



รายงานการวิจัย

การสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับประสิทธิภาพสูง  
เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

Uranium Recovery from Seawater Using High Efficiency  
Adsorbent for Future Alternative Energy Source

โดย

รศ.ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง และคณะ

ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤษภาคม พ.ศ. 2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยในเฟสที่สองนี้ได้ทำการศึกษาสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลเพื่อดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยศึกษาชนิดของโคมอนอเมอร์ (อะครีโลไนไตรล์/เมทาคริลิก แอซิด และ อะครีโลไนไตรล์/อะคริลิก แอซิด) ชนิดของสารเชื่อมโยง (เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์, กลูตาราลดีไฮด์ และ บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท) ผลของระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับ ประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวดูดซับ อีกทั้งยังทำการศึกษาผลการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในสภาวะตามธรรมชาติและในน้ำทะเลเข้มข้น เพื่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

ผลการศึกษาพบว่า โคมอนอเมอร์ที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีที่สุด คือ อะครีโลไนไตรล์/เมทาคริลิก แอซิด สารเชื่อมโยงที่ใช้ในการสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลที่ทำให้สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีที่สุดคือ เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์และบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีและให้ผลการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน ผลของระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดคือ 2 ชั่วโมง ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำพบว่า เมื่อใช้ตัวดูดซับซ้ำเป็นจำนวน 8 ครั้งประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมลดลงประมาณ 50% เมื่อเทียบกับการใช้ครั้งแรก

การทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับโดยการนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่ในบริเวณน้ำทะเลในสภาวะธรรมชาติและน้ำทะเลเข้มข้น ที่เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี เป็นเวลา 2 - 8 สัปดาห์ พบว่า เมื่อนำตัวดูดซับไปจุ่มในบริเวณน้ำทะเลธรรมชาติ ปริมาณยูเรเนียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่ที่นานขึ้นสูงสุดที่ 8 สัปดาห์ และปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด คือ 0.125 mg/g และเมื่อนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่ในบริเวณน้ำทะเลเข้มข้น พบว่า ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นที่ผ่านตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญมากที่ส่งผลต่อปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ โดยที่อัตราการไหลประมาณ 18 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด คือ 0.30 mg/g ที่ 8 สัปดาห์

## Abstract

The second phase of this research was to study the synthesis of amidoxime polymer gel to adsorb uranium in seawater. Types of co-monomer (acrylonitrile / methacrylic acid and acrylonitrile / acrylic acid), crosslinking agent (methylene bisacrylamide, glutaraldehyde, and butanediol diacrylate), elution time, and reuse efficiency of the adsorbent were evaluated. Moreover, adsorption in seawater in natural conditions and in brine concentrate was studied to allow synthesis of the most effective polymer gel to extract uranium in seawater.

Results revealed that the co-monomer and the crosslinking agent exhibiting the highest uranium adsorption were acrylonitrile / methacrylic acid and methylene bisacrylamide and butanediol diacrylate, respectively. The optimum elution time was determined to be 2 hr. Results of reuse efficiency test demonstrated that after 8 times of repeated use, the uranium adsorption capacity decreased by about 50% compared to the initial value.

The efficiency of the adsorbents was evaluated with natural seawater and brine concentrate at Koh Lan, Chonburi Province for 2 - 8 weeks. It was found that uranium loading in natural seawater increased with increasing submersion time. At 8 weeks, the adsorption reached 0.125 mg/g. It was also found that the adsorption increased with increasing submersion time in brine concentrate and that the flow rate of brine concentrate significantly affected the uranium adsorption capacity. With the flow rate of approximately 18 m<sup>3</sup>/hr, the maximum uranium adsorption was 0.30 mg/g after 8 weeks.

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทนำ.....	1
เนื้อเรื่อง.....	29
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
บรรณานุกรม.....	55

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล [2] .....	5
ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในรูปที่ไอออนต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล [3].....	6
ตารางที่ 3 Functional group ที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้โดยการแทนที่ Carbonate ion ใน $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ [3] .....	8
ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยกลุ่มนักวิจัยต่างๆ .....	20
ตารางที่ 5 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน .....	43
ตารางที่ 6 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน .....	45

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 โครงสร้างของ Tricarbonato uranyl anion [2].....	7
รูปที่ 2 การเกิด Irradiation-induced graft polymerization [10] .....	9
รูปที่ 3 การดูดซับยูเรเนียม (การเกิด Complexion) โดยหมู่ Amidoxime functional group [10] .....	10
รูปที่ 4 การสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์และเส้นใย Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว [10] .....	11
รูปที่ 5 ลักษณะการทดสอบภาคสนามของการวิจัยการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย [10] .....	13
รูปที่ 6 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้และตัวอย่างเค็กเกลือที่สกัดได้ [10] .....	14
รูปที่ 7 โครงสร้างโมเลกุลของอะคริโลไนไตรล์ .....	16
รูปที่ 8 โครงสร้างโมเลกุลของเมทาคริลิกแอซิด .....	16
รูปที่ 9 โครงสร้างโมเลกุลของอะคริลิกแอซิด .....	17
รูปที่ 10 โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ .....	18
รูปที่ 11 โครงสร้างโมเลกุลของกลูตาราลดีไฮด์ .....	18
รูปที่ 12 โครงสร้างโมเลกุลของบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท .....	19
รูปที่ 13 ตำแหน่งที่ทำการศึกษาเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและวางตัวดูดซับยูเรเนียมในโครงการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย .....	23
รูปที่ 14 หลักการทำงานของ Reverse Osmosis ในภาพรวม และภาพตัดขวางของตัวกรอง .....	25
รูปที่ 15 โรงงาน Desalination plant ในต่างประเทศ .....	26
รูปที่ 16 ปีกเกอร์บรรจุน้ำทะเลที่ใช้ในการจุ่มแช่ตัวดูดซับยูเรเนียมในห้องปฏิบัติการวิจัย .....	35
รูปที่ 17 การแช่ตัวดูดซับในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์ .....	36
รูปที่ 18 ผงธาตุที่ดูดซับได้สีเหลืองที่แห้งติดอยู่ด้านล่างของปีกเกอร์ .....	37
รูปที่ 19 กระบวนการทดสอบการใช้ซ้ำของตัวดูดซับ .....	38
รูปที่ 20 Lay out การวางตำแหน่งของถังพลาสติกที่ใช้จุ่มแช่ตัวดูดซับและลักษณะการวางท่อน้ำทะเลเข้มข้นเข้าถัง .....	40
รูปที่ 21 การจุ่มแช่ตัวดูดซับบริเวณพื้นที่จริง ณ โรงงานผลิตน้ำประปา เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี .....	40
รูปที่ 22 พอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสีของมอนอเมอร์ผสมอะคริโลไนไตรท์และอะคริลิกแอซิด .....	41
รูปที่ 23 เอมีตอกซิมพอลิเมอร์หลังผ่านกระบวนการต่างๆ พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียม (a) AN:AA (b) AN:MAA .....	41
รูปที่ 24 พอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสีจากสารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน (a) สารเชื่อมโยงกลูตาราลดีไฮด์ (b) สารเชื่อมโยงบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท .....	42

รูปที่ 25 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้คอมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน .....	44
รูปที่ 26 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน.....	46
รูปที่ 27 ผลของระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับ (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และ ปริมาตร H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 มิลลิลิตร) .....	48
รูปที่ 28 การใช้ซ้ำของตัวดูดซับยูเรเนียม (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และ ปริมาตร H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 มิลลิลิตร).....	48
รูปที่ 29 การศึกษา kinetic absorption ในน้ำ DI และน้ำทะเลของตัวดูดซับ (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม).....	49
รูปที่ 30 ผลการดูดซับยูเรเนียมบริเวณน้ำทะเลในสภาวะธรรมชาติ (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, ปริมาณสารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และปริมาตร H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 มิลลิลิตร).....	50
รูปที่ 31 ผลการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลเข้มข้น (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, ปริมาณสารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และปริมาตร H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 มิลลิลิตร).....	51

## บทนำ

เนื่องจากวิกฤตด้านพลังงานทั่วโลกในปัจจุบัน ทำให้มากกว่า 30 ประเทศที่ยังไม่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีแผนที่จะสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อย่างจริงจัง และหลายประเทศทั่วโลกที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อยู่แล้ว ก็มีแผนที่จะสร้างเพิ่มขึ้นอีก ทำให้ในปัจจุบันทั่วโลกมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อยู่ระหว่างการก่อสร้างถึง 57 โรง [International Atomic Energy Agency (IAEA), 22 ตุลาคม ค.ศ. 2017] สำหรับประเทศไทย มีการบรรจุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ไว้ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เป็นที่ชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วโลกจะส่งผลให้มีความต้องการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์หรือยูเรเนียมมากขึ้น สินแร่ยูเรเนียมที่มีในเมืองต่างๆ ที่กำลังดำเนินการและที่ยังไม่ถูกค้นพบจะต้องถูกนำมาใช้และหมดไปในที่สุด จึงเป็นที่น่าสนใจว่าน้ำทะเลซึ่งมีการประมาณว่ามีปริมาณยูเรเนียมมากกว่าบนผิวโลกถึง 1,000 เท่า หรือประมาณ 4,000 ล้านตัน ซึ่งถ้าเพียงครึ่งหนึ่งของยูเรเนียมในน้ำทะเลนี้สามารถถูกสกัดนำมาใช้ได้ จะสามารถจ่ายเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วโลกได้นานถึง 6,500 ปี ตัวเลขนี้เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เพิ่มขึ้นจากปัจจุบันประมาณ 8 เท่า (เป็น 3,000 GWe) ดังนั้นยูเรเนียมในน้ำทะเลจึงสามารถจัดว่าเป็น Ultimate resource ที่ไม่มีวันหมดและไม่มีเจ้าของ หลายประเทศที่มีชายฝั่งทะเลเช่นญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ก็มีการวิจัยการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลอย่างต่อเนื่อง ปัจจัยเดียวในตอนนี้ที่ทำให้การสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลยังไม่มี การดำเนินการในลักษณะอุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนการสกัดจากน้ำทะเลยังสูงกว่าการผลิตจากเหมืองต่างๆ อยู่ โดยงานวิจัยเรื่องการศึกษารสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย [1] ซึ่งได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้คำนวณว่าต้นทุนการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย หากสกัดที่ปริมาณ 10 ตันต่อปี จะอยู่ที่ประมาณ 2,960 US\$/kg  $U_3O_8$  หรือสูงกว่าราคาอ้างอิงยูเรเนียมที่ 162 US\$/kg  $U_3O_8$  ประมาณ 18 เท่า

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการที่เชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงและจากการที่ราคายูเรเนียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นลำดับ และจากการที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตไฟฟ้า ทำให้มีความเป็นไปได้



ได้สูงที่ราคายูเรเนียมจะสูงพอที่จะสามารถสกัดจากน้ำทะเลในเชิงพาณิชย์ได้ และหากทั่วโลกมีความต้องการยูเรเนียมสูงขึ้นมากในอนาคต หรือหากเกิดกรณีสงครามในหลายแห่งทั่วโลกซึ่งอาจกระทบต่อ Supply ของยูเรเนียม ก็อาจทำให้แต่ละประเทศที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องจัดหาแร่ยูเรเนียมเอง (โดยส่งต่อไปให้บริษัทต่างประเทศทำการเสริมสมรรถนะและผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงให้) การที่ประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่ยาวและเป็นอิสระจากเพื่อนบ้านจึงเป็นโอกาสอันดีอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องและให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตั้งแต่เวลานี้ เพราะการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้ดียิ่งขึ้นและการผลิตบุคลากรที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้ต้องใช้เวลานานที่สำคญคือการทำที่ประเทศไทยจะสามารถพึ่งพาตนเองด้านพลังงานได้อย่างยั่งยืน จำเป็นต้องศึกษาหาทางพึ่งพาตนเองด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ด้วย

#### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับเอมีตอกซิมเจลประสิทธิภาพสูงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

#### ทฤษฎี สมมติฐาน และ / หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

ได้มีการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลมาก่อนช้านานแล้ว ในแต่ละการศึกษาที่ใช้วัสดุในการดูดซับที่แตกต่างกันเช่น Porous membrane, polymer, lead naphthalene tetracarboxylate, lead pyrophosphate, lead stannate, lead sulfide, hydrous titanium oxide, basic zinc carbonate และ Functional group สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสม สามารถนำเอา Functional group ที่เหมาะสมไปต่อกับวัสดุพอลิเมอร์เพื่อใช้ดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่าหมู่ Amidoxime functional group มีความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมที่สูงมาก และงานวิจัยในประเทศญี่ปุ่นหลายชิ้นรวมถึงการทดสอบภาคสนาม ก็ได้ใช้หมู่นี้ในการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเล

นอกจากนี้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยศึกษาสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย ซึ่งดำเนินการแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2556 [1] โดยผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจมาก เนื่องจากสามารถผลิต Amidoxime fiber ได้โดยใช้ทรัพยากรที่มีในประเทศ และการดูดซับยูเรเนียมในทะเลฝั่งอันดามันมีประสิทธิภาพสูง

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการใช้เส้นใย Polyethylene fiber เพื่อนำมาใช้เป็น substrate ในการดูดซับยูเรเนียมอย่างไรก็ตามการใช้เส้นใย Polyethylene fiber เพื่อเป็น Substrate ให้เกิดการกราฟต์ของหมู่ฟังก์ชันนั้น มวลของเส้นใยจะเป็นส่วนหนึ่งของมวลของตัวดูดซับ ทำให้เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับโดยมีหน่วยเป็น mg-U adsorbed/g adsorbent แล้วนั้น จะมีค่าที่ไม่สูงเท่ากับหากไม่ต้องมีมวลของ Substrate อยู่ด้วย งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลที่มีประสิทธิภาพสูง Amidoxime gel โดยในการสังเคราะห์จะไม่ใช้ Substrate แต่จะใช้ Crosslink agent ระหว่างการฉายรังสีมอนอเมอร์ เพื่อให้หมู่ฟังก์ชันเกิดการ Crosslink และเป็นเจลที่เสถียรขึ้น ซึ่งหลังจากบดให้เจลเป็นอนุภาคขนาดเล็กแล้ว สามารถนำอนุภาค Amidoxime gel เหล่านี้ไปดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ การศึกษาวิจัยในเฟสแรกของงานวิจัยการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเล ได้ทำการผสม  $H_2O_2$  เข้ากับสารละลายมอนอเมอร์และฉายแสง UV-C เพื่อให้เกิดการ Polymerize และ Crosslink เกิดเป็นพอลิเมอร์เจลขึ้นมา และในเฟสแรกนั้นผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับยูเรเนียมโดยได้ศึกษาผลของตัวแปรดังต่อไปนี้

1. สัดส่วนของ Acrylonitrile monomer ต่อ Methacrylic acid monomer
2. สัดส่วนของ Crosslink agent
3. ระยะเวลาการฉายแสง UV-C
4. อุณหภูมิระหว่างการฉายแสง UV-C

ผลการศึกษาวิจัยจากเฟสแรก พบว่าตัวแปรดังต่อไปนี้คือตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ให้การดูดซับยูเรเนียมได้สูงที่สุด ได้แก่ สัดส่วนของ Acrylonitrile monomer ต่อ Methacrylic acid monomer คือ 80:20, สัดส่วน

ของ Crosslink agent คือ 1 กรัม/100 มิลลิลิตรมอนอเมอร์, ระยะเวลาการฉายแสง UV-C คือ 8 ชั่วโมง และ อุณหภูมิระหว่างการฉายแสง UV-C คือ 45 °C

ดังนั้นในเฟสที่สองของการศึกษาการสกัดยูเรเนียมในน้ำทะเล จะศึกษาตัวแปรเพิ่มเติมจากเฟสแรก ดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนชนิดของโคมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลจากเมทาคริลิกแอซิด (MAA) เป็น อะคริลิกแอซิด (AA)
2. การเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมโยงที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลจากเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA) เป็น กลูตาราลดีไฮด์ (GA) และ บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท (BDDA)
3. การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวดูดจับ
4. การนำตัวดูดจับไปวางในบริเวณน้ำทะเลธรรมชาติ
5. การนำตัวดูดจับไปวางในบริเวณน้ำทะเลเข้มข้น (Brine concentration) ที่กิจการประปาเกาะล้าน จังหวัดชลบุรี

การศึกษาตัวแปรที่เพิ่มเติมเหล่านี้จะช่วยทำให้การดูดจับมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และยังได้รู้ถึง ประสิทธิภาพการดูดจับยูเรเนียมที่แท้จริงเมื่อนำตัวดูดจับไปวางในบริเวณน้ำทะเลที่มีสภาพแวดล้อมตาม ธรรมชาติ ซึ่งอาจมีปัจจัยในด้านกระแสน้ำ และกระแสนลมของทะเล ความขุ่นของน้ำทะเล และไอออนต่างๆ ที่ อาจส่งผลต่อการดูดจับทั้งสิ้น

#### การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

น้ำทะเลเป็นแหล่งธาตุต่างๆ มากมาย โดยมีธาตุต่างๆ ประมาณ 80 ชนิดที่สามารถตรวจวัดได้ อย่างไรก็ตาม เคมีของน้ำทะเลถูกควบคุมด้วย 6 ไอออนเหล่านี้เท่านั้นคือ  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , และ  $\text{SO}_4^{2-}$  เนื่องจาก เป็นองค์ประกอบ มากกว่า 99.5% ของไอออนทั้งหมดที่ละลายอยู่ในทะเล ตารางที่ 1 แสดงธาตุต่างๆ ที่ละลาย อยู่ในน้ำทะเล

ตารางที่ 1 ธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล [2]

