$  และ  $1.5 \times 10^{-4}$  กรัม.ซม. $^{-2}$ วัน $^{-1}$  ในส่วนผสม 20% และได้ทดสอบอัตราการรั่วของ  $^{106}\text{Ru}$  ในส่วนผสม 60% ของกากกัมมันตรังสี มีค่า  $7 \times 10^{-6}$  กรัม.ซม. $^{-2}$  วัน $^{-1}$  การทดสอบนี้สรุปผลได้ว่าอัตราการรั่วของกากกัมมันตรังสีขึ้นกับความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) ของชนิดของสารกัมมันตรังสี การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้กระทำที่ประเทศเบลเยียมและฝรั่งเศสเช่นกัน

ในปี 1964 W. Bähr แห่งประเทศเยอรมัน ได้ทำการวิจัยและทดลองฉีกกากกัมมันตรังสีระดับต่ำที่ทำให้แห้งแล้วเข้าไปในยางมะคอบ และได้มีการทดสอบอัตราการรั่วในระยะเวลา 1 ปี โดยใช้ตัวอย่างบางมะคอบต่าง ๆ กัน 16 ตัวอย่าง การทดสอบทำโดยใช้น้ำกลั่น ได้ผลดังนี้คือ อัตราการรั่วส่วนใหญ่มีค่าประมาณ  $5 \times 10^{-4}$  กรัม.ซม. $^{-2}$  วัน $^{-1}$  และในบางตัวอย่างมีอัตราการรั่วสูงถึง  $2 \times 10^{-3}$  กรัม.ซม. $^{-2}$  วัน $^{-1}$

ในปี 1966 K.T. Thomas ได้ทำการวิจัยที่ Trombay ประเทศอินเดีย โดยทำการทดลองฉีกสารกัมมันตรังสี เช่น  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  และ  $^{144}\text{Ce}$  กับซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนของซีเมนต์กับสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ กัน คือ 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 และได้มีการทดสอบอัตราการรั่วในเวลา 36 ชั่วโมง และ 7 วัน รวมเป็นเวลา 12 สัปดาห์ สรุปผลได้ว่าอัตราการรั่วของรังสีแกมมามีสูงกว่าบีตาหลายเท่า และพบว่าในการทดลองครั้งนี้อัตราการรั่วของกัมมันตรังสีมีกึ่งซึ่งมีสาเหตุมาจากส่วนผสมของซีเมนต์กับสารกัมมันตรังสีในรูปแบบสลักไม่เหมาะสม และวิธีการผสมยังไม่ดีพอ นอกจากนี้ยังมีการทดลองฉีกเข้าไปในยางมะคอบและทดสอบอัตราการรั่วอีกด้วย โดยการฉีกใช้อุณหภูมิ  $165^{\circ}\text{C}$

L. Antonucci แห่งประเทศอิตาลี ได้ทดลองแยกกากกัมมันตรังสีเรซินในซีเมนต์แล้วเก็บไว้ในภาชนะปิด

G.E. Lohse ทำการวิจัยที่ Idaho ประเทศอเมริกา ได้ทำการทดลองโดยแยกกากกัมมันตรังสีทุกชนิดที่ไม่ละลายน้ำกับซีเมนต์และยางมะตอย พบว่า ไม่มีการรั่วของกัมมันตรังสี และทดลองกับกากกัมมันตรังสีชนิดสลักพบว่ามีอัตราการรั่วน้อยมาก และสรุปว่าการทดลองนี้ได้ผลดีที่มีการรั่วของกัมมันตรังสีน้อย

ที่ประเทศอินเดีย Bhabha Atomic Research Centre แห่ง Trombay ได้ทำการวิจัยและทดลองแยกกากกัมมันตรังสีระดับปานกลางในยางมะตอย และได้ทดลองก้าวหน้าไปถึงวิธีการและอัตราการเร็วในขณะทำการแยกให้มีความเหมาะสม ระบบการถ่ายเทความร้อนและปริมาณกัมมันตรังสีที่เหมาะสมที่จะใช้ชนิด ชนิดของกากกัมมันตรังสีที่ใช้ในการทดลองมี สลักและกากจากขบวนการไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (ion exchange) จากโรงขจัดกากกัมมันตรังสีระดับต่ำ ได้ที่ไต่จากการแยกกากกัมมันตรังสีและอื่น ๆ ชนิดของยางมะตอยที่ใช้ในการทดลองมีหลายชนิดได้แก่ Mexphalt 60/20, Mexphalt 60/70, Esso 80/100

ที่ประเทศญี่ปุ่น ก็ได้มีการวิจัยและทดลองการแยกกากกัมมันตรังสีชนิดสลักที่ทำขึ้นมา โดยมีสารกัมมันตรังสีพวก  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  สลักเป็นตะกอนพวก  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}(\text{CN})_4$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  โดยแยกในยางมะตอยหลาย ๆ ชนิด พบว่าส่วนใหญ่ให้ลักษณะคล้าย ๆ กัน คือ เกิดฟองอากาศมาก (foaming) ในขณะทำการแยก ยกเว้นพวกยางมะตอยที่มีน้ำผสมอยู่ (emulsified bitumen) ซึ่งพบว่าได้ผลดี การทดสอบอัตราการรั่วพบว่า ถ้ามีกากกัมมันตรังสีในยางมะตอยเพิ่มมากขึ้น อัตราการรั่วจะเพิ่มขึ้น มีการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการรั่วในน้ำทะเลและน้ำที่ขจัดแร่ธาตุออกหมดแล้ว (demineralized water) พบว่า อัตราการรั่วในน้ำที่ขจัดแร่ธาตุออกแล้วมีสูงกว่าในน้ำทะเล การทดลองในครั้งนี้สรุปผลได้ว่า วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้และเป็นวิธีที่คุ้มค่าใช้จ่าย

ที่ประเทศปากีสถาน ได้ทำการทดลองภายใต้งานวิจัยของ IAEA ได้ทดลองผลของการผสมพวกกากกัมมันตรังสีที่มีเกลือไนเตรทกับยางมะตอย ในการทดสอบใช้ยางมะตอยหลาย ๆ ชนิด ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันภายในประเทศ ผลการทดลองในครั้งนี้สรุปผลได้ดังนี้ ส่วนผสมของกากกัมมันตรังสีในขนาด 40-45% โดยน้ำหนักได้ผลดี ทนต่อความกดดันต่าง ๆ ได้โดยไม่มีการแตก อนุญาตให้ใช้ในการแยก  $280^\circ\text{C}$  ผลการ



ทดสอบอัตราการรั่วของกัมมันตรังสีมีค่าสูงสุดในการผสมกากกัมมันตรังสีเข้าไป 50% มีอัตราการรั่วเท่ากับ  $8.5 \times 10^{-5}$  กรัม ซม.<sup>-2</sup>วัน<sup>-1</sup>

ในประเทศโปแลนด์ ก็ได้มีงานวิจัยค้นคว้าในคานนี้เช่นกัน โดยทดลองทำการผนึกบางมะคอบ กับ กากกัมมันตรังสีหลายชนิด ได้แก่ สลัดคกลาง ๆ งานทดลองนี้ใช้บางมะคอบชนิดที่มีในท้องถิ่น อัตราส่วนของ การผสมกากกัมมันตรังสีกับบางมะคอบ ขึ้นกับชนิดของกากกัมมันตรังสีและสภาพของสารกัมมันตรังสี

ในประเทศรัสเซียโดย A.A. Kohcenikevich ในปี 1968 ได้ทำการวิจัยและทดลอง ค้นคว้า เพื่อที่จะคัดเลือกชนิดของบางมะคอบที่จะใช้ในการผนึก ได้มีการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะใช้ในการทดลอง ศึกษาคุณสมบัติของบางมะคอบ เพื่อที่จะได้นำกากกัมมันตรังสีที่ผนึกไปแล้วฝังอย่าง ปลอดภัยต่อไป ในการผนึกกับบางมะคอบในกากกัมมันตรังสีชนิดต่าง ๆ เช่น สลัดค กากกัมมันตรังสีของ เหลวที่ระเหยแล้ว เถ้าที่เกิดจากการเผากากกัมมันตรังสี กากที่ได้จากขบวนการ ไอออน เอกซ์เรนท์ ปริมาณกัมมันตรังสีในกาก  $10^{-5} - 10^{-4}$  คูรี/เมตร<sup>3</sup> บางมะคอบที่ใช้ เลือกพวก Oxidise petroleum bitumen สารกัมมันตรังสีในกาก ได้แก่ <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>106</sup>Ru