Metal	Concentration		Main chemical species
	[mol/l]	[mg/l]	
Li	$2.5 \times 10^{-5}$	0.173	$\text{Li}^+$
Be	$6.3 \times 10^{-10}$	$5.6 \times 10^{-6}$	$\text{Be}(\text{OH})^+$
Na	0.468	$10.77 \times 10^3$	$\text{Na}^+$
Mg	$5.32 \times 10^{-2}$	$12.9 \times 10^2$	$\text{Mg}^{2+}$
Al	$3.7 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$
K	$1.02 \times 10^{-2}$	$3.8 \times 10^2$	$\text{K}^+$
Ca	$1.02 \times 10^{-2}$	$4.12 \times 10^2$	$\text{Ca}^{2+}$
Sc	$1.3 \times 10^{-11}$	$6 \times 10^{-7}$	$\text{Sc}(\text{OH})_3$
Ti	$2 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-3}$	$\text{Ti}(\text{OH})_4$
V	$3.7 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$\text{H}_2\text{VO}_4^-$ , $\text{HVO}_4^{2-}$
Cr	$1.54 \times 10^{-9}$	$8.0 \times 10^{-5}$	$\text{Cr}(\text{OH})_3$ , $\text{CrO}_4^{2-}$
Mn	$3.6 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$\text{Mn}^{2+}$ , $\text{MnCl}^+$
Fe	$2.3 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ , $[\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$
Co	$6.8 \times 10^{-10}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$\text{Co}^{2+}$
Ni	$3.4 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$\text{Ni}^{2+}$
Cu	$1.6 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$\text{CuCO}_3$ , $\text{Cu}(\text{OH})^+$
Zn	$1.5 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$\text{Zn}(\text{OH})^+$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{ZnCO}_3$
Ga	$4.3 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-5}$	$[\text{Ga}(\text{OH})_4]^-$
Ge	$6.9 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-5}$	$\text{Ge}(\text{OH})_4$
Rb	$1.4 \times 10^{-6}$	0.12	$\text{Rb}^+$
Sr	$9.2 \times 10^{-5}$	8.1	$\text{Sr}^{2+}$
Y	$1.5 \times 10^{-11}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$\text{Y}(\text{OH})_3$
Zr	$3.3 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-5}$	$\text{Zr}(\text{OH})_4$
Nb	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-5}$	-
Mo	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$\text{MoO}_4^{2-}$
Ag	$9.3 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$[\text{AgCl}_2]^-$
Cd	$8.9 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$\text{CdCl}_2$
In	$0.8 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-5}$	$\text{In}(\text{OH})_2^+$
Sn	$8.4 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-5}$	$[\text{SnO}(\text{OH})_3]^-$
Sb	$1.7 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$[\text{Sb}(\text{OH})_6]^-$
Cs	$3 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$\text{Cs}^+$
Ba	$1.5 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$\text{Ba}^{2+}$
La	$2 \times 10^{-11}$	$3 \times 10^{-5}$	$\text{La}(\text{OH})_3$
Ce	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-5}$	$\text{Ce}(\text{OH})_3$
Pr	$4 \times 10^{-12}$	$6 \times 10^{-5}$	$\text{Pr}(\text{OH})_3$
Nd	$1.9 \times 10^{-11}$	$3 \times 10^{-5}$	$\text{Nd}(\text{OH})_3$
Sm	$3 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-5}$	$\text{Sm}(\text{OH})_3$

Eu	$9 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-8}$	$\text{Eu}(\text{OH})_3$
Gd	$4 \times 10^{-12}$	$4 \times 10^{-7}$	$\text{Gd}(\text{OH})_3$
Tb	$9 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-7}$	$\text{Tb}(\text{OH})_3$
Dy	$6 \times 10^{-12}$	$9 \times 10^{-7}$	$\text{Dy}(\text{OH})_3$
Ho	$1 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-7}$	$\text{Ho}(\text{OH})_3$
Er	$4 \times 10^{-12}$	$8 \times 10^{-7}$	$\text{Er}(\text{OH})_3$
Tm	$8 \times 10^{-13}$	$2 \times 10^{-7}$	$\text{Tm}(\text{OH})_3$
Yb	$5 \times 10^{-12}$	$8 \times 10^{-7}$	$\text{Yb}(\text{OH})_3$
Lu	$9 \times 10^{-13}$	$2 \times 10^{-7}$	$\text{Lu}(\text{OH})_3$
Hf	$4 \times 10^{-11}$	$7 \times 10^{-6}$	-
Ta	$1 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-6}$	-
W	$5 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$\text{WO}_4^{2-}$
Re	$2 \times 10^{-11}$	$4.0 \times 10^{-6}$	$\text{ReO}_4^-$
Au	$5.1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-5}$	$[\text{AuCl}_2]^-$
Hg	$5.0 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-5}$	$[\text{HgCl}_4]^{2-}, \text{HgCl}_2$
Tl	$5 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-5}$	-
Pb	$7.2 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$\text{PbCO}_3, [\text{Pb}(\text{CO}_3)_2]^{2-}$
Bi	$1 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-5}$	$\text{BiO}^+, \text{Bi}(\text{OH})_2^+$
Ra	$3 \times 10^{-16}$	$7 \times 10^{-11}$	$\text{Ra}^{2+}$
Th	$4 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-5}$	$\text{Th}(\text{OH})_4$
Pa	$2 \times 10^{-16}$	$5 \times 10^{-11}$	-
U	$1.4 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-3}$	$[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$

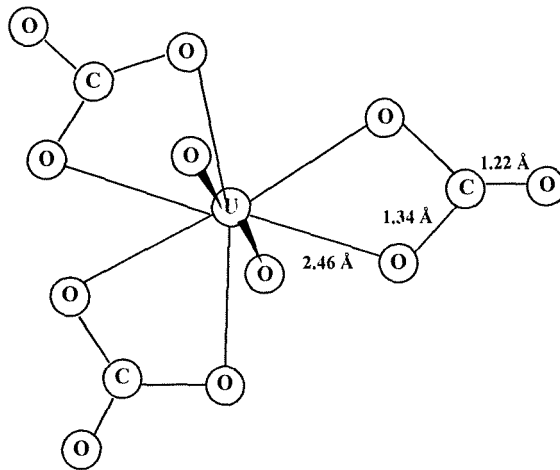
สำหรับยูเรเนียม มีไอออนชนิดต่างๆ ละลายอยู่ในน้ำทะเลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในรูปที่ไอออนต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล [3]

Compound	Concentration [mo/L]	Weight fraction [wt% of U]
$\text{UO}_2^{2+}$	$1.53 \times 10^{-17}$	$0.01 \times 10^{-5}$
$\text{UO}_2(\text{OH})_2$	$1.53 \times 10^{-12}$	0.01
$[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$	$5.46 \times 10^{-11}$	0.39
$[\text{UO}_2(\text{OH})_3]^-$	$2.43 \times 10^{-10}$	1.75
$[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$	$1.37 \times 10^{-8}$	98.82

จะเห็นว่ายูเรเนียมที่มีอยู่ในน้ำทะเล อยู่ในรูปไอออนหลักคือ Tricarbonato uranylate anion

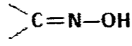
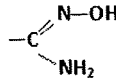
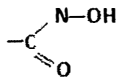

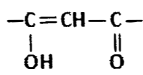
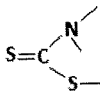
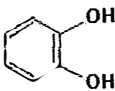
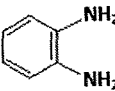
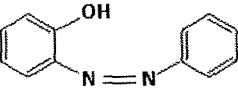
$[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$  ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของ Tricarbonato uranylate anion [2]

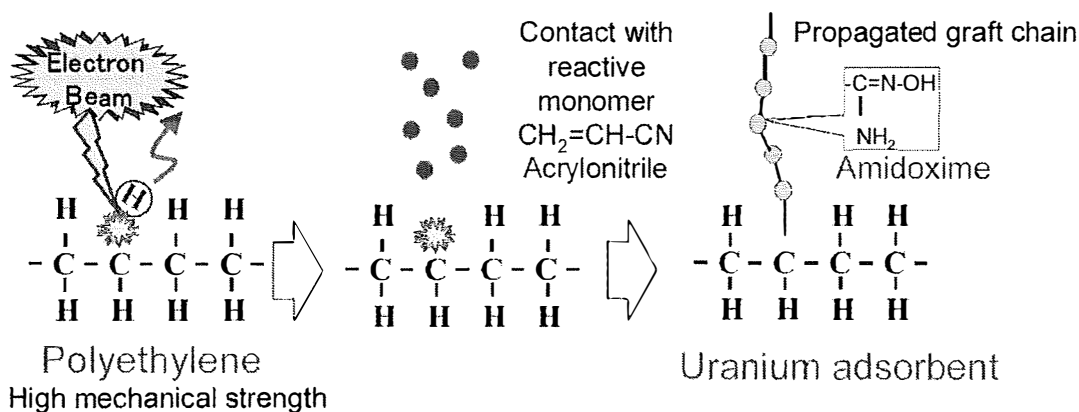
ได้มีการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลมาค่อนข้างนานแล้ว โดยเริ่มครั้งแรกสุดเมื่อปี ค.ศ. 1953 และมีการศึกษาหลังจากนั้นมากมาย โดยหลักๆ มีการศึกษาวิจัยในประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ในแต่ละการศึกษาก็ใช้วัสดุในการดูดซับที่แตกต่างกันเช่น Porous membrane, polymer, lead naphthalene tetracarboxylate, lead pyrophosphate, lead stannate, lead sulfide, hydrous titanium oxide, basic zinc carbonate และ Functional group สำหรับ Functional group ที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้โดยการแทนที่ Carbonate ion ใน  $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$  แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Functional group ที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้โดยการแทนที่ Carbonate ion ใน  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$  [3]

Functional groups	Structure
Oximes	
Amidoximes	
Hydroxamic acids	
Hydroxylamines	
1, 3-Diketones	
Dithiocarbaminates	
o-Dihydroxyaromatics	
o-Diaminoaromatics	
o-Hydroxyazoaromatics	

ซึ่งสามารถนำเอา Functional group เหล่านี้ไปต่อกับวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ จากการศึกษางานวิจัยที่สามารถนำมาพัฒนาต่อยอดได้คือเรื่องในเอกสารอ้างอิงลำดับที่ 4 - 9 [4-9] โดยงานวิจัยเหล่านี้ได้ศึกษาการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลหรือตัวอย่างน้ำทะเลโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ว่าวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์นี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลที่สูงมากเนื่องจากหมู่ Amidoxime functional group มี

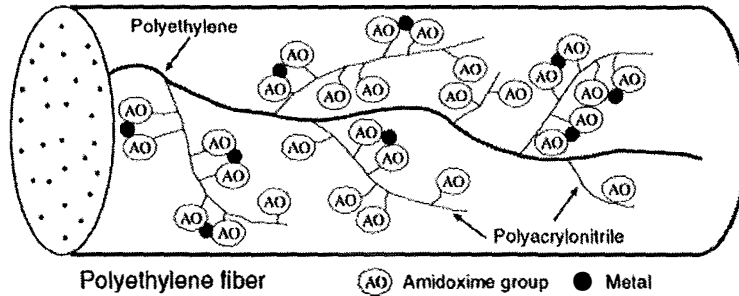
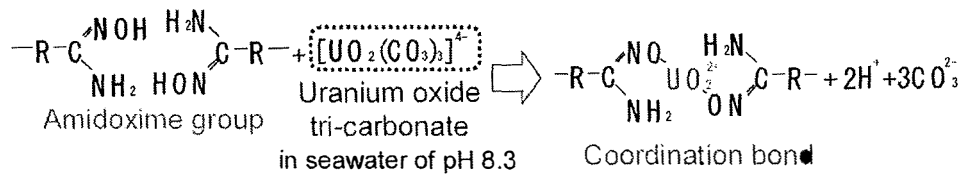
Affinity ในการดูดซับยูเรเนียมสูงมาก และการสังเคราะห์วัสดุนี้ก็ไม่มีคามยุ่งยากมากนัก สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการวิจัยเกือบทั้งหมด และเนื่องจากในขั้นตอนการสังเคราะห์ต้องใช้รังสีทำให้เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ที่ต่อกิ่ง (Irradiation-induced graft polymerization) จึงต้องมีการใช้ Facility เครื่องฉายรังสีร่วมด้วย รูปที่ 2 แสดงการเกิด Irradiation-induced graft polymerization โดยรังสีที่เหมาะสม ทำให้เกิดการตัดขาดของพันธะ C-H บน Polyethylene และเมื่อสัมผัสกับ Monomer ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ก็จะเกิดการต่อกิ่ง (Graft) บน Polyethylene ได้ และเมื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมต่อไป ก็จะสามารถทำให้เกิดหมู่ Amidoxime functional group บนกิ่งเหล่านี้ได้



รูปที่ 2 การเกิด Irradiation-induced graft polymerization [10]

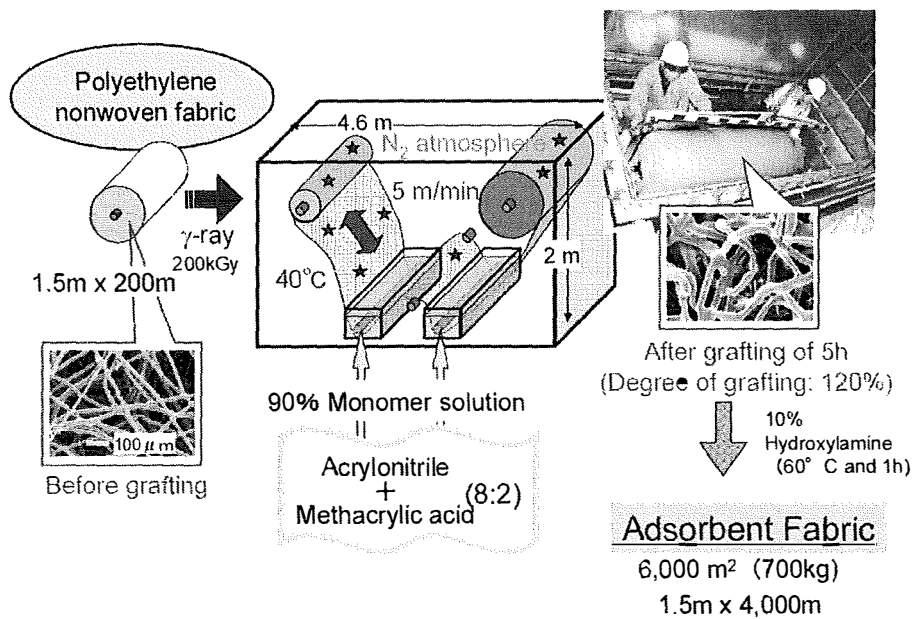
รูปที่ 3 แสดงการดูดซับยูเรเนียม (การเกิด Complexion) โดยหมู่ Amidoxime functional group ส่วนการสกัดยูเรเนียมออกจากวัสดุดูดซับนี้ ใช้การ Elude ด้วยกรด HCl เข้มข้นในสภาวะที่เหมาะสม





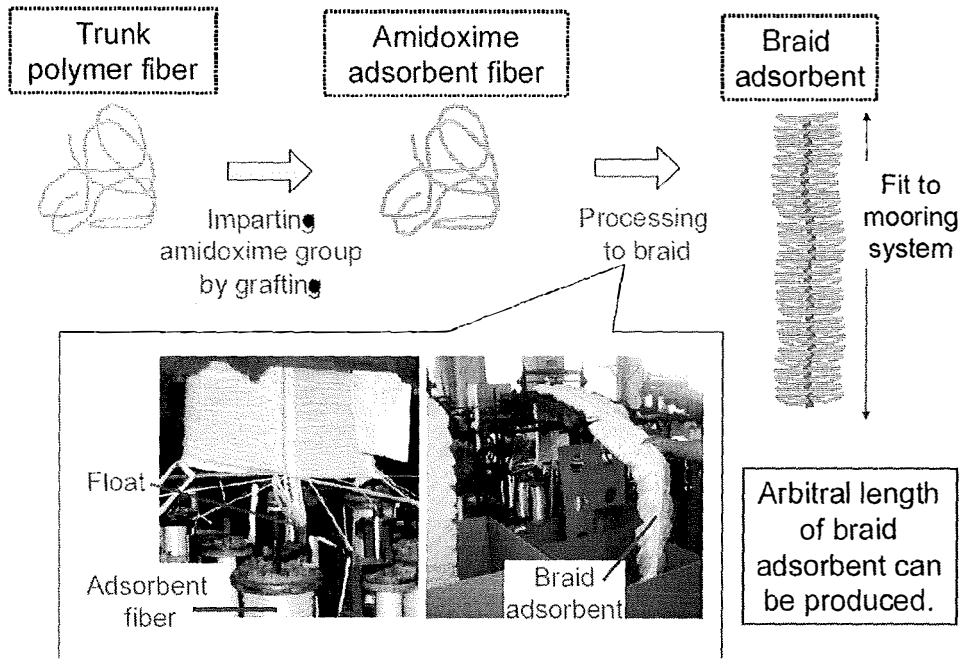
รูปที่ 3 การดูดซับยูเรเนียม (การเกิด Complexion) โดยหมู่ Amidoxime functional group [10]

นอกจากนี้ในประเทศญี่ปุ่น ได้มีการศึกษาการสกัดยูเรเนียมภาคสนามในทะเลอย่างจริงจัง โดยสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์และเส้นใย Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว ดังแสดงในรูปที่ 4