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการ เกิดฟองอากาศในขณะที่ทำการทดลอง เพื่อแก้ไขข้อเสียในการผนึก และ เมื่อผนึกแล้วก็ยังมีการทดสอบอัตราการรั่วของกัมมันตรังสีด้วย ได้ค่าประมาณ  $10^{-5} - 10^{-6}$  กรัม.ซม.<sup>-2</sup>วัน<sup>-1</sup>

ในปี 1959 - 1970 L.A. Emelity แห่ง Los Alamos ประเทศอเมริกา มีความจำเป็นต้องการซัดกากกัมมันตรังสีของเหลว 5,000 ลิตร/นาที่ ซึ่งเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสลัดค ซึ่งมี <sup>241</sup>Am 1 มิลลิกรัม/ลิตร และ <sup>239</sup>Pu 1 มิลลิกรัม/ลิตร สารกัมมันตรังสี 2 ชนิดนี้ให้ รังสีอัลฟา ซึ่งเป็นอันตรายมากถ้าเข้าสู่ร่างกาย ดังนั้น จึงได้มีการทดลองผนึกเข้าไปในซีเมนต์ ในการผสม อัตราความเร็วของกากกัมมันตรังสีในขณะผสม 35 ลิตร/นาที่ และอัตราเร็วของซีเมนต์ 60-65 กิโลกรัม /นาที่ เมื่อผสมแล้วจึงใส่ในภาชนะที่ทำเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 เมตร ลึก 5-20 ซม ในการวิจัยนี้ได้มีการทดสอบ strength ของกากที่ผสมแล้ว ในปี 1970 พบความสัมพันธ์ของ strength กับอัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์ โดยน้ำหนักในช่อง 0.33 - 0.64 ได้ผลว่า strength มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ อัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์ลดลง

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบอัตราการรั่วของกัมมันตรังสีในน้ำประปา โดยเตรียมชนิดกากกัมมันตรังสีกับซีเมนต์ ขนาดของตัวอย่างที่ใส่ทดสอบ เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 ซม. ลึก 3.5 ซม. การทดสอบทำไปแล้วในภาชนะขนาด 9x9 ซม. ลึก 13.5 ซม. ใส่ น้ำ 500 ซีซี, ทำอัตราการรั่วใน 1 วัน โดยทำการวัดกัมมันตรังสี อัลฟา บีตา และแกมมา จนกระทั่งวัดกัมมันตรังสี 100 ครั้งก่อนที่ คอลิคร จึงทำการทดลองต่อไปดังนี้คือ ชั้นแรกทดสอบอัตราการรั่วทุกสัปดาห์ใน 1 เดือน ชั้นที่ 2 ทดสอบอัตราการรั่วทุก ๆ เดือน 6 เดือน ชั้นที่ 3 ทำการทดสอบทุก ๆ ปี การทดลองนี้ทำอยู่สูงสุด 98 เดือน วัดปริมาณกัมมันตรังสี อัลฟาที่รั่วออกมามีค่าเท่ากับ 0.081 %