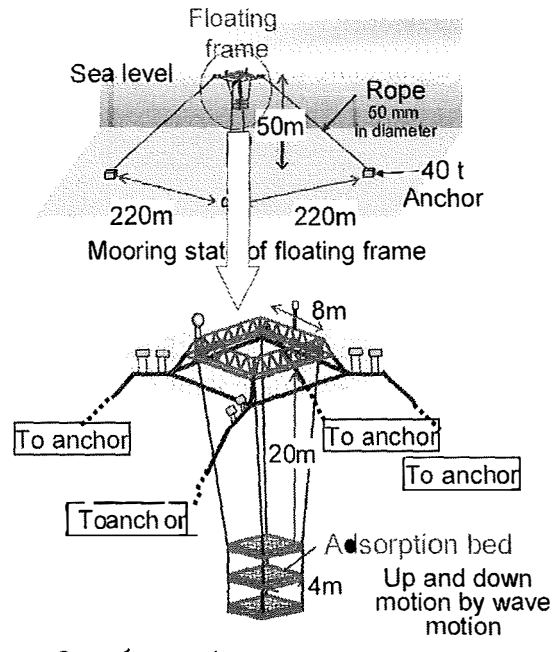
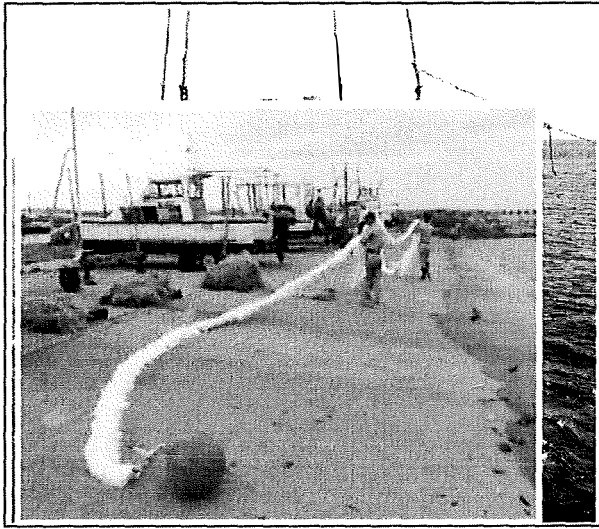
(1) ขั้นตอนการสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์ Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่

บนผิว



(2) ขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นใย Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว  
รูปที่ 4 การสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์และเส้นใย Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group  
เกาะอยู่บนผิว [10]

และเริ่มทำการแช่ในทะเลตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 โดยแต่ละครั้งทำการแช่เป็นเวลาหลายสัปดาห์ ดังแสดงใน  
รูปที่ 5 ซึ่งระดับความลึกของการแช่แผ่นพอลิเมอร์ Polyethylene ประมาณไม่เกิน 20 - 25 เมตรเท่านั้น ส่วน  
การแช่เส้นใยพอลิเมอร์ เป็นการแช่ให้ลอยอยู่ในแนวตั้งโดยที่ไม่ได้ระบุว่าคุณสมบัติความลึกเท่าใด



(1) ฟุ้งลอยสำหรับวัสดุพอลิเมอร์แบบแผ่น



(2) การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์แบบเส้นใยก่อนนำไปแช่ในทะเล

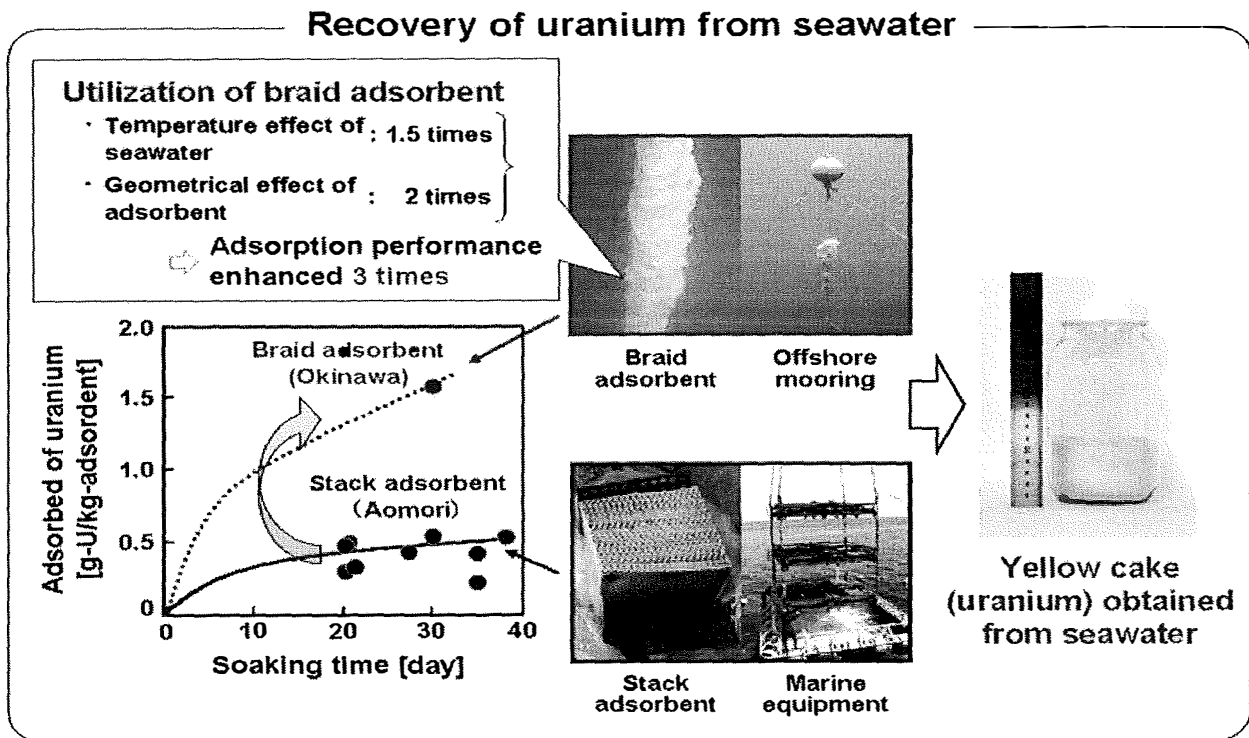


### (3) การเก็บวัสดุพอลิเมอร์แบบเส้นใยเพื่อนำมาสกัดยูเรเนียมออก

รูปที่ 5 ลักษณะการทดสอบภาคสนามของการวิจัยการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศญี่ปุ่น [10]

รูปที่ 6 แสดงปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ ซึ่งในการดูดซับจากน้ำทะเลระหว่างปี ค.ศ. 1999 - 2001 สามารถสกัดออกมาอยู่ในรูปของเค้กเหลือง (Yellow cake,  $U_3O_8$ ) ได้ทั้งหมดประมาณ 1 กิโลกรัม [10] ซึ่งยูเรเนียมที่มีการซื้อขายจากเหมืองแร่ยูเรเนียมโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของเค้กเหลือง (ข้อมูลเปรียบเทียบ: โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาด 1,000 MW ต้องการเค้กเหลืองเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง  $UO_2$  ประมาณ 200 ตันต่อปี) จากรูปและคำอธิบายในรูปจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับแบบเส้นใย (Braid absorbent) มีความสามารถในการดูดซับได้สูงกว่าแบบแผ่น (Stack absorbent) ถึง 2 เท่า นอกจากนี้ ผลของอุณหภูมิยังช่วยให้ดูดซับยูเรเนียมได้มากขึ้นด้วย โดยสถานที่ที่ทำการทดสอบแบบเส้นใย ทำที่ Okinawa ซึ่งอยู่ทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่น มีอุณหภูมิ  $30^{\circ}C$  ส่วนสถานที่ที่ทำการทดสอบแบบแผ่น ทำที่ Aomori ทางตอนเหนือของประเทศญี่ปุ่น มีอุณหภูมิอยู่ที่

20°C ดังนั้นหากใช้ตัวดูดซับแบบเส้นใยในทะเลประเทศไทย ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่าทะเลในประเทศญี่ปุ่น ควรจะทำให้สามารถดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ดียิ่งขึ้นด้วย



รูปที่ 6 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้และตัวอย่างเค้กเหลืองที่สกัดได้ [10]

ได้มีการสรุปว่าต้นทุนการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้เส้นใยนี้ มีราคาต้นทุนโดยคร่าวๆ ประมาณ \$96/lb-U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> เมื่อมีการใช้ซ้ำทั้งหมด 18 ครั้ง โดยใช้สมมุติฐานดังต่อไปนี้: “The collection cost of uranium was calculated by including processes of adsorbent production, uranium collection, and purification at annual collection scale of 1200 t-U. The uranium collection cost based on the adsorbent durability in the laboratory scale experiment, 32 thousand yen/kg-U. When the braid type is utilized 18 times, the collection cost reaches 25 thousand yen/kg-U which is equivalent to \$96/lb-U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.” [11]

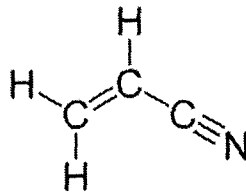
จนถึงปัจจุบัน งานวิจัยโดย Hara et al. [12] มีการศึกษาสังเคราะห์ Amidoxime polymer gel และศึกษาการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยได้ทำการ Polymerize และ Crosslink มอนอเมอร์ Acrylamide (AM) และ Acrylonitrile (AN) โดยใช้ N,N'-Methylene bisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมโยง (Crosslink agent) และ Ammonium peroxodisulfate (APS) เป็นตัว Initiator ทำการจุ่มแช่เจลในตัวอย่งน้ำทะเลที่เพิ่มปริมาณยูเรเนียมเป็น 4 ppb เป็นเวลา 3 วัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเจลสามารถดูดซับยูเรเนียมได้ในสัดส่วนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นในน้ำทะเลที่ต่ำที่สุด และประมาณครึ่งหนึ่งของยูเรเนียมถูกดูดซับโดยเจลที่อัตราส่วน AM:AN ที่ 4:3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Amidoxime polymer gel สามารถดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ ได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยของ Wongjaikham et al. [13] ทำการสังเคราะห์ Amidoxime polymer gel เพื่อใช้สกัดยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยใช้มอนอเมอร์ acrylonitrile และมอนอเมอร์ methacrylic acid มีการใช้สารเชื่อมโยง MBA และนำไปฉายรังสีแกมมาที่โดสแตกต่างกัน จากนั้นจึงนำไปจุ่มแช่น้ำทะเลที่มีการเพิ่มความเข้มข้นยูเรเนียมเป็น 300 ppb เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ผลที่ได้คือ Amidoxime polymer gel ที่มีสัดส่วน AN:MAA = 80:20 ปริมาณสารเชื่อมโยง 8 g/L และ gamma ray dose ที่ 40 kGy สามารถดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลได้ถึง 9.64 mg-U/g-ad และเป็นพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุด และเมื่อนำไปจุ่มแช่ในทะเลเปิดบริเวณจังหวัดพังงาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ตัวดูดซับสามารถดูดซับยูเรเนียมได้ 0.05 mg-U/g-ad

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลต้องใช้มอนอเมอร์ (monomer) มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เพื่อให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังต้องมีการใช้สารเชื่อมโยง (crosslinking agent) เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างสามมิติกลายเป็นพอลิเมอร์เจล มอนอเมอร์ที่สำคัญและเป็นมอนอเมอร์ทั่วไปที่ส่วนใหญ่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อนำมาใช้ในการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล รวมถึงสารเชื่อมโยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

1. อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile: AN)

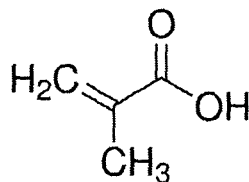
อะคริโลไนไตรล์เป็นของเหลวไม่มีสีหรือมีสีเหลืองอ่อน ระเหยได้กลิ่นอ่อนๆ กลิ่นหอมคล้ายกระเทียม ระเบิดได้ ติดไฟได้ ไอรระเหยหนักกว่าอากาศและกระจายตามพื้นดิน สามารถละลายได้ใน Acetone, Benzene, Carbon tetrachloride, Ethylacetate, และ Toluene มีจุดหลอมเหลวที่  $-84^{\circ}\text{C}$  และจุดเดือดที่  $77^{\circ}\text{C}$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $53.064\text{ g/mol}$  เกิดปฏิกิริยา Polymerization เมื่อถูกทำให้ร้อนและมีตัวเร่งผสม จะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับสารพวกออกซิไดซิงเอเจนต์และกรดหรือด่างเข้มข้น โบรมีน (Bromine) เอมีน (Amines) อะคริโลไนไตรล์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สำคัญคือ หมู่ไซยาโน ( $\text{C}\equiv\text{N}$ ) และมีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างโมเลกุลของอะคริโลไนไตรล์

## 2. เมทาคริลิกแอซิด (Methacrylic acid: MAA)

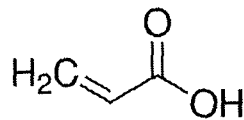
เมทาคริลิกแอซิดเป็นของเหลวใสที่สามารถติดไฟได้และเป็นอันตรายเมื่อกลืนกินเข้าไป หรือหายใจเข้าไป เมื่อสัมผัสผิวหนังจะทำให้ผิวหนังไหม้อย่างรุนแรงและทำลายดวงตา มีจุดหลอมเหลวที่  $14 - 15^{\circ}\text{C}$  จุดเดือดอยู่ที่  $161^{\circ}\text{C}$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $86.06\text{ g/mol}$  เมทาคริลิกแอซิดนำไปใช้ประโยชน์ คือ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต Ester, methyl methacrylate (MMA) และ poly(methyl methacrylate) (PMMA) เมทาคริลิกแอซิดมีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างโมเลกุลของเมทาคริลิกแอซิด

### 3. อะคริลิกแอซิด (Acrylic acid: AA)

อะคริลิกแอซิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ เป็นกรดคาร์บอกซิลิกที่ไม่อิ่มตัวและสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้อย่างรวดเร็ว เป็นสารไวไฟและเป็นอันตรายเมื่อหายใจเข้าและสัมผัสผิวหนัง ทำให้ผิวหนังอย่างรุนแรง มีจุดหลอมเหลวที่ 14 °C จุดเดือดอยู่ที่ 141 °C น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 72.06 g/mol สามารถนำมาใช้ในการผลิต Ester ของกรดอะคริลิก อะคริลาไมด์ อะคริลิคคลอไรด์และการผลิตโคพอลิเมอร์ของสารจำพวกเมทาอะคริลิกเอสเทอร์ อะคริโลไนไตรเอสเทอร์ของกรดมาเลอิก ไวนิลอะซิเตต ไวนิลคลอไรด์ สไตรีน บิวทาไดอีน และเอทิลีน เป็นต้น อะคริลิกแอซิดมีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 9

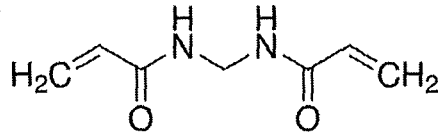


รูปที่ 9 โครงสร้างโมเลกุลของอะคริลิกแอซิด

### 4. เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N, N'- Methylenebisacrylamide: MBA)

เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์มีลักษณะเป็นผงสีขาว สามารถละลายในน้ำ เอทานอล อะซีโตน และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ ได้ MBA มักจะนิยมใช้เป็นสารเชื่อมโยงหรือ Crosslinking agent ที่ใช้ระหว่างการก่อตัวของโพลิเมอร์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เช่น Polyacrylamide ในทางชีวเคมี MBA เป็นหนึ่งในสารประกอบในการสังเคราะห์ Polyacrylamide gel ซึ่งจะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดเป็นโครงสร้างแบบตาข่ายแทนที่จะเป็นเส้นยาว รวมทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้เช่นกัน ชัยวุฒิและคณะ [14] ได้นำ MBA มาใช้เป็นสารเชื่อมโยงในการผลิตไฮโดรเจลระหว่างยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง อรุณีและคณะ [15] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซับน้ำที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและอะคริลาไมด์ โดยใช้ MBA เป็นสารเชื่อมโยงเช่นกัน จะเห็นได้ว่า MBA ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์ โครงสร้างโมเลกุลของ MBA ดังแสดงรูปที่ 10



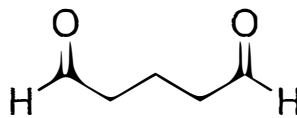


รูปที่ 10 โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์

#### 5. กลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde: GA)

กลูตาราลดีไฮด์เป็นของเหลวคล้ายน้ำมัน ไม่มีสี มีกลิ่นรุนแรง มีชื่อทางการค้า เช่น Cidex หรือ Posedex เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีอันตรายต่อสุขภาพ แต่มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายเชื้อโรคโดยไม่ใช้ความร้อน (Cold sterilization) จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นสารฆ่าเชื้อและทำความสะอาดเครื่องมือที่ Autoclave นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารกันเสียในน้ำยาปรับผ้านุ่ม สารต้านการลั่งเหงื่อ หรือใช้ Fix ชิ้นเนื้อด้วย

นอกจากนี้กลูตาราลดีไฮด์ยังถูกนำมาใช้เป็นสารเชื่อมโยงในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้อีกด้วย จากการทบทวนงานวิจัยของ Maitra และ Shukla [16] ได้กล่าวว่ากลูตาราลดีไฮด์ถูกนำมาใช้เป็นสารเชื่อมโยงของไฮโดรเจลที่ทำมาจากไคโตซาน และ Polyacrylamide/guar gum graft copolymer เป็นต้น ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทดลองนำกลูตาราลดีไฮด์มาใช้เป็นสารเชื่อมโยงในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลจากมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์และมอนอเมอร์เมทาคริลิกแอซิด โครงสร้างโมเลกุลของกลูตาราลดีไฮด์แสดงดังรูปที่ 11

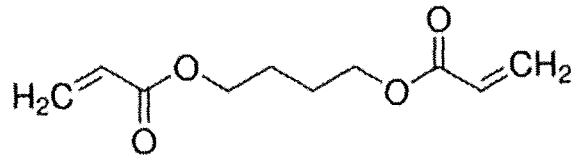


รูปที่ 11 โครงสร้างโมเลกุลของกลูตาราลดีไฮด์

#### 6. บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท (1, 4-butanediol diacrylate: BDDA)

บิวเทนไดออล ไดอะคริเลทเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีน้ำหนักโมเลกุล 198.22 g/mol สามารถใช้เป็นสารเชื่อมโยงในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้ มีงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้ BDDA เป็นสารเชื่อมโยง เช่น งานวิจัยของ Santos

et al. [17] ที่มีการเปรียบเทียบ swelling ratio ของ hydrogel โดยใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน คือ BDDA, MBA, EGMA และ TMPTA หรืองานวิจัยของ Mohan และคณะ [18] ที่ใช้ BDDA เป็นสารเชื่อมโยงในการสังเคราะห์ hydrogel เช่นกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำ BDDA มาใช้เป็นหนึ่งในสารเชื่อมโยงในการสังเคราะห์ตัวดูดซับยูเรเนียม



รูปที่ 12 โครงสร้างโมเลกุลของบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท

การศึกษาวิจัยของนักวิจัยกลุ่มอื่นๆ ทั้งหมด มุ่งเน้นไปที่การกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีตอกซิมบน Substrate ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ตารางที่ 4 แสดงผลการศึกษาการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยกลุ่มนักวิจัยต่างๆ โดยระบุตัวดูดซับที่ใช้ ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา อุณหภูมิและปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยกลุ่มนักวิจัยต่างๆ

เอกสารอ้างอิง	ตัวดูดซับที่ใช้และโครงสร้าง	ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา	อุณหภูมิ [°C]	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด [mg/g]
[13]	Amidoxime hydrogel	2140 mg/L at pH 8.0	25	409
[19]	Silica particles grafted with polyacrylonitrile and subsequent conversion to amidoxime group	2,000 mg/L in Milli-Q water [Uranium acetate, $UO_2(CH_3COO)_2$ ]	25	442.3
[20]	Amidoxime-functionalized superparamagnetic polymer microspheres	170 mg/L at pH 4.5	25	200.5
[9]	Macroporous fibrous polymeric adsorbent containing amidoxime chelating functional group (MFPA)	$4.17 \times 10^{-4}$ mol/dm <sup>3</sup> at pH 8.0	25	44.0
[21]	Multiwalled carbon nanotubes grafted with amidoxime using plasma techniques	150 mg-U/L at pH 4.5	25	145
[22]	Polyacrylonitrile/palygorskite composite chemically	50 mg-U/L at pH 5	30	78.13

เอกสารอ้างอิง	ตัวดูดซับที่ใช้และโครงสร้าง	ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา	อุณหภูมิ [°C]	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด [mg/g]
	modified with amidoxime groups			
[23]	Amidoximated chitosan-grafted polyacrylonitrile	70 mg/L at pH 7	Room temp.	312.06
[4]	Amidoximated electron-beam-grafted polypropylene membranes	9.54 mg/L (U-233 spiked seawater)	Not specified	0.38
[24]	Microporous polyethylene hollow fiber grafted with acrylonitrile and subsequent conversion to amidoxime	Pumped water, 3% NaCl solution, 0.01 M CaCl <sub>2</sub> and 0.05 M MgCl <sub>2</sub> solutions and natural seawater from a feed tank through fibers.	30	Not reported
[25]	Adsorption and elution in hollow-fiber-packed bed for recovery of uranium from seawater	Continuously pumped seawater from the coast of the Pacific Ocean (4 cm/s) through filters and packed bed of amidoxime hollow fibers.	26 - 30	0.97 g-U/kg after 30 days of contact time

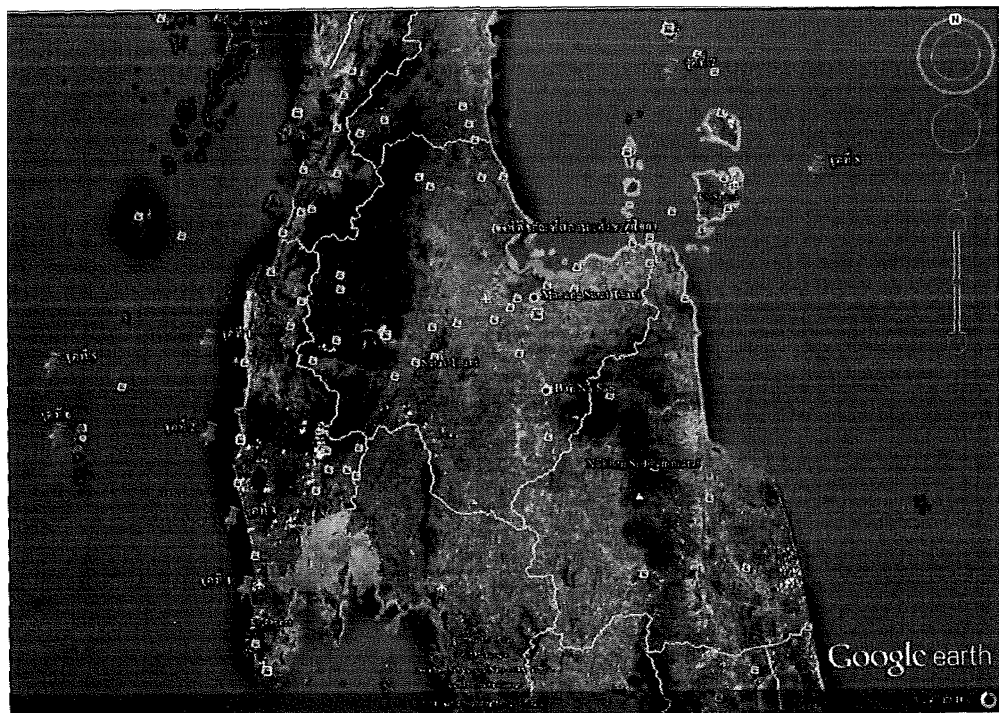
เอกสารอ้างอิง	ตัวดูดซับที่ใช้และโครงสร้าง	ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา	อุณหภูมิ [°C]	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด [mg/g]
[26]	Amidoximated ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibrous adsorbent	Flowed simulated seawater through the adsorption column at the rate of $25 \pm 2$ mL/min.  The pH value was controlled to $8.1 \pm 0.3$ . Uranium concentration in simulated seawater was 3.6 ppb.	$25 \pm 1$	1.97 mg-U/g after 42 days
[27]	Amidoxime functional group grafted onto porous polyethylene fibers	Filtered (0.45 $\mu$ m) natural seawater at $20 \pm 2$ °C with 2 flow rates (250 and 500 mL/min) using electrical pumping systems.	$20 \pm 2$	3.3 mg-U/g for 8 weeks

สำหรับประเทศไทย ได้มีการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และดำเนินการเสร็จสิ้นในปี พ.ศ. 2556 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้อเสนองานวิจัยนี้ได้ดังนี้ [1]

1. สามารถเตรียม Amidoxime fiber ได้โดยการฉายรังสีแกมมา Low-density polyethylene (LDPE) fiber ในสารละลาย Monomer ของ Acrylonitrile และ Methacrylic acid ที่ความแรงรังสี 40 kGy ซึ่งทำให้ได้ค่า % Grafting ที่ประมาณ 80% หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชัน

Cyano group ให้เป็น Amidoxime functional group ซึ่งได้ค่า Amidoxime group density เท่ากับ 1.85 mol/kg

2. การแยกยูเรเนียมออกจาก Amidoxime fiber นี้ ทำโดยการจุ่มแช่ใน Hydrochloric acid solution ความเข้มข้น 1 M ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง
3. มียูเรเนียมที่ประมาณ 3 ppb ในทุกบริเวณของทะเลอ่าวไทยและอันดามันที่ทำการศึกษา รวมถึงบริเวณที่ผิวน้ำและบริเวณที่ลึกถึง 100 และ 150 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 13

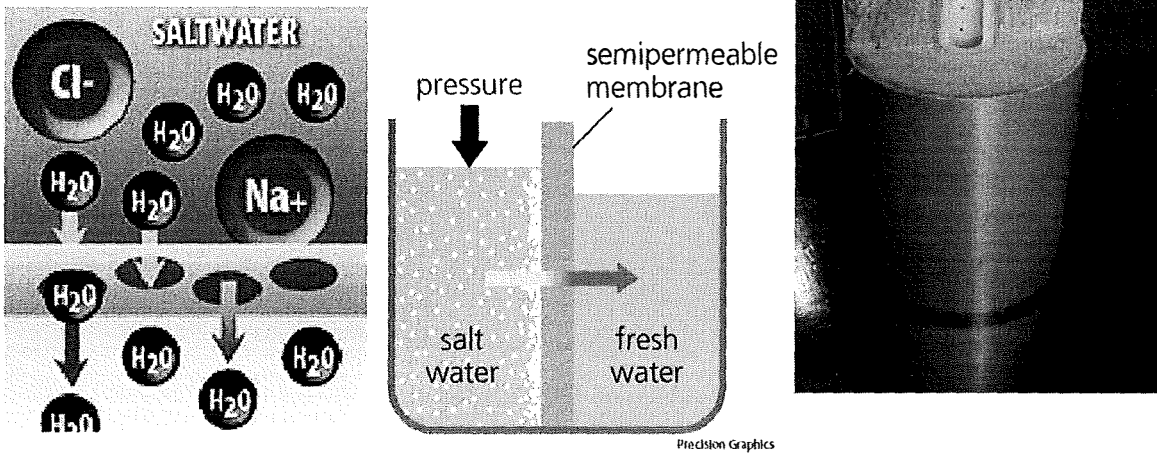


รูปที่ 13 ตำแหน่งที่ทำการศึกษาเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและวางตัวดูดจับยูเรเนียมในโครงการศึกษาการสกัด ยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย

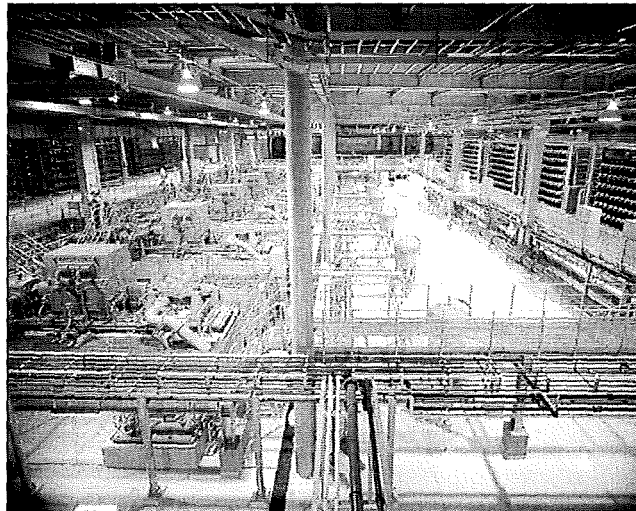
4. Amidoxime fiber เหมาะสมในการนำมาดูดจับยูเรเนียมจากน้ำทะเล เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดูดจับที่สูงที่ pH ของน้ำทะเลที่ประมาณ 8 และมี Selectivity ที่สูงมากสำหรับยูเรเนียม
5. ประสิทธิภาพการดูดจับยูเรเนียมของ Amidoxime fiber จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำทะเล

6. การจุ่มแช่ตัวดูดซับยูเรเนียมที่มีความลึก 30 เมตร จะทำให้สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ไวกว่าที่ชายฝั่งมาก เนื่องจากที่ความลึก 30 เมตร จะมีการไหลของกระแสในทิศทาง ทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง ซึ่งจะพัดพาเอายูเรเนียมใหม่มาตลอดเวลา ส่วนที่ชายฝั่งจะมีการเคลื่อนไหวถ่ายเทของน้ำในแนวราบเท่านั้น และน้ำทะเลใหม่จะเข้ามาทับคลื่นในแนวขนานกับชายฝั่งเป็นหลักเท่านั้น
7. สามารถวางตัวดูดซับบริเวณที่ไม่ลึกจนเกินไปได้ เพราะน้ำจะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำที่ลึกและอยู่ไกลออกไป ซึ่งจะทำให้ได้ความเร็วในการดูดซับที่สูงและจะไม่มีควมยุ่งยากรวมถึงไม่เกิดความเสี่ยงในการปฏิบัติงานบริเวณทะเลน้ำลึกที่อยู่ไกลออกไปจากชายฝั่งมาก นอกจากนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการเดินทางในทะเลที่น้อยกว่าด้วย
8. เนื่องจากน้ำทะเลที่ขุ่น จะทำให้มีตะกอนมาเกาะติดบนตัวดูดซับและจะขัดขวางการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเล ดังนั้นต้องทำการดูดซับยูเรเนียมในบริเวณน้ำทะเลที่ใส โดยแนะนำบริเวณทะเลอันดามันเพราะน้ำทะเลใสกว่าที่อ่าวไทย
9. สามารถใช้ตัวดูดซับซ้ำได้หลายครั้งมาก โดยประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมจะลดลงเหลือประมาณ 50% หลังผ่านการใช้งานประมาณ 14 ครั้ง ซึ่งการที่สามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งนี้จะช่วยลดต้นทุนในการสกัดในเชิงพาณิชย์

ได้มีการใช้ระบบ Seawater Reverse Osmosis (RO) ในการนำน้ำทะเลมาผลิตเป็นน้ำจืด ซึ่งหลักการทำงานในภาพรวมคือ อัดน้ำทะเลภายใต้ความดันสูงที่เหมาะสมผ่านตัวกรอง Membrane ที่ออกแบบให้กรองโดยไม่ให้โมเลกุลและไอออนขนาดใหญ่ผ่านไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 14 ส่วนรูปที่ 15 แสดงโรงงาน Desalination plant ในต่างประเทศ



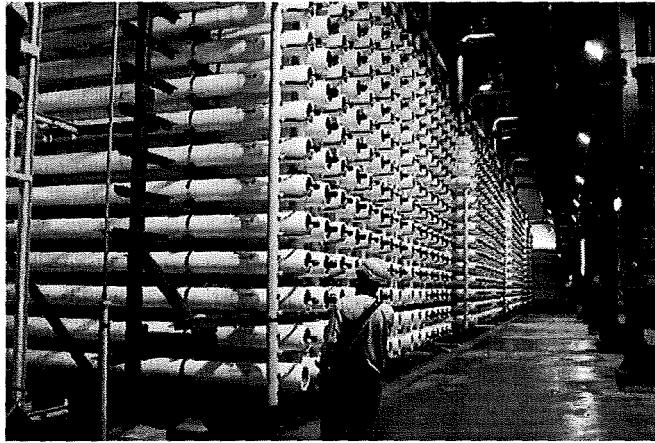
รูปที่ 14 หลักการทำงานของ Reverse Osmosis ในภาพรวม และภาพตัดขวางของตัวกรอง



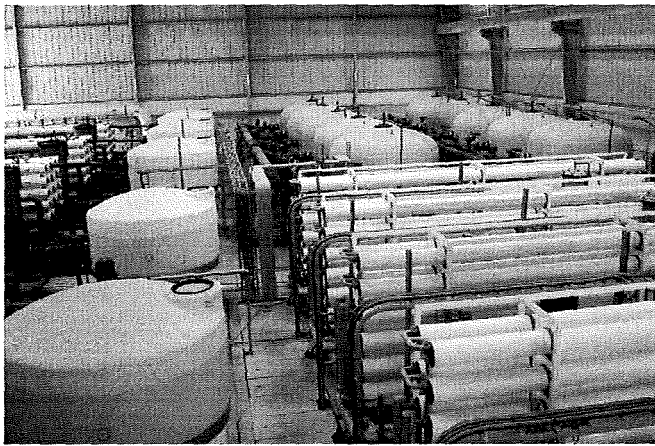
(1) ภาพภายในตึก Reverse Osmosis Building ที่ Uminonakamichi Nata Sea Water

Desalination Plant ในประเทศญี่ปุ่น





(2) ภาพภายในโรงงาน Desalination ใน Ashkelon, Israel



(3) ภาพภายในโรงงาน Desalination ที่ Al Yasat Island, U.A.E.