1.6.2 การใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ระเหยน้ำในสลัก

ในการขจัดกากกัมมันตรังสีชนิดสลัก เนื่องจากกากกัมมันตรังสีที่อยู่ในรูปของสลักที่มีปริมาณน้ำอยู่ในตะกอนมาก ดังนั้น การลดปริมาณน้ำในสลักก่อนที่จะนำไปดำเนินการขจัดกัมมันตรังสีต่อไป การทดลองและวิจัยการลดปริมาณน้ำในสลัก ได้มีการคิดค้นวิธีการตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะดำเนินการในเรื่องนี้ เช่น วิธีการกรองโดยใช้เครื่องกรองแบบต่าง ๆ วิธีการปั่นในเครื่องปั่นเพื่อแยกน้ำออก และในการทดลองจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายด้วย ซึ่งวิธีต่าง ๆ เหล่านี้พบว่าสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ทั้งอุปกรณ์และแรงงาน ในปี ค.ศ. 1965 ที่ Lucas Heights ประเทศออสเตรเลีย โดย P.A. Bonhote และ L.D. Hespe ได้ทดลองนำวิธีการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ระเหยน้ำ(Solar Evaporation) ทำให้ปริมาณน้ำในสลักลดลง การทดลองในระยะเริ่มแรกมีการออกแบบ และขนาดของภาชนะที่จะใช้ โดยมีการใช้ฉนวนกันความร้อนที่ผนังและด้านล่างของภาชนะ และใช้พวกวัสดุโปร่งแสง เช่น พลาสติกต่าง ๆ ปิดครอบภาชนะ เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย และยังมีชั้นกรองน้ำเป็นพวกกรวดทรายกรองน้ำก่อนจะระบายออกทางท่อระบาย และได้มีการทดลองระเหยน้ำในภาชนะเปิด โดยมีการวัดปริมาณรังสีในอากาศ และในบริเวณที่ทำการทดลองด้วย เพื่อดูการฟุ้งกระจายของกัมมันตรังสี ปรากฏว่า ไม่พบการฟุ้งกระจาย และการคุกคามอากาศนี้เองยังทำให้อัตราการระเหยน้ำสูงขึ้นอีกด้วย สลักที่แห้งแล้วหลังการทดลองพบว่ามีปริมาณขึ้นอยู่เพียง 15 % และมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ และค่าใช้จ่ายโดยวิธีการนี้ค่า คือ ประมาณ 1.5 เซนต์ ต่อสลักปริมาณ 1 แกลลอน

ในปี 1972 Sang Hoon Lee ประเทศเกาหลี ไค่นาวิธีการที่ Lucas Height ไปใช้  
 ในประเทศ โดยทำการลดปริมาณน้ำในสลักที่ไค่นาจากกากกัมมันตรังสีของเหลว โดยวิธีการดูดซับของดิน  
 การศึกษาและวิจัยไค่นาหน้าไปจนถึงมีการทดลองหาอัตราการระเหยของน้ำตลอดช่วงเวลา 1 ปี เพื่อหาช่วง  
 เวลาที่มีอัตราการระเหยสูงสุด ไค่นา มีการออกแบบภาชนะและอุปกรณ์เครื่องใช้ ตลอดจนวิธีการคำนวณอัตราการ  
 ระเหย มีการทดลองแบบภาชนะปิดด้วยพลาสติกโปร่งแสงและภาชนะเปิด ปิด แต่เฉพาะในเวลาที่เป็นดก ลม  
 แร่ง และตอนกลางคืน ซึ่งพบว่าอัตราการระเหยสูงกว่า และยังไค่นาสอบใส่สีค่างในสลักเพื่อดูอัตราการ  
 ระเหยนำไปเปรียบเทียบกับแบบธรรมดา ผลการทดลองปรากฏว่า สลักที่มีน้ำ 60 % ในภาชนะที่มีขนาด  
 100 x 100 ซม. ความหนาของสลัก 5 และ 10 ซม. พบว่าใช้เวลา 15 วัน สำหรับสลักหนา 5 ซม.  
 และ 30 วัน สำหรับสลักหนา 10 ซม. ความชื้นในสลักลดลงเป็น 25-30% ถ้าใส่สีค่างในสลักหนา 5  
 ซม. พบว่าใช้เวลาเพียง 10-11 วัน

การคำนวณการวัดอัตราการระเหยไค่นา มีการทดลองและทดสอบหลายวิธี พบว่าวิธีที่สะดวกและใช้  
 ไค่นาว่างๆ ก็คือ การคำนวณอัตราการระเหยจากความเร็วลม และอุณหภูมิ โดยคิดความชื้นไอและความ  
 ชื้นไออิ่มตัว ดังนั้น จึงต้องอาศัยการวัดสภาพภูมิอากาศจากทางอุทกนิยมนวิทยา การวัดอัตราการระเหยคำนวณ  
 ไค่นา ดังนี้ :-

$$E = NU (e_0 - e_a)^1$$

เมื่อ E = อัตราการระเหย  
 N = ค่าคงที่  
 U = ความเร็วลม เมตรต่อวินาที  
 $e_0$  = ความชื้นไออิ่มตัวของผิวน้ำในสลัก  
 $e_a$  = ความชื้นไอของอากาศ