### รูปที่ 15 โรงงาน Desalination plant ในต่างประเทศ

จากกระบวนการ Seawater Reverse Osmosis นี้ จะได้น้ำทิ้งที่มีค่า Total Dissolved Solids (TDS) เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเรียกว่า Brine concentration ซึ่งก็จะมีค่าความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นเป็น 2 เท่า ส่วนความเข้มข้นของยูเรเนียมก็จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วยเช่นกันเนื่องจากขนาดโมเลกุลของยูเรเนียมไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลใหญ่กว่าโซเดียมหรือคลอรีนไอออนมากจึงไม่สามารถทะลุผ่านตัวกรอง Membrane ได้ น้ำทิ้งเข้มข้นนี้ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์และจะถูกปล่อยกลับลงสู่ทะเล ซึ่งในต่างประเทศตามกฎหมายจะต้องกระจายทิ้งเสมือนการทำให้เจือจางเสียก่อน เพราะหากปล่อยลงสู่ทะเลโดยตรง น้ำที่มีความเค็มเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตรอบๆ จุดปล่อยได้ ส่วนประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายในเรื่องนี้ที่ชัดเจน

จากงานวิจัยการศึกษาการสัคตยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย [1] ได้ทำการศึกษารวมแคตวูดจับยูเรเนียมในโรงงานผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลที่จังหวัดระยอง แต่เนื่องจากการออกแบบของโรงงานแห่งนี้ที่น้ำจากต้นทางจะมีการจ่าย Ferric Chloride (ลักษณะสีแดงเข้ม) เพื่อรวมตะกอน จากนั้นตะกอนเหล่านี้จะไปติดที่ Auto self-cleaning ซึ่งเป็น Pre treatment ก่อนเข้าระบบ RO ตะกอนเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำและนำมารวมลงใน Brine tank จึงทำให้พบตะกอนสีแดงใน Brine tank และตะกอนมาเกาะติดกับตัวดูดจับยูเรเนียมจำนวนมาก และเนื่องจากการออกแบบระบบของโรงงานนี้ ทำให้ไม่สามารถรวมแคตวูดจับใน Brine concentrate ก่อนที่ตะกอนจะมารวมอยู่ได้เพราะไม่มีตำแหน่งใดในระบบที่สามารถดำเนินการในลักษณะนี้ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการสัคตยูเรเนียมใน Brine concentrate จากโรงงานผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลแห่งนี้ได้

ในประเทศไทยได้มีการนำระบบนี้มาใช้ผลิตน้ำจืดเพื่อป้อนให้กับโรงงานและชุมชน เช่นที่จังหวัดระยอง เกาะสีชังและเกาะสมุย เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

“กิจการประปาเกาะสีชัง ได้เริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี 2543 ซึ่งถือได้ว่าเป็นกิจการประปาที่ผลิตจากน้ำทะเลเป็นแห่งแรกของประเทศไทย มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ให้บริการประชาชนในเขตเทศบาลตำบลเกาะสีชัง อ.เกาะสีชัง จ.ชลบุรี ที่มีประมาณ 1,600 ครัวเรือน โดยเป็นการใช้ระบบ RO เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้บนเกาะ เนื่องจากไม่มีแหล่งน้ำธรรมชาติเลย และในปี 2549 กิจการประปาเกาะสีชังได้รับการประกาศเป็น “น้ำประปาดื่มได้” จากกรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุขด้วย

กิจการประปาเกาะสมุยถือได้ว่าเป็นกิจการที่ผลิตน้ำประปาจากน้ำทะเลเป็นรายใหญ่ที่สุดของประเทศ ไทย ณ ขณะนี้ เริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี 2548 โดยมีกำลังการผลิตน้ำประปาจากน้ำทะเลอยู่ที่ 2,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวันในระยะแรกของโครงการ และมีแผนจะเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 3,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในปี 2550 ซึ่งน้ำประปาจำนวนดังกล่าวจะเข้าไปช่วยเสริมกำลังการผลิตน้ำประปาจากการประปาของเกาะสมุยของการประปาส่วนภูมิภาคเพื่อส่งจ่ายให้กับประชาชนและสถานประกอบการท่องเที่ยวบนเกาะสมุยอย่างต่อเนื่อง แม้จะอยู่ในช่วงหน้าแล้งหรือไม่ก็ตาม โดยมีการใช้ระบบ RO 15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้บนเกาะ” (ที่มา <http://www.mkh.in.th/index.php/2010-03-22-18-05-14/2010-03-26-05-54-35>)

จากการสอบถามข้อมูลจากบริษัทที่รับดำเนินการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลที่เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี ได้รายละเอียดว่าไม่มีการทะเลกอนใดๆ มารวมในถัง Brine tank ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษาการสกัดยูเรเนียมจาก Brine concentrate ที่โรงงาน Seawater reverse osmosis plant นี้ ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยในเฟสที่สองของงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิงในลำดับที่ [28] ได้สรุปผลการศึกษาวิจัยในต่างประเทศเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดยูเรเนียมจาก Brine concentration ที่ปลดปล่อยจากระบบ Integrated nuclear desalination system ซึ่งงานวิจัยนี้กำลังอยู่ระหว่างการศึกษาวิจัยและพัฒนาในเบื้องต้น

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้ในการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับเจลเอมีดอิมมูโนโพรตีนประสิทธิภาพสูง เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

## เนื้อเรื่อง

เนื่องจากในเฟสแรกของงานวิจัยเรื่อง การสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับประสิทธิภาพสูง เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต ได้สังเคราะห์ตัวดูดซับเพื่อนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. สัดส่วนของมอนอเมอร์และสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์
2. สัดส่วนของ crosslink agent
3. ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C)
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C)

ผลการศึกษาในเฟสแรก พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อเกิดเป็นเจลพอลิเมอร์ คือ 8 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่เหมาะสมขณะฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต คือ 45 °C สัดส่วนของมอนอเมอร์และสารเคมีที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์และการดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุด 3 อันดับ ได้แก่

1. สัดส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรท์ : เมทาคริลิก แอซิด คือ 80:20 สารเชื่อมโยงที่ใช้ คือ 1 กรัม และสารเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 60 มิลลิลิตร
2. สัดส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรท์ : เมทาคริลิก แอซิด คือ 70:30 สารเชื่อมโยงที่ใช้ คือ 1 กรัม และสารเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 70 มิลลิลิตร
3. สัดส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรท์ : เมทาคริลิก แอซิด คือ 80:20 สารเชื่อมโยงที่ใช้ คือ 2 กรัม และสารเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 60 มิลลิลิตร

ดังนั้นในเฟสที่สองนี้ จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากเฟสที่หนึ่ง โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. การเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลจากเมทาคริลิกแอซิด (MAA) เป็นอะคริลิกแอซิด (AA)

2. การเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมขวางที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลจากเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ เป็นกลูตาราลดีไฮด์ (GA) และ บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท (BDDA)
3. การศึกษาระยะเวลาการสัปดาห์เรเนียนออกจากตัวดูดซับ
4. การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวดูดซับ
5. การนำตัวดูดซับไปวางในบริเวณน้ำทะเลธรรมชาติ
6. การนำตัวดูดซับไปวางในบริเวณน้ำทะเลเข้มข้น (Brine concentration) ที่โรงงานผลิตน้ำประปา เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี

ซึ่งสารเคมีและอุปกรณ์รวมถึงขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้

#### 1. สารเคมีและอุปกรณ์

- Acrylonitrile (AN)
- Acrylic acid (AA)
- Dimethyl sulfoxide (DMSO)
- Glutaraldehyde (GA)
- 1, 4-butanediol diacrylate (BDDA)
- Hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ )
- N,N –dimethylformamide (DMF)
- Hydroxylamine hydrochloride ( $NH_2OH \cdot HCl$ )
- Methanol ( $CH_3OH$ )
- Potassium hydroxide (KOH)
- Hydrochloric acid (HCl)
- Nitric acid ( $HNO_3$ )

- Deionized water (DI water)
- Seawater sample
- Tricarbonate uranyl solution
- UV-C lamp
- Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)
- Inductively Coupled Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

## 2. การสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์อะคริลิกแอซิด

เป็นการเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์เมทาคริลิกแอซิด เป็นอะคริลิกแอซิด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความแตกต่างของมอนอเมอร์แต่ละชนิด ดังนั้นการทดลองจะสังเคราะห์ตามพารามิเตอร์ที่ดูจบบัญเรเนียนได้ดีที่สุด 3 อันดับจากเฟสแรกตั้งที่กล่าวไว้ด้านบน โดยจะทำการสังเคราะห์ตามพารามิเตอร์ซึ่งจะมีขั้นตอนเหมือนกันกับการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์เมทาคริลิก แอซิด โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ผสมมอนอเมอร์ AN กับ AA ตามสัดส่วนที่ต้องการให้ได้ปริมาตร 50 mL จากนั้นใส่ DMSO 50 (w/w)% เป็นตัวทำละลายปริมาตร 50 mL และ MBA ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงตามปริมาณที่ต้องการ จากนั้นคนให้สารเชื่อมโยงละลาย สุดท้ายจึงใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเริ่มปฏิกิริยายาตามปริมาตรที่ต้องการ

2.2 นำสารละลายมอนอเมอร์ที่ผสมแล้วมาฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิขณะฉายรังสี คือ 45 °C เมื่อฉายรังสียูวีแล้วสารละลายมอนอเมอร์จะกลายเป็นพอลิเมอร์เจล

2.3 บดเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดเล็กเพื่อให้มีพื้นผิวสัมผัสมาก จากนั้นล้างไฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ออกโดยแช่ในสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และล้างสารละลาย DMF ด้วย DI water : Methanol 50 (w/w)%

2.4 อบพอลิเมอร์เจลในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันไซยาโน (Cyano) บนพอลิเมอร์เจล โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

2.6 เข้าสู่กระบวนการ amidoximation เป็นการใช้กระบวนการทางเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมในพอลิเมอร์เจล โดยนำเจลพอลิเมอร์แช่ในสารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3 (W/V)% และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7 ซึ่งปรับค่าโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 73 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกพอลิเมอร์เจลหลังขั้นตอน amidoximation นี้ว่าเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจล

2.7 ล้างเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water : Methanol 50 (w/w)% จากนั้นนำเข้าอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.8 จุ่มเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์

2.9 ล้างเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water และนำเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.10 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมบนผิวพอลิเมอร์เจล โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

2.11 เข้าสู่ขั้นตอนการ alkaline treatment โดยนำเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.5 (W/V)% อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.12 ล้างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 9 จากนั้นนำเข้าสู่ตูบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ตัวดูดซับที่พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

### 3. การสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์จากสารเชื่อมโยงกลูตาราลดีไฮด์และบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท

เป็นการเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมโยงเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA) เป็นกลูตาราลดีไฮด์ (GA) และบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท (BDDA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของสารเชื่อมโยงแต่ละชนิด ดังนั้นการทดลองจะสังเคราะห์ตามพารามิเตอร์ที่ดูดซับยูเรเนียมได้ดีที่สุด 3 อันดับจากเฟสแรกตั้งที่กล่าวไว้ โดยจะทำการสังเคราะห์ตามพารามิเตอร์ซึ่งจะมีขั้นตอนเหมือนกันกับการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์จากสารเชื่อมโยงเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ผสมมอนอเมอร์ AN กับ AA ให้ได้สัดส่วน 80:20 ปริมาตรสารละลายรวม 50 mL จากนั้นใส่ DMSO 50 (w/w)% เป็นตัวทำละลายปริมาตร 50 mL และใส่สารเชื่อมโยง ปริมาตร 1, 5, 7, 10 มิลลิลิตร (กลูตาราลดีไฮด์ หรือ บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท) จากนั้นคนให้สารละลายเข้ากัน สุดท้ายจึงใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเริ่มปฏิกิริยาปริมาตร 60 มิลลิลิตร

3.2 นำสารละลายมอนอเมอร์ที่ผสมแล้วมาฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิขณะฉายรังสี คือ 45 °C เมื่อฉายรังสียูวีแล้วสารละลายมอนอเมอร์จะกลายเป็นพอลิเมอร์เจล

3.3 บดเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อให้พอลิเมอร์เจลมีพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น จากนั้นล้างไฮโดรพอลิเมอร์ออกโดยแช่ในสารละลาย DMF ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และล้างสารละลาย DMF ด้วย DI water : Methanol 50 (w/w)%

3.4 อบพอลิเมอร์เจลในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันไซยาโนบนพอลิเมอร์เจล โดยใช้เครื่อง FTIR



3.6 เข้าสู่กระบวนการ amidoximation โดยนำเจลพอลิเมอร์แช่ในสารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้น 3 (W/V)% และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 ซึ่งปรับค่าโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 73 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกพอลิเมอร์เจลหลังขั้นตอน amidoximation นี้ว่าเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจล

3.7 ล้างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water : Methanol 50 (w/w)% จากนั้นนำเข้าอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.8 จุ่มเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์

3.9 ล้างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water และนำเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.10 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจล โดยใช้เทคนิค FTIR

3.11 เข้าสู่ขั้นตอนการ alkaline treatment โดยนำเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.5 (W/V)% อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

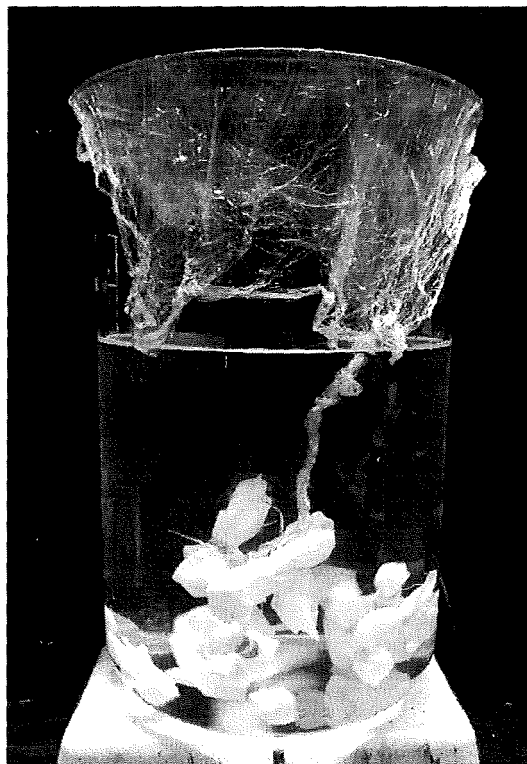
3.12 ล้างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 9 จากนั้นนำเข้าตู้อบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ตัวดูดซับที่พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

#### 4. การนำเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลในห้องปฏิบัติการ

เมื่อได้ทำการสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลเสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นจึงนำเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลแต่ละตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 0.15-0.2 กรัม และนำไปใส่ในผ้าขาวบางที่มีความถี่หนาพอสมควรที่จะไม่ให้เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลสามารถหลุดรอดออกจากผ้าขาวบางไปได้ จากนั้นมัดผ้าขาวบางด้วยหนังยางให้แน่นหนา แล้วจึงนำตัวอย่างที่เตรียมไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลในบีกเกอร์ขนาด 4 ลิตร ซึ่งทำการเติมยูเรเนียมในน้ำ

ทะเลให้มีความเข้มข้นประมาณ 3 ppm เพื่อให้เพียงพอสำหรับการดูดจับในแต่ละตัวอย่าง ทำการจุ่มแช่ตัวอย่างเป็นเวลา 1 สัปดาห์

จุ่มแช่ตัวดูดจับยูเรเนียมในบีกเกอร์ดังรูปที่ 16 และทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำทะเลผ่านตัวดูดจับตลอดเวลาด้วยการใช้ magnetic stirrer กวนที่ด้านล่างของบีกเกอร์ โดยทำการกวนน้ำทะเลทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีก่อนจุ่มแช่ตัวดูดจับเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลเพื่อให้มั่นใจว่าสารละลายยูเรเนียมที่ใส่เพิ่มได้ละลายไปในน้ำทะเลทั้งหมด โดยขั้นตอนทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น



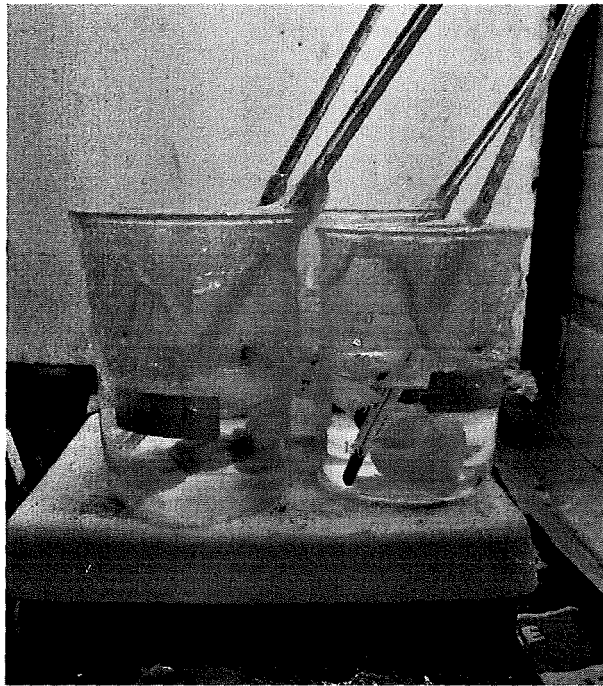
รูปที่ 16 บีกเกอร์บรรจุน้ำทะเลที่ใช้ในการจุ่มแช่ตัวดูดจับยูเรเนียมในห้องปฏิบัติการวิจัย

#### 5. การสกัดยูเรเนียมออกจากเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจล

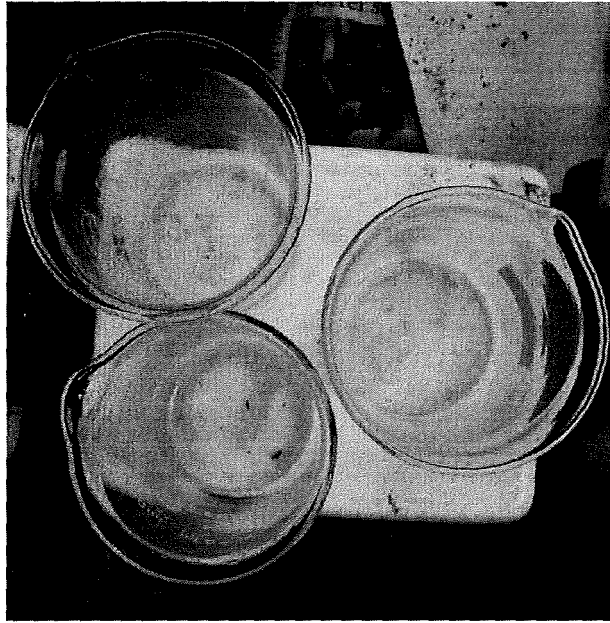
หลังจากจุ่มแช่ตัวอย่างในถังจนครบกำหนด 1 สัปดาห์แล้วจึงเก็บตัวอย่างทั้งหมดขึ้นมาแช่ในน้ำ DI water เป็นเวลา 3 วันเพื่อล้างเกลือและยูเรเนียมที่ติดอยู่บนผิวของตัวดูดจับออก จากนั้นนำไปอบให้แห้ง

ทำการ Elution โดยแช่ตัวดูดซับที่อบให้แห้งแล้วในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์ ที่ อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงดังรูปที่ 17 เมื่อครบเวลาแล้วนำตัวดูดซับออก และต้มสารละลายไฮโดรคลอริกให้เดือด ซ้ำๆ จนกระทั่งสารละลายแห้งเหลือแต่ผงธาตุที่ดูดซับได้สีเหลืองที่ติดอยู่ด้านล่างของบีกเกอร์ดังรูปที่ 18

จากนั้นเจือจางผงที่ได้จากกระบวนการ Elution ด้วยกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) 1 % และนำสารละลายกรดไนตริกดังกล่าวส่งไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของยูเรเนียมโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 17 การแช่ตัวดูดซับในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์