แต่ในขณะที่ทำการทดลองคิดว่าอุณหภูมิของผิวน้ำและอากาศเท่ากัน สมการคำนวณจะเปลี่ยนรูปเป็น

1 Sang Hoon Lee, "Treatment and Disposal of Low-level Radioactive Sludges by  
 Solar Evaporation" Korean Nuclear Society, 4 (1972) pp. 197-201.



$$E = 0.07 + 0.32 U_6 (e_o - e_a)$$

เมื่อ E = อัตราการระเหย มิลลิเมตรต่อวัน

$U_6$  = ความเร็วลม เมตรต่อวินาที

$e_o$  = ความชื้นไออิ่มตัวของอากาศ

$e_a$  = ความชื้นไอของอากาศ

### 1.7 คำนิยามและทฤษฎีต่าง ๆ

#### 1.7.1. กากกัมมันตรังสีระดับปานกลางและระดับต่ำ

กากกัมมันตรังสีแบ่งได้เป็นระดับต่าง ๆ ตามความแรงของกัมมันตรังสีที่มีอยู่ต่อหน่วยปริมาตรของกากกัมมันตรังสีที่ Hanford<sup>2</sup> ได้แบ่งกากกัมมันตรังสีเป็นระดับต่าง ๆ ดังนี้ ถ้าปริมาณกัมมันตรังสี ในกาก 100  $\mu$ Ci ต่อ ซีซี. เป็นกากกัมมันตรังสีระดับสูง กากกัมมันตรังสีระดับปานกลางมี ปริมาณ กัมมันตรังสี  $10^{-5} - 10 \mu$ Ci ต่อ ซีซี. และกากกัมมันตรังสีระดับต่ำมีปริมาณกัมมันตรังสีน้อยกว่า  $10^{-5} \mu$ Ci ต่อ ซีซี. ในการทดลองนี้ใช้กากกัมมันตรังสีระดับปานกลางและระดับต่ำ

#### 1.7.2 กากกัมมันตรังสีชนิดสลัก

วิธีการทั่ว ๆ ไป ที่ใช้ในการขจัดกัมมันตรังสีในกากกัมมันตรังสีของเหลวก็คือ การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี จุดประสงค์ของวิธีการนี้ก็คือการตกตะกอนของสารเคมีต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปเกลือที่ไม่ละลายน้ำหรือตะกอนที่อิมัลชันในน้ำ ตะกอนนี้จะดูดซับ (absorb) ไอออนกัมมันตรังสี วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ตะกอนที่มีน้ำหนัก เพื่อช่วยให้ตะกอนที่จับตัวกันพาเอาสารกัมมันตรังสีปนอยู่ในน้ำลงมากับตะกอนตกกลงมาแล้ว ก็แยกตะกอนออกจากน้ำ โดยวิธีการกรอง หรือ บั่นในเครื่องปั่นแยกน้ำออกมา สลัดักที่ อยู่ในรูปสารเคมีนี้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารกับกัมมันตรังสีถึง 90 - 98% ส่วนใหญ่ในการตกตะกอนจะทำที่ pH สูงกว่า pH 7 เล็กน้อย และถ้าตะกอนจับตัวกันไม่ดีจะทำให้การกรองหรือแยกออกลำบาก ก่อนกรองปริมาณตะกอนจะมีอยู่เพียง 5%

ในการทดลองนี้กากกัมมันตรังสีชนิดสลัดักที่ใช้ในการทดลองมาจากโรงขจัดกากกัมมันตรังสี ของสำนักงาน พลส. ซึ่งตกตะกอนกากกัมมันตรังสีของเหลวโดยใช้ โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2 CO_3$ ), คอปเปอร์ซัลเฟต ( $Cu SO_4$ ) และสารส้ม ( $K_2 SO_4 \cdot Al_2 (SO_4)_3 \cdot 24 H_2O$ )

---

2. Conrad P. Straub, "Classification of Radioactive Waste", Low - Level Radioactive Wastes, 1964. pp. 3-5

### 1.7.3 กากกัมมันตรังสีชนิดเรซิน

การขจัดกัมมันตรังสีจากกากกัมมันตรังสีของเหลวอีกวิธีหนึ่งก็คือ ใช้วิธี ไอออน แลกซ์ เชนท์ (Ion exchange) สารที่แลกเปลี่ยน ไอออน ใช้สารพวกอินทรีย์ และอนินทรีย์เคมี ที่ประจุสูงและที่มีอยู่ในธรรมชาติ ตามทฤษฎีเมื่อ ไอออน ของกัมมันตรังสีถูกเติมในสารที่แลกเปลี่ยนไอออนและจะติดอยู่บางส่วนและปลดปล่อย แต่จริง ๆ อาจเกิดปฏิกิริยาในทางกลับได้ในบางสภาวะ ทำให้สารกัมมันตรังสีที่ติดอยู่ที่เม็ดเรซินหลุดออกมาได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาวิธีเก็บกากกัมมันตรังสีเหล่านี้

กากกัมมันตรังสีชนิดเรซินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเรซินที่ประจุสูงมา ชนิด Amberlite Menobed IRN - 50 ซึ่งได้จากระบบทำความสะอาดน้ำของ บ่อ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

### 1.7.4 อัตราการรั่วของกัมมันตรังสี

ในการศึกษากากกัมมันตรังสีเข้าไปในสารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ขางมะตอย หรือ คอนกรีต ก่อนที่จะทิ้งในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติจำเป็นต้องคำนึงถึงการรั่วของกัมมันตรังสีที่จะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในน้ำและคำนึงถึงความคงทนของกากกัมมันตรังสีที่ผนึกแล้ว ดังนั้น การทดสอบอัตราการรั่วจึงมีความจำเป็นต้องทำการทดลองและคำนวณหาอัตราการรั่ว จากการทดลองเกี่ยวกับขบวนการ ฟุ้ง (Diffusion) พบว่าอัตราการรั่วเป็นไปตามกฎของ Fick<sup>3</sup>

$$\text{คือ } \frac{Q}{t^{\frac{1}{2}}} = C \sqrt{te}$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณกัมมันตรังสีทั้งหมดในสารละลายต่อหน่วยพื้นที่ผิวในระยะเวลา t สัมประสิทธิ์ของการฟุ้ง (Diffusion Coefficient) คัดได้จากสมการ

$$D = \frac{(Q_1/t^{\frac{1}{2}})^2}{4 C_0^2}$$

เมื่อ C<sub>0</sub> เป็นความเข้มข้นของกัมมันตรังสีในสารผสม

จากผลการทดลองใน อเมริกา การคำนวณหาอัตราการรั่วได้ตั้งสมมติฐานอันหนึ่งว่า อัตราการรั่วขึ้นกับความสามารถในการละลายของกัมมันตรังสีที่ผนึกในขางมะตอย อัตราการรั่วจึงคำนวณได้จากสมการ

3. International Atomic Energy Agency, "Disposal of Bituminous Products", Bituminization of Radioactive Wastes, 1970.pp. 69

$$\frac{\text{ปริมาณกัมมันตรังสีที่รั่ว/ปริมาณกัมมันตรังสีทั้งหมดในสารตัวอย่าง}}{(\text{พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง/น้ำหนักของสารตัวอย่าง})(\text{เวลา})} = \frac{\text{ส่วนที่รั่วของออกมา}}{(\text{ชม.}^2/\text{กรัม})(\text{วัน})}$$

อัตราการรั่วจะมีค่าออกมาเป็น กรัม ชม.<sup>-2</sup> วัน<sup>-1</sup> ไซกันโดยทั่ว ๆ ไป