รูปที่ 18 ผงธาตุที่ดูดจับได้สีเหลืองที่แห้งติดอยู่ด้านล่างของบีกเกอร์

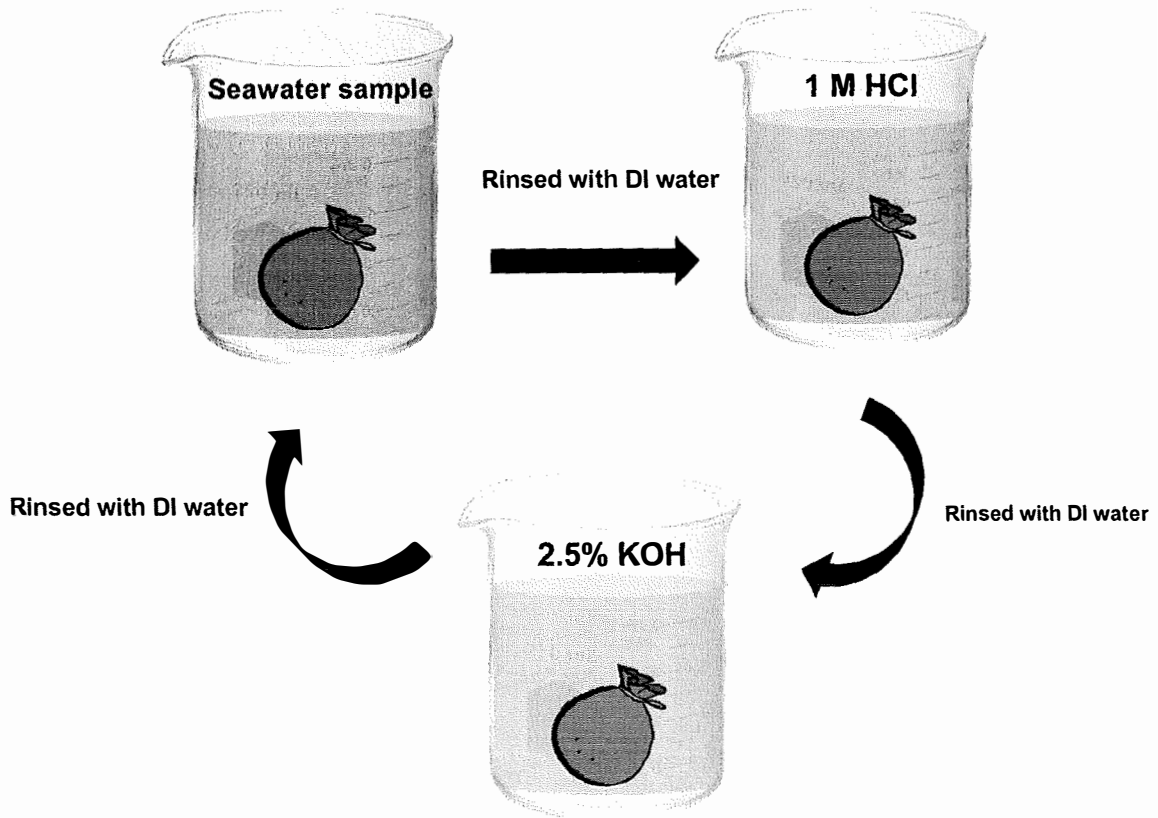
#### 6. การศึกษาระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดจับ

เพื่อทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการสกัดยูเรเนียมโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกออกจากตัวดูดจับ จึงทำการทดสอบการสกัดยูเรเนียมที่ระยะเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง โดยนำตัวดูดจับที่ดูดจับยูเรเนียมแล้วไปจุ่มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 M ที่อุณหภูมิ 50 °C ตามระยะเวลาดังกล่าว

#### 7. การศึกษาการใช้ซ้ำของตัวดูดจับยูเรเนียม

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวดูดจับยูเรเนียมในน้ำทะเล จึงทำการจุ่มตัวดูดจับในน้ำทะเลที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง และทำการเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมเท่ากับ 500 ppb ทำการแช่ตัวดูดจับเป็นเวลา 3 วัน (1 รอบการทดลอง) จากนั้นเอาตัวดูดจับออกแล้วแช่ในน้ำ DI water เพื่อกำจัดเกลือส่วนเกินออกจากตัวดูดจับ และนำไป elute เพื่อสกัดเอายูเรเนียมออกจากตัวดูดจับ และนำตัวดูดจับไปแช่ในสารละลาย KOH 2.5% (w/v) ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างด้วย DI water จนกระทั่งน้ำมีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 9 นำเข้าเตาอบเพื่ออบให้ตัวดูดจับแห้ง จากนั้นจึงนำตัว

ดูดจับไปจุ่มในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม 500 ppb อีกครั้ง ทำซ้ำกับวิธีการข้างต้น และทดสอบการใช้ซ้ำของตัวดูดจับทั้งหมด 8 รอบ ขั้นตอนการทดสอบการใช้ซ้ำแสดงดังรูปที่ 19



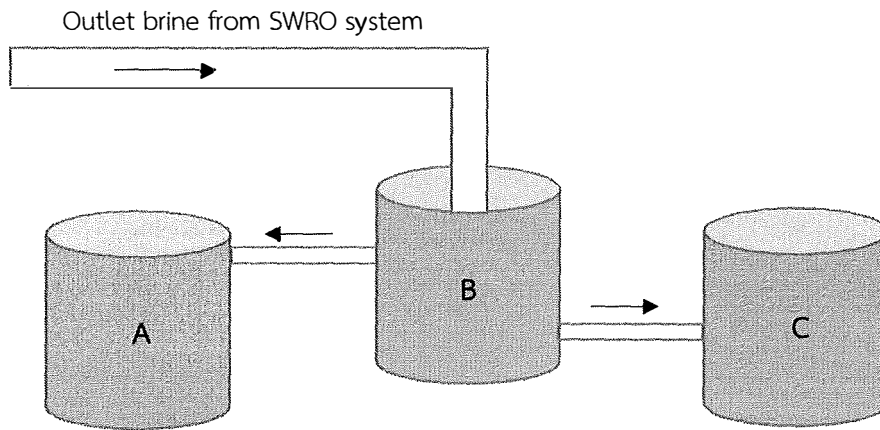
รูปที่ 19 กระบวนการทดสอบการใช้ซ้ำของตัวดูดจับ

#### 8. การนำตัวดูดจับไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลตามสภาวะธรรมชาติบริเวณเกาะล้าน จังหวัดชลบุรี

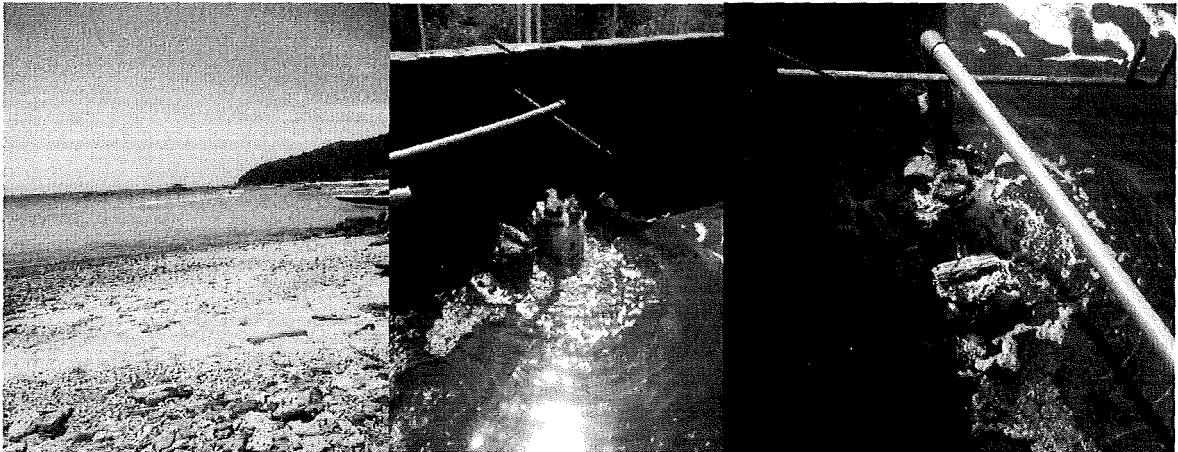
นำตัวดูดจับไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลตามสภาวะธรรมชาติที่บริเวณเกาะล้าน จังหวัดชลบุรี เพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่แท้จริงของตัวดูดจับยูเรเนียมตามสภาวะน้ำทะเลธรรมชาติ ที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียมเพียงแค่ 3 - 3.3 ppb รวมทั้งมีกระแสน้ำ กระแสลม รวมถึงมีอนุภาคสารแขวนลอยอื่นๆ ที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ โดยจะนำตัวดูดจับไปจุ่มแช่เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ ความลึกจากระดับผิวน้ำทะเล 1 - 2 เมตร

## 9. การนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลเข้มข้น (Brine concentration)

ผู้วิจัยได้ทำการนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลเข้มข้น ณ โรงงานผลิตน้ำประปาจากน้ำทะเล บริเวณเกาะล้าน จังหวัดชลบุรี ซึ่งน้ำทะเลเข้มข้นมีค่าความเค็มอยู่ที่ประมาณ 48 ppt (part per thousand) เนื่องจากการผลิตน้ำประปาเป็นการนำน้ำทะเลมาผ่านกระบวนการกรองด้วยระบบเมมเบรนแบบ SWRO เพื่อกรองสารละลายเกลือออกให้ได้น้ำจืด ส่วนสารละลายเกลือทั้งหลายที่ได้จากการกรองจะมีความเข้มข้นมากกว่าน้ำทะเลปกติ 1.5 - 2 เท่าขึ้นไปแล้วแต่การออกแบบของระบบ ดังนั้นในสารละลายเกลือเข้มข้นจึงคาดว่าน่าจะมี ความเข้มข้นของยูเรเนียมมากกว่าน้ำทะเลปกติ 1.5 - 2 เท่าเช่นกัน ดังนั้นสมมติฐานของการทดลองนี้ คือ การดูดซับยูเรเนียมของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำทะเลมีความเข้มข้นของยูเรเนียมมากขึ้น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมของตัวดูดซับในน้ำทะเลเข้มข้นจะนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่ในถังพลาสติกปิดฝาสนิทไม่ให้เห็นแสงแดดส่องถึง ที่อัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นต่างกัน ดังนี้ ถัง A มีอัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นเข้ามาในถังประมาณ 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ถัง B มีอัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นเข้ามาในถังประมาณ 18 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และ ถัง C มีอัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นเข้ามาในถังประมาณ 8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยทำการจุ่มแช่ตัวดูดซับเป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ ดังรูปที่ 20 และ 21 หลังจากนั้นจึงเก็บตัวดูดซับออกมาเพื่อสกัดเอายูเรเนียมออกจากตัวดูดซับโดยวิธีการ Elution ที่ได้กล่าวเอาไว้ในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้โดยเทคนิค ICP-OES



รูปที่ 20 Lay out การวางตำแหน่งของถังพลาสติกที่ใช้จุ่มแช่ตัวดูดซับและลักษณะการวางท่อน้ำทะเล  
 เข้มข้นเข้าถัง

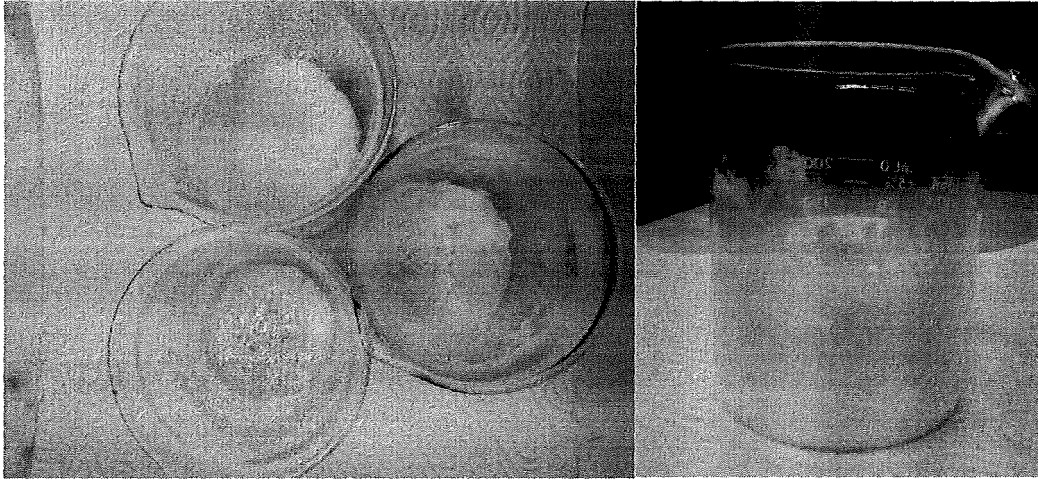


รูปที่ 21 การจุ่มแช่ตัวดูดซับบริเวณพื้นที่จริง ณ โรงงานผลิตน้ำประปา เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี

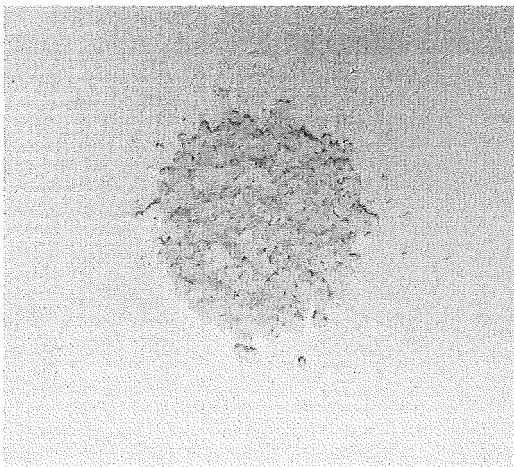
## 10. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

### 10.1 ลักษณะของพอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสีของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรท์และอะคริลิกแอซิด

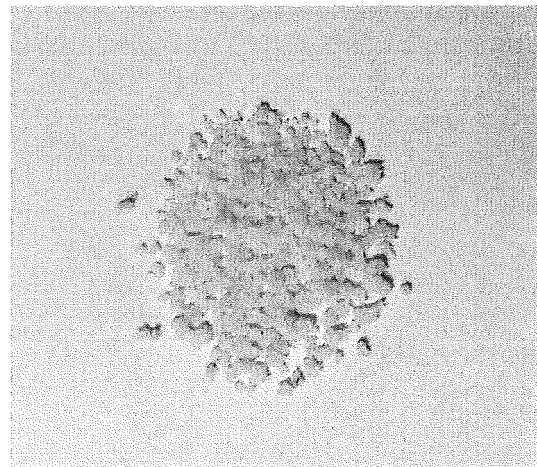
หลังนำสารละลายผสมมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรท์และอะคริลิกแอซิด (AN:AA) ไปฉายรังสีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง รูปที่ 22 แสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสี



รูปที่ 22 พอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสีของมอนอเมอร์ผสมอะคริโลไนไตรท์และอะคริลิกแอซิด



(a)



(b)

รูปที่ 23 เอมีดอกซิมพอลิเมอร์หลังผ่านกระบวนการต่างๆ พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียม (a) AN:AA (b) AN:MAA



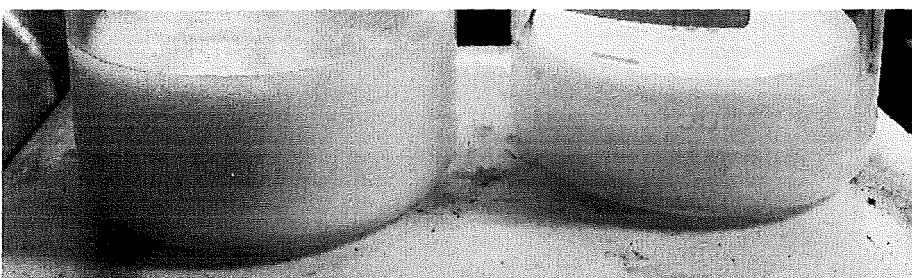
จากรูปที่ 22 จะเห็นว่าลักษณะของพอลิเมอร์หลังฉายรังสีที่เกิดจากการมอนอเมอร์อะคริลิกแอซิดมีสีค่อนข้างเหลือง และลักษณะเจลจะค่อนข้างแข็งกว่าพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์เมทาคริลิกแอซิด ส่วนรูปที่ 23 เมีดอกซิมพอลิเมอร์หลังผ่านกระบวนการของมอนอเมอร์ผสมระหว่างอะคริโลไนไตรท์และอะคริลิกแอซิด ยังคงมีสีเหลือง ส่วนพอลิเมอร์ ผสมระหว่างอะคริโลไนไตรท์และเมทาคริลิกแอซิดสีขาวออกเหลืองเล็กน้อย ทั้งนี้สีเหลืองที่เกิดขึ้นนี้น่าจะมาจากสีของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรท์

## 10.2 ผลของลักษณะพอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสีของสารเชื่อมโยงกลูตาราลดีไฮด์และบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท

หลังนำสารละลายมอนอเมอร์ผสม AN:MAA โดยเปลี่ยนสารเชื่อมโยงจากเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ เป็นกลูตาราลดีไฮด์และบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท ที่พารามิเตอร์ต่างๆไปฉายรังสีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง รูปที่ 24 แสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์เจลเหล่านี้หลังฉายรังสี



(a)



(b)

รูปที่ 24 พอลิเมอร์เจลหลังฉายรังสีจากสารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน (a) สารเชื่อมโยงกลูตาราลดีไฮด์ (b) สารเชื่อมโยงบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท

จากรูปที่ 24 จะเห็นว่าเมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน พอลิเมอร์หลังฉายรังสียูวีที่ได้มีสีและลักษณะเจลที่แตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์เจลที่ใช้สารเชื่อมโยงกลูตาราลดีไฮด์ จะมีสีใส โปร่งแสง ส่วนพอลิเมอร์เจลที่ใช้สารเชื่อมโยงบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท จะมีสีขาวขุ่น ทึบแสง ส่วนลักษณะพอลิเมอร์เจลที่ได้นั้นหากใช้สารเชื่อมโยงกลูตาราลดีไฮด์ พอลิเมอร์เจลมีลักษณะเหลวและอ่อนกว่าพอลิเมอร์เจลจากสารเชื่อมโยง บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท

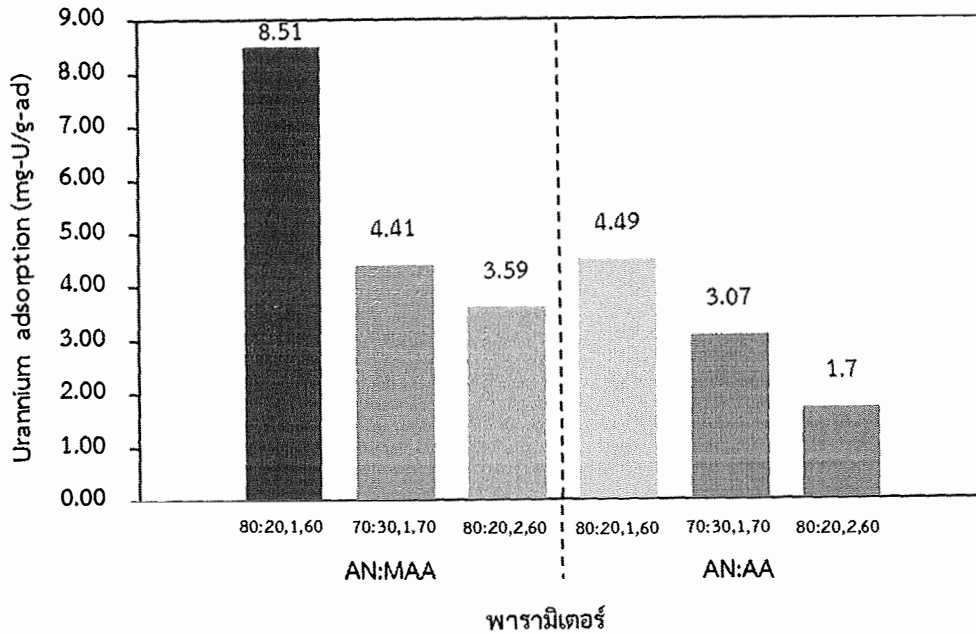
### 10.3 ผลของปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เมื่อใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน

จากการทดลองศึกษาการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลเมื่อใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน คือ AN:MAA และ AN:AA ผลการดูดซับยูเรเนียมเมื่อใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน

ชนิดของโคมอนอเมอร์ที่ใช้	พารามิเตอร์ของพอลิเมอร์เจล	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ (mg/g)
AN:MAA	สัดส่วน AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง = 1 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 mL	8.51
	สัดส่วน AN:MAA = 70:30, สารเชื่อมโยง = 1 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 70 mL	4.41
	สัดส่วน AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง = 2 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 mL	3.59
AN:AA	สัดส่วน AN:AA = 80:20, สารเชื่อมโยง = 1 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 mL	4.49
	สัดส่วน AN:AA = 70:30, สารเชื่อมโยง = 1 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 70 mL	3.07

สัดส่วน AN:AA = 80:20, สาร เชื่อมโยง = 2 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 mL	1.70
--	------



รูปที่ 25 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน

จากตารางที่ 5 และรูปที่ 25 พบว่าเมื่อสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลโดยใช้มอนอเมอร์ AN ผสมกับมอนอเมอร์ MAA (AN:MAA) ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงกว่าเอมีตอกซิมพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ AN ผสมกับมอนอเมอร์ AA (AN:AA) ในทุกๆพารามิเตอร์ที่ทำการสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oyola และ Dai [29] ที่ทำการศึกษาการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลเข้มข้น (Brine solution) ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้โคมอนอเมอร์ต่างชนิดกันกราฟต์ลงบนพื้นผิวของเส้นใยโพลีเอทิลีน ผลปรากฏว่าโคมอนอเมอร์ AN:AA ดูดซับยูเรเนียมได้น้อยกว่าโคมอนอเมอร์ AN:MAA เนื่องจากโคมอนอเมอร์ AN:AA เมื่อนำไปกราฟต์ลงบนเส้นใยมักจะทำปฏิกิริยา polymerization กันเองและมีการกราฟต์ลงบนเส้นใยน้อย ดังนั้นจึงมีการเติมสารเติมแต่ง (additive) ชนิด แอมโนเนียมซัลเฟตลงไปในระหว่างกระบวนการกราฟต์ด้วย และพบว่าสารเติมแต่งนี้ทำให้โคมอนอเมอร์ AN:AA เกิดการกราฟต์ลงบนเส้นใยได้ดีขึ้นมาก และทำให้มีหมู่ฟังก์ชันเอมีตอกซิมสูงชันและสูง

กว่าโคมอนอเมอร์ AN:MAA ดังนั้นจึงได้นำเส้นใยที่มีการกราฟต์ด้วย โคมอนอเมอร์ AN:MAA, โคมอนอเมอร์ AN:AA (เติมสารเติมแต่ง) ไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลบริเวณธรรมชาติ ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า โคมอนอเมอร์ AN:AA (เติมสารเติมแต่ง) ดูดซับยูเรเนียมได้ดีกว่าโคมอนอเมอร์ AN:MAA ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้แปรผันตรงกับจำนวนหมู่เอมีดอกซิมที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับนั่นเอง

#### 10.4 ผลของปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน

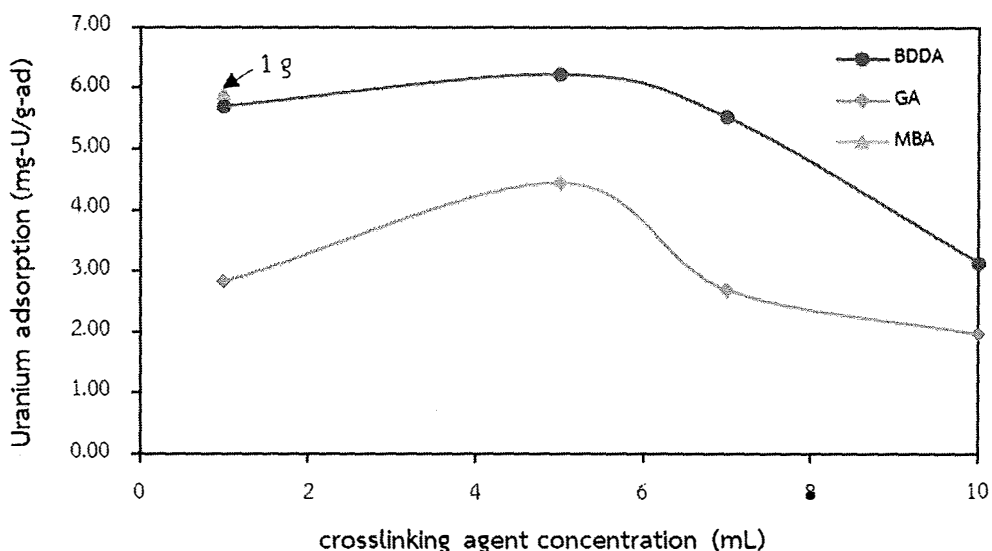
จากการทดลองศึกษาการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลเมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน คือ เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA), กลูตาราลดีไฮด์ (GA) และ บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท (BDDA) ผลการดูดซับยูเรเนียมเมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน

ชนิดของสารเชื่อมโยง	ปริมาตรสารเชื่อมโยง (mL)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ (mg/g)
MBA	1 (g)	5.93
GA	1	2.83
	5	4.44
	7	2.70
	10	1.97
BDDA	1	5.70
	5	6.23
	7	5.52
	10	3.14

\* หมายเหตุ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เจลคือสัดส่วน AN:MAA = 80:20 และ ปริมาตร H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> =

60 มิลลิลิตร



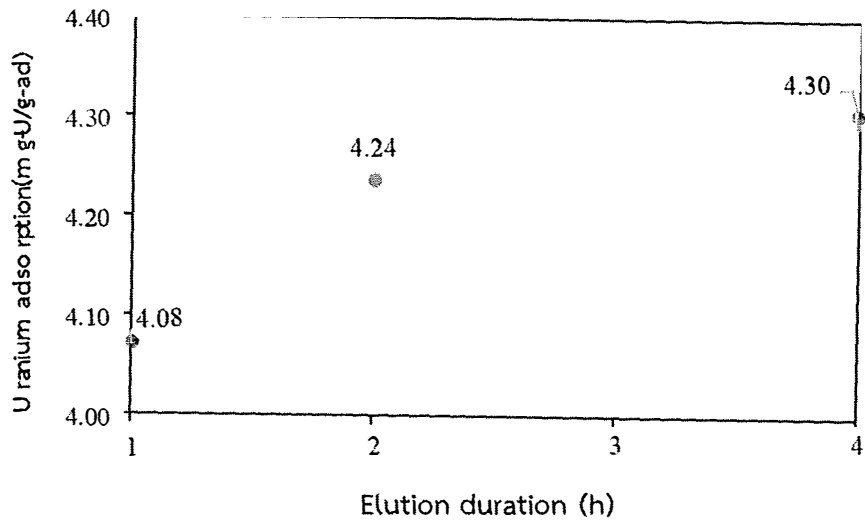
รูปที่ 26 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน

จากตารางที่ 6 และรูปที่ 26 เมื่อสังเคราะห์ไฮโดรเจลโพลีเมอร์โดยใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดกัน คือ MBA, GA และ BDDA ผลปรากฏว่าโพลีเมอร์เจลที่ใช้สารเชื่อมโยงทั้ง GA และ BDDA แนวโน้มการดูดซับยูเรเนียมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของสารเชื่อมโยงจาก 1-5 มิลลิลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาตรสารเชื่อมโยงมากกว่า 5 มิลลิลิตร ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรของสารเชื่อมโยงที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของสารเชื่อมโยงภายในโพลีเมอร์เจลมากขึ้น ทำให้เจลมีการดูดซับน้ำลดลง จึงส่งผลให้มีการดูดซับยูเรเนียมได้น้อยลงนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมโยงแต่ละชนิด จะเห็นว่าสารเชื่อมโยง MBA และ BDDA มีประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมได้ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อใช้สารเชื่อมโยง MBA 1 กรัม สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ 5.93 mg/g และเมื่อใช้สารเชื่อมโยง BDDA 1 มิลลิลิตร สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ 5.70 mg/g แต่เมื่อเพิ่มปริมาตรของ BDDA มากขึ้นเป็น 5 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตรมอนอเมอร์ ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เพิ่มขึ้นเป็น 6.23 mg/g ซึ่งจากการศึกษา งานวิจัยของ Gabriela [17] ที่ทำการเปรียบเทียบชนิดของสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลพบว่าการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมโยง MBA มีค่าสูงกว่าไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมโยง BDDA เล็กน้อยแต่

ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นงานของ Gabriela [17] จึงให้ผลลัพธ์สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิจัยของโครงการนี้ เนื่องจากค่าการดูดซับน้ำที่มากขึ้นค่อนข้างเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการดูดซับยูเรเนียมที่เพิ่มขึ้น ส่วนการดูดซับยูเรเนียมของพอลิเมอร์เจลที่ใช้สารเชื่อมโยง GA มีปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้น้อยที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารเชื่อมโยง GA ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นยางธรรมชาติ ดังนั้นการนำสารเชื่อมโยง GA มาใช้ในงานวิจัยนี้จึงอาจจะไม่เหมาะสม ส่วนสารเชื่อมโยง MBA และ BDDA นั้น เนื่องจากสารเชื่อมโยง BDDA มีราคาสูงกว่า MBA มาก ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าสามารถใช้สารเชื่อมโยง MBA มาใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลทดแทนสารเชื่อมโยง BDDA ได้ อีกทั้งสารเชื่อมโยง MBA ยังถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายๆงานวิจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล และวัสดุดูดซับน้ำที่ใช้สารตั้งต้นชนิดอื่น

#### 10.5 ผลการทดสอบระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับ

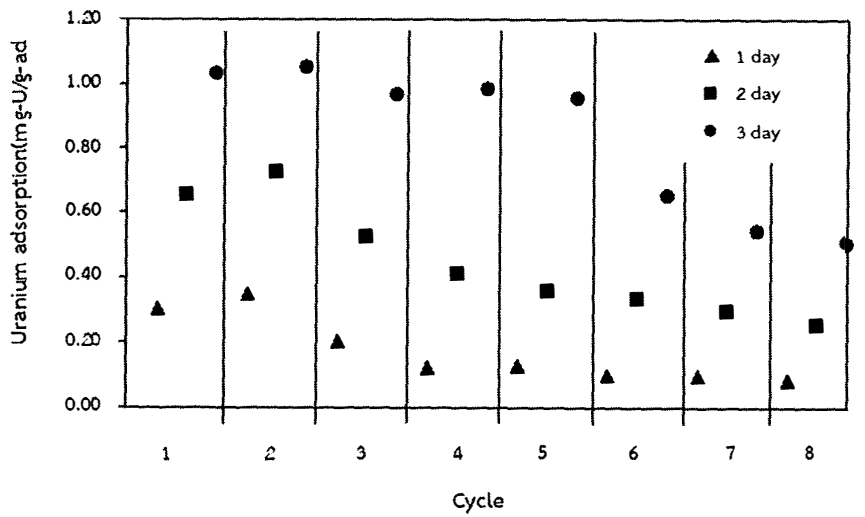
กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่ใช้กันทั่วไปในการสกัดเอายูเรเนียมออกจากตัวดูดซับเอมีดอิมพอลิเมอร์ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการสกัดดังแสดงรูปที่ 27 โดยจะเห็นว่าต้องใช้ระยะเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงในการสกัดยูเรเนียมโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 °C นอกจากนี้หากเพิ่มระยะเวลาในการสกัดจาก 2 ชั่วโมงเป็น 4 ชั่วโมงยูเรเนียมที่สกัดได้เพิ่มขึ้นมาเพียง 1.4% เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับ คือ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 27 ผลของระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับ (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และ ปริมาตร H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 60 มิลลิลิตร)

10.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวดูดซับ

ประสิทธิภาพของการใช้ซ้ำของตัวดูดซับเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากเนื่องจากทำให้เห็นถึงด้านการนำไปใช้งานจริงและในแง่ของความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวดูดซับยูเรเนียมแสดงดังรูปที่ 28

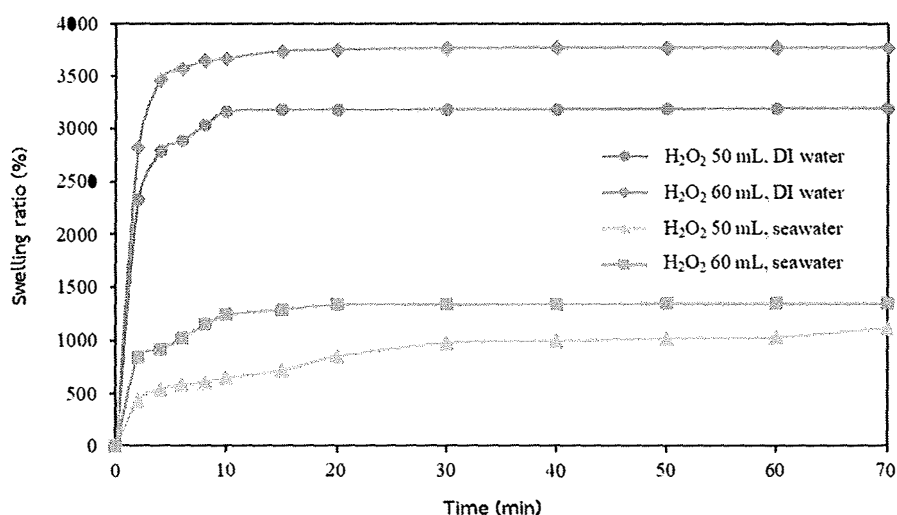


รูปที่ 28 การใช้ซ้ำของตัวดูดซับยูเรเนียม (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และ ปริมาตร H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 60 มิลลิลิตร)

จากรูปที่ 28 จะเห็นว่าเมื่อมีการใช้ตัวดูดซับยูเรเนียมซ้ำไปจนถึง 8 รอบ ยูเรเนียมที่ดูดซับได้ลดลงไปประมาณ 50% เมื่อเทียบกับการใช้ตัวดูดซับครั้งแรก ซึ่งผลการทดสอบการใช้ซ้ำนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu [22] และ Seko [30] ที่งานวิจัยสรุปว่าประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมลดลงหลังจากใช้ตัวดูดซับซ้ำในรอบที่ 5 เป็นต้นไป

### 10.7 ผลการศึกษา kinetic absorption ในน้ำ DI และน้ำทะเล

การศึกษากจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับในน้ำ DI และในน้ำทะเล เพื่อทดสอบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับน้ำในสภาวะปราศจากไอออนและสภาวะที่มีไอออนได้รวดเร็วเพียงใด ผลการศึกษาดังแสดงรูปที่ 29



รูปที่ 29 การศึกษา kinetic absorption ในน้ำ DI และน้ำทะเลของตัวดูดซับ (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, สารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม)

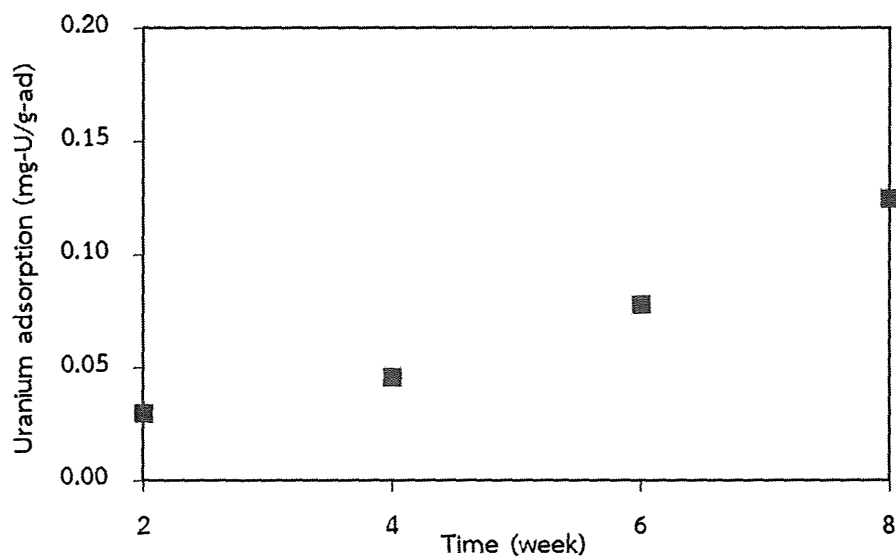
จากรูปที่ 29 ตัวดูดซับที่เตรียมจากปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 60 มิลลิลิตร สามารถดูดซับน้ำและน้ำทะเลได้ดีกว่าตัวดูดซับที่เตรียมจากปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50 มิลลิลิตร ในกรณีของปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 60 มิลลิลิตร อัตราส่วนการดูดซับน้ำ DI ค่า 3,800% และเข้าสู่สภาวะสมดุลหลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที อัตราส่วนการดูดซับน้ำทะเลมีค่า



1,400% และเข้าสู่สภาวะสมดุลหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที ถึงแม้ว่าปริมาณการดูดซับน้ำและน้ำทะเลจะไม่สูงมากเท่ากับงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล ดังนั้นผลการทดสอบจลนพลศาสตร์นี้แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับเอมีตอกซิมที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับน้ำทะเลได้อย่างรวดเร็ว และการที่สามารถดูดซับน้ำทะเลได้อย่างรวดเร็วนี้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเล

### 10.8 ผลการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในสภาวะตามธรรมชาติ

ผลการนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่บริเวณน้ำทะเลในสภาวะธรรมชาติ ณ เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ ดังแสดงรูปที่ 30

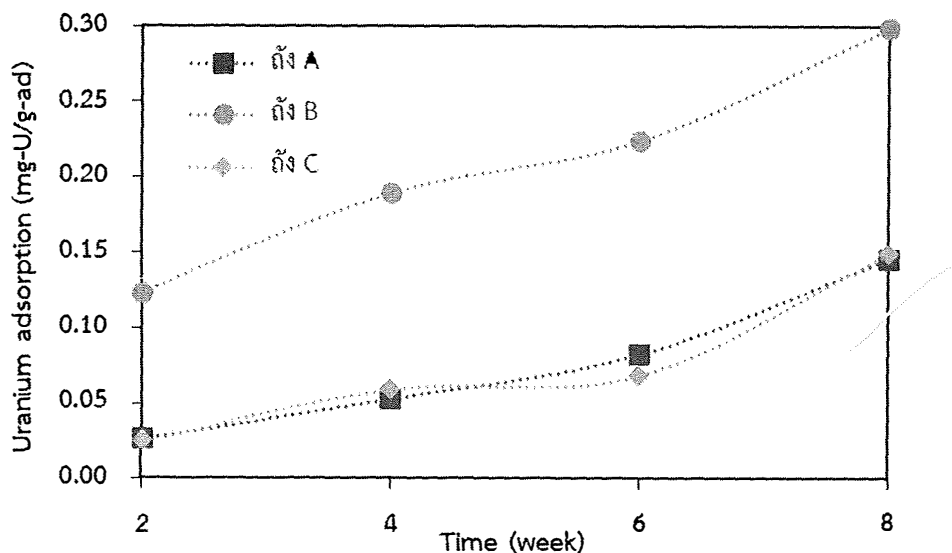


รูปที่ 30 ผลการดูดซับยูเรเนียมบริเวณน้ำทะเลในสภาวะธรรมชาติ (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, ปริมาณสารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และปริมาตร  $H_2O_2$  = 60 มิลลิลิตร)

จากรูปที่ 30 พบว่าการดูดซับยูเรเนียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่ที่นานขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพบว่า มีฝุ่นผงเกาะติดกับตัวดูดซับค่อนข้างมาก ส่งผลให้ค่าการดูดซับที่ได้มีค่าต่ำ โดยปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุดที่ 8 สัปดาห์คือ 0.125 mg/g

### 10.9 ผลการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลเข้มข้น

ผลการทดลองจุ่มตัวดูดซับในบริเวณน้ำทะเลเข้มข้น ณ โรงงานผลิตน้ำประปา เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี แสดงดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 ผลการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลเข้มข้น (เตรียมพอลิเมอร์จาก AN:MAA = 80:20, ปริมาณสารเชื่อมโยง MBA = 1 กรัม และปริมาตร  $H_2O_2$  = 60 มิลลิลิตร)

จากรูปที่ 31 ผลการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลเข้มข้นของตัวดูดซับ พบว่ามีการดูดซับยูเรเนียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่ที่นานขึ้น คือสูงสุด 8 สัปดาห์ในทุกๆ ถึงที่ทำการจุ่มแช่ตัวดูดซับ และจากกราฟแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นเข้าถังพลาสติกที่ต่างกันทำให้ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมต่างกันด้วย โดยอัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นที่สูงกว่า (ถึง B) สามารถดูดซับยูเรเนียมได้สูงกว่าอัตราการไหล

ของน้ำทะเลเข้มข้นที่ต่ำกว่า (ถึง A และถึง C) โดยที่อัตราการไหลประมาณ 18 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ถึง B) ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด คือ 0.30 mg/g ที่ 8 สัปดาห์ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงกว่าย่อมนำพาสารละลายยูเรเนียมที่อยู่ในน้ำทะเลเข้มข้นเข้ามาได้มากกว่า ส่วนน้ำทะเลเข้มข้นที่มีอัตราการไหลน้อยกว่าทั้งถึง A และถึง C ถึงแม้จะมีลักษณะการวางท่อน้ำที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากท่อน้ำที่ใช้มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นถึงแม้จะมีอัตราการไหลของน้ำที่ต่างกันเล็กน้อย แต่ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้มีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นที่เข้ามาในถังจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ เพราะฉะนั้นหากต้องการดูดซับยูเรเนียมให้ได้ปริมาณมาก ต้องใช้อัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลในรูปที่ 30 และ 31 พบว่าการดูดซับในน้ำทะเลเข้มข้นได้ค่าสูงกว่าในทะเลเปิด ถึงแม้ว่าในทะเลเปิดจะมีกระแส น้ำปริมาณมากกว่าน้ำทะเลเข้มข้นที่พัดพา ยูเรเนียมมาสู่ตัวดูดซับตลอดเวลา ก็ตาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสะอาดปราศจากอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ของน้ำทะเลที่ทำการจุ่มแช่ตัวดูดซับนั้นมีความสำคัญมาก

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในเฟสที่สองนี้ได้ทำการศึกษาสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลเพื่อดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยศึกษาชนิดของโคมอนอเมอร์ ชนิดของสารเชื่อมโยง ผลของระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับ ประสิทธิภาพการไข้ซ้ำของตัวดูดซับ อีกทั้งยังทำการศึกษาผลการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในสภาวะตามธรรมชาติและในน้ำทะเลเข้มข้น เพื่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์เจลที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

ชนิดของโคมอนอเมอร์ที่ทำการศึกษาคือ อะครีโลไนไตรล์/เมทาคริลิก แอซิด และ อะครีโลไนไตรล์/อะคริลิก แอซิด ชนิดของสารเชื่อมโยงที่ทำการศึกษาคือ เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์, กลูตาราลดีไฮด์ และ บิวเทนไดออล ไดอะคริเลท เทคนิค ICP-OES ยังคงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมในสารละลายกรดไนตริก ซึ่งละลายผงยูเรเนียมที่สกัดได้จากเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลของแต่ละพารามิเตอร์ โดยใช้วิธี Elution ผลของการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลในห้องปฏิบัติการวิจัยของเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจล โดยจุ่มแช่เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลเป็น 3 ppm

ผลการศึกษาพบว่า โคมอนอเมอร์ที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีที่สุด คือ อะครีโลไนไตรล์/เมทาคริลิก แอซิด สารเชื่อมโยงที่ใช้ในการสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลที่ทำให้สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีที่สุดคือ เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์และบิวเทนไดออล ไดอะคริเลท สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีและให้ผลการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน ผลของระยะเวลาการสกัดยูเรเนียมออกจากตัวดูดซับพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดคือ 2 ชั่วโมง ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพการไข้ซ้ำพบว่า เมื่อใช้ตัวดูดซับซ้ำเป็นจำนวน 8 ครั้งประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมลดลงประมาณ 50% เมื่อเทียบกับการใช้ครั้งแรก

การทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับโดยการนำตัวดูดซับไปจุ่มแช่ในบริเวณน้ำทะเลในสภาวะธรรมชาติและน้ำทะเลเข้มข้น ที่เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี เป็นเวลา 2 - 8 สัปดาห์ พบว่า เมื่อนำตัวดูดซับไปจุ่มในบริเวณน้ำทะเลธรรมชาติ ปริมาณยูเรเนียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่ที่นานขึ้นสูงสุดที่ 8 สัปดาห์ และ

ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้สูงสุด คือ 0.125 mg/g และเมื่อนำตัวดูดจับไปจุ่มแช่ในบริเวณน้ำทะเลเข้มข้น พบว่า ปริมาณการดูดจับยูเรเนียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจุ่มแช่เช่นเดียวกันกับการจุ่มแช่บริเวณน้ำทะเลธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลของน้ำทะเลเข้มข้นที่ผ่านตัวดูดจับเป็นปัจจัยสำคัญมากที่ส่งผลต่อปริมาณ ยูเรเนียมที่ดูดจับได้ เมื่อน้ำทะเลเข้มข้นมีอัตราการไหลผ่านตัวดูดจับมากขึ้น ส่งผลให้ตัวดูดจับสามารถดูดจับ ยูเรเนียมได้สูงขึ้น โดยที่อัตราการไหลประมาณ 18 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้สูงสุด คือ 0.30 mg/g ที่ 8 สัปดาห์

โดยสรุปแล้ว ตัวดูดจับยูเรเนียมที่สังเคราะห์ขึ้นจากโคมอนอเมอร์อะครีโลไนไตรล์และเมทาคริลิก แอซิด สารเชื่อมโยงเมทิลีนบิสอะคริลสไมด์ และสารเริ่มปฏิกิริยาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากนั้นนำไปฉายรังสียูวี เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้เป็นพอลิเมอร์เจลออกมา และนำไปผ่านกระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชันเคมี ได้ เป็นเอมีดอควิมพอลิเมอร์เจล และผ่านกระบวนการต่างๆจนกระทั่งได้เป็นพอลิเมอร์ตัวดูดจับที่พร้อมใช้งาน ตัวดูด จับชนิดไฮโดรเจลนี้สามารถนำไปดูดจับยูเรเนียมได้จริง ทั้งในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูง (ใน ห้องปฏิบัติการที่มีการเพิ่มความเข้มข้นยูเรเนียม) และน้ำทะเลในสภาวะธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียม ต่ำมาก อีกทั้งยังมีทั้งกระแสลม กระแสน้ำ รวมถึงอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถ ในการดูดจับยูเรเนียมทั้งสิ้น แต่ตัวดูดจับยังสามารถดูดจับยูเรเนียมได้ ถึงแม้ว่าปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้จะมี ค่าต่ำ ดังนั้นในอนาคตจึงต้องหากระบวนการกรองอนุภาคแขวนลอยออกจากน้ำทะเลให้สะอาดก่อนสัมผัสกับตัว ดูดจับ และพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ตัวดูดจับ รวมถึงสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ให้มีประสิทธิภาพมาก ยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

1. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง และคณะ “การศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย (Study on Uranium Extraction from Thailand’s Seawater)” สนับสนุนโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สัญญาเลขที่ 54-B104000-076-IO.SS03A3008125-CU (2556)
2. Schwochau, K. "Extraction of metals from sea water". Inorganic chemistry. (1984). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
3. Ratnitsai, V., et al. "Enhancement of uranium extraction from seawater using chromic-acid-treated amidoxime adsorbent prepared by simultaneous irradiation grafting technique". Journal of nuclear science and technology 52 (2015) 1151-1161.
4. Das, S., et al. "Chemical aspects of uranium recovery from seawater by amidoximated electron-beam-grafted polypropylene membranes". Desalination 232 (2008) 243-253.
5. Kabay, N., et al. "Preparation of amidoxime-fiber adsorbents by radiation-induced grafting". Radiation physics and chemistry 46 (1995) 833-836.
6. Saito, K., et al. "Characteristics of uranium adsorption by amidoxime membrane synthesized by radiationinduced graft polymerization". Journal of membrane science 34 (1987) 307-315.
7. Sugo, T., et al. "Recovery System for Uranium from Seawater with Fibrous Adsorbent and Its Preliminary Cost Estimation". Journal of the atomic energy society of Japan / atomic energy society of Japan 43 (2001) 1010-1016.

8. Zhang, A., Asakura, T., and Uchiyama, G. "The adsorption mechanism of uranium(VI) from seawater on a macroporous fibrous polymeric adsorbent containing amidoxime chelating functional group". *Reactive and functional polymers* 57 (2003) 67-76.
9. Zhang, A., Uchiyama, G., and Asakura, T. "pH Effect on the uranium adsorption from seawater by a macroporous fibrous polymeric material containing amidoxime chelating functional group". *Reactive and functional polymers* 63 (2005) 143-153.
10. Tamada, M. "Collection of uranium from seawater". Technical meeting at IAEA (2009) Vienna, Austria.
11. Tamada, M. "Current status of technology for collection of uranium from seawater" (2010).
12. Hara, K., et al. "Attempts to capturing ppb-level elements from sea water with hydrogels". *Progress in nuclear energy* 92 (2016) 228-233.
13. Wongjaikham, W., et al. "Enhancement of uranium recovery from seawater using amidoximated polymer gel synthesized from radiation-polymerization and crosslinking of acrylonitrile and methacrylic acid monomers". *Journal of environmental chemical engineering* 6 (2018) 2768-2777.
14. ชัยวุฒิ วัตจิ่ง และคณะ "ผลของสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของไฮโดรเจลเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงสร้างตาข่ายของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง". *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ* 16 (2556) 131-138.
15. อรุณี คงดี และคณะ "การพัฒนาพอลิเมอร์ดูดซับน้ำและตรวจสอบลักษณะเฉพาะเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเพาะเลี้ยงพืช". *สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ปทุมธานี* (2545).
16. Maitra, J. and Shukla, V. "Cross-linking in hydrogels". *A review* 4 (2014) 25-31.

17. Gabriela C., et al. "Comparison of crosslinking agents on the swelling capacities of hydrogels based on acrylamide and sodium methacrylate". XIV Latin American symposium on polymers (2014) Porto Galinhas, Brazil.
18. Mohan, Y.M., et al. "Swelling and Diffusion Properties of Poly(acrylamide-co-maleic acid) Hydrogels: A Study with Different Crosslinking Agents". International journal of polymeric materials and polymeric biomaterials 55 (2006) 867-892.
19. Bayramoglu, G. and Arica, M.Y. "MCM-41 silica particles grafted with polyacrylonitrile: Modification in to amidoxime and carboxyl groups for enhanced uranium removal from aqueous medium". Microporous and mesoporous materials 226 (2016) 117-124.
20. Yuan, D., et al. "Removal of uranium (VI) from aqueous solution by amidoxime functionalized superparamagnetic polymer microspheres prepared by a controlled radical polymerization in the presence of DPE". Chemical engineering journal 285 (2016) 358-367.
21. Wang, Y., et al. "Amidoxime-grafted multiwalled carbon nanotubes by plasma techniques for efficient removal of uranium(VI)". Applied surface science 320 (2014) 10-20.
22. Yu, H.W., et al. "Recovery of uranium ions from simulated seawater with palygorskite/amidoxime polyacrylonitrile composite". Applied clay science 111 (2015) 67-75.
23. Xu, C., et al. "Adsorption of uranium by amidoximated chitosan-grafted polyacrylonitrile, using response surface methodology". Carbohydrate polymers 121 (2015) 79-85.
24. Sekiguchi, K., et al. "Uranium uptake during permeation of seawater through amidoxime-group-immobilized micropores". Reactive polymers 23 (1994) 141-145.



25. Takeda, T., et al. "Adsorption and elution in hollow-fiber-packed bed for recovery of uranium from seawater". *Industrial & engineering chemistry research* 30 (1991) 185-190.
26. Gao, Q., et al. "Radiation synthesis of a new amidoximated UHMWPE fibrous adsorbent with high adsorption selectivity for uranium over vanadium in simulated seawater". *Radiation physics and chemistry* 122 (2016) 1-8.
27. Kim, J., et al. "Uptake of Uranium from Seawater by Amidoxime-Based Polymeric Adsorbent: Field Experiments, Modeling, and Updated Economic Assessment". *Industrial & engineering chemistry research* 53 (2014) 6076-6083.
28. Sodaye, H., et al. "Extraction of uranium from the concentrated brine rejected by integrated nuclear desalination plants". *Desalination* 235 (2009) 9-32.
29. Oyola, Y. and Dai, S. "High surface-area amidoxime-based polymer fibers co-grafted with various acid monomers yielding increased adsorption capacity for the extraction of uranium from seawater". *Dalton transactions* 45 (2016) 8824-8834.
30. Seko, N., et al. "Fine Fibrous Amidoxime Adsorbent Synthesized by Grafting and Uranium Adsorption–Elution Cyclic Test with Seawater". *Separation science and technology* 39 (2004) 3753-3767.