ในบางการทดลองอัตราการรั่วคิดได้อย่างง่าย ๆ คือ การหาอัตราส่วนของกัมมันตรังสีที่รั่วออกมาในช่วงเวลาหนึ่ง ต่อปริมาณกัมมันตรังสีทั้งหมดที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่หนักแล้ว ซึ่งใช้ในการทดลองนี้จะคำนวณโดยวิธีนี้

#### 1.7.5 บางมะตอย

บางมะตอยจัดเป็นสารอินทรีย์เคมีส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอน (Carbon) กับ ไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ลักษณะกล่าวได้ว่าเป็นของแข็งที่ยุ่ยได้ หรือเป็นของเหลวที่มีความหนืดมาก หรืออาจจะกล่าวได้อีกว่ามีลักษณะกลาง ๆ ระหว่างของแข็งกับของเหลว บางมะตอยแบ่งได้หลายชนิดตามวิธีการผลิต คือ

ชนิดที่ไต่จากส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ

ชนิดที่เป็นของเหลวโดยการเคี่ยวตัวทำละลาย (solvent) เข้าไปเรียกว่า Pitches

ชนิดที่ไต่จากการพ่นอากาศเข้าไปในปิโตรเลียม (petroleum) เรียกว่า Oxidized Bitumen บางมะตอยชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่ทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงสถานะไป ดังนั้น จึงเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่ว ๆ ไปในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความคงทน

ชนิดที่ไต่จากการเกิดการแตกของสารโมเลกุลใหญ่ที่มีน้ำหนักมาก มีลักษณะที่สำคัญคือ มีการไหลที่ดีในอุณหภูมิสูง และแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเย็น

ในการทดลองนี้ใช้บางมะตอยชนิด อาร์ 115/15 เป็นบางมะตอยชนิด Oxidized Bitumen ประกอบด้วยสารที่เรียกว่า Mexphalt

1.7.6 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นสารผสมระหว่าง หินทราย ซีเมนต์ และน้ำ ซีเมนต์ที่ใช้ผสมเป็นชนิดที่เรียกว่า Portland Cement ประกอบด้วย  $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  และ  $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  เป็นส่วนใหญ่ และมี  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  เป็นส่วนน้อย Portland Cement เป็นซีเมนต์ชนิดแห้งเร็ว คอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรง เพราะเมื่อผสมกันเข้าไปแล้วจะจับรวมตัวกันเป็นก้อนแข็ง ทนต่อแรงกดทับได้ดี ในการทดลองนี้จึงใช้คอนกรีตเป็นสารที่เก็บฉนวนกักเก็บมันตรังสีของแข็ง

1.7.7 คุณสมบัติของน้ำประปา น้ำคลอง และน้ำทะเล

น้ำประปา น้ำคลอง และน้ำทะเล ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการรั่วของกัมมันตรังสีในการทดลองนี้ ได้ผ่านวิเคราะห์คุณสมบัติตลอดจนปริมาณเกลือแร่ต่าง ๆ ที่มีอยู่ การวิเคราะห์ที่ได้อัตราดังต่อไปนี้คือ:-

	น้ำประปา*	น้ำคลอง**	น้ำทะเล* (ไม่ใคร่กรวมคอลลิตร)
เกลือแร่ทั้งหมด	404 ppm	140 ppm	สังกะสี (Zn) 15
ความกระด้างทั้งหมด	188 "	90 "	เหล็ก (Fe) 600
คลอไรด์			โคบอลต์ (Co) 2
คิดเป็นคลอรีน	58 "	—	ทิตาเนียม (Ti) 1
คิดเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์	95.6 "	12 "	ทองแดง (Cu) 10
ไนเตรท	0.160 "	0.3 "	วานาเดียม (V) 0.1
ไนไตรท์	0.002 "	— "	แมงกานีส (Mn) 111
เหล็ก	0.10 "	1.6 "	ดีบุก (Sn) 1.5
แคลเซียม	45 "	29 "	นิกเกิล (Ni) 1.0
สี	5 หน่วย	5 หน่วย	โมลิบดีนัม (Mo) 1.0
ความขุ่น	3.5 "	40 "	
ความเป็นกรดเป็นด่าง	8.2	8.5	

\* วิเคราะห์โดย กรมวิทยาศาสตร์

\*\* วิเคราะห์โดย กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี