



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. 2561

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะ
วิศวกรรมศาสตร์และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาสับสนุนโครงการวิจัยนี้และจัดสรร
งบประมาณแผ่นดินให้ได้อย่างเพียงพอ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้ดีขึ้นและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสังเคราะห์เอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลเพื่อดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยศึกษาสัดส่วนของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์และเมทอะคริลิกแอซิด ปริมาณของสารเชื่อมโยง และปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อีกทั้งยังทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการฉายและอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) เพื่อการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

สัดส่วนของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ต่อเมทอะคริลิกแอซิด ที่ทำการศึกษาคือ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ทำการศึกษา คือ 0.25, 0.5, 1 และ 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 50, 60, 70 และ 80 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) คือ 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต คือ 45 และ 80 °C ผลการสังเคราะห์พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เหมาะสมที่สุด คือ 8 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสียูวีที่เหมาะสม คือ 45 °C ส่วนสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์เพื่อให้ได้ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมสูงสุด คือ สัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ต่อเมทอะคริลิกแอซิดที่ 80:20 ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยผลการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลในห้องปฏิบัติการวิจัยที่เพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลเป็น 10 ppm และจุ่มแช่เป็นเวลา 1 สัปดาห์ สามารถดูดซับยูเรเนียมได้สูงถึง 17.02 mg U/g adsorbent นอกจากนี้ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันในเจลพอลิเมอร์ก่อนและหลังขั้นตอน Amidoximation ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าหมู่ไฮยาโนทั้งหมด (หรือเกือบทั้งหมด) ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีดอกซิม

การใช้มอนอเมอร์มาสังเคราะห์เพื่อให้ได้เจลพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่างานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนเป็น Substrate เนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายของ Substrate และเมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับในหน่วย mg U/g adsorbent เจลพอลิเมอร์จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าการใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนเนื่องจากไม่มีมวลของ Substrate อยู่ในตัวหาร นอกจากนี้หากนำไปใช้งานจริง การที่มวลของตัวดูดซับลดลงจะทำให้มีความสะดวกในการขนย้ายและการติดตั้งมากขึ้น ท้ายสุดแล้ว การที่ไม่ใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อม ทำให้ตัวดูดซับนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

Abstract

This research synthesized the amidoxime polymer gel for uranium extraction from seawater. Studied parameters were the ratio of acrylonitrile monomer to methacrylic acid monomer, crosslink agent concentration and hydrogen peroxide concentration. Moreover, the UV-C irradiation time as well as temperature were studied to allow synthesis of the highest capacity gel for uranium adsorption in seawater.

The studied ratios of acrylonitrile monomer to methacrylic acid monomer were 90:10, 80:20, 70:30 and 60:40. The studied crosslink agent concentrations were 0.25, 0.5, 1 and 2 g/100 ml monomer. The studied hydrogen peroxide concentrations were 50, 60, 70 and 80 ml/100 ml monomer. The studied UV-C irradiation times were 4, 6, 8 and 10 hours and the studied irradiation temperatures were 45 and 80 °C. Results revealed that the optimum irradiation time and temperature were 8 hours and 45 °C, respectively. The optimized synthetic condition to obtain the highest uranium adsorption capacity was the ratio of acrylonitrile monomer to methacrylic acid monomer of 80:20, crosslink agent concentration of 1 g/100 ml monomer and hydrogen peroxide concentration of 60 ml/100 ml monomer. Uranium adsorption result in the laboratory with added 10 ppm of uranium in seawater sample and submersion time of 1 week indicated the very high uranium adsorption capacity of 17.02 mg U/g adsorbent. Moreover, functional group analysis of the polymer gel before and after the amidoximation process using FTIR technique showed that all of (or most of) the cyano group was converted into the amidoxime group.

By synthesizing the polymer gel from monomers, the adsorption capacity will be superior to previous researches with the use of polyethylene fibers as substrates because of the absence of the substrate cost and the calculated adsorption capacity in mg U/g adsorbent will be higher than those based on polyethylene fibers because there is no mass of the

substrate in the denominator. Additionally, in real applications, the reduced mass of the adsorbent will assist in transportation as well as in installation. Finally, as polyethylene cannot be decomposed in the environment, this polymer gel adsorbent is highly environmentally friendly.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ii
บทคัดย่อ.....	iii
Abstract	iv
สารบัญตาราง	vii
สารบัญภาพ	viii
บทนำ.....	1
เนื้อเรื่อง.....	22
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	61

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล.....	5
ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในรูปที่ไอออนต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล	6
ตารางที่ 3 Functional group ที่สามารถดูดจับยูเรเนียมได้โดยการแทนที่ Carbonate ion ใน $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$	8
ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการดูดจับยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยกลุ่มนักวิจัยต่างๆ	15
ตารางที่ 5 ผลของระยะเวลาการฉายรังสี UV-C	33
ตารางที่ 6 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ฉายรังสี UV-C	35
ตารางที่ 7 ลักษณะของเจลพอลิเมอร์หลังนำไปฉายรังสียูวี.....	37
ตารางที่ 8 ความหนาแน่นของหมู่เอมีตอกซิมของแต่ละสัดส่วนมอนอเมอร์	38
ตารางที่ 9 ความหนาแน่นของหมู่เอมีตอกซิมของแต่ละปริมาณสารเชื่อมโยง	40
ตารางที่ 10 ความหนาแน่นของหมู่เอมีตอกซิมของแต่ละปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	41
ตารางที่ 11 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 90:10.....	44
ตารางที่ 12 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 80:20.....	46
ตารางที่ 13 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30.....	48
ตารางที่ 14 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 60:40.....	49
ตารางที่ 15 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม.....	51
ตารางที่ 16 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม	52
ตารางที่ 17 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม	54
ตารางที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Amidoxime group density กับปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ที่อัตราส่วน มอนอเมอร์อะครีโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด, ปริมาณสารเชื่อมโยง และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ	56

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างของ Tricarbonato uranyl anion	7
รูปที่ 2 การเกิด Irradiation-induced graft polymerization	9
รูปที่ 3 การดูดซับยูเรเนียม (การเกิด Complexion) โดยหมู่ Amidoxime functional group	10
รูปที่ 4 การสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์และเส้นใย Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว	11
รูปที่ 5 ลักษณะการทดสอบภาคสนามของการวิจัยการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศญี่ปุ่น	13
รูปที่ 6 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้และตัวอย่างเค็กเกลือที่สกัดได้	14
รูปที่ 7 ตำแหน่งที่ทำการศึกษาเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและวางตัวดูดซับยูเรเนียมในโครงการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย	17
รูปที่ 8 หลักการทำงานของ Reverse Osmosis ในภาพรวม และภาพตัดขวางของตัวกรอง	18
รูปที่ 9 โรงงาน Desalination plant ในต่างประเทศ	19
รูปที่ 10 ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่เตรียมสำหรับนำไปฉายรังสี UV-C	25
รูปที่ 11 เครื่องมือสำหรับฉายรังสี UV-C	25
รูปที่ 12 ตัวอย่างเจลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นหลังฉายรังสียูวี	26
รูปที่ 13 ขั้นตอนการแช่เจลพอลิเมอร์ในสารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์	28
รูปที่ 14 ขั้นตอนการแช่เอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลในกรดไฮโดรคลอริก	28
รูปที่ 15 ตัวอย่างเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลที่พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล	29
รูปที่ 16 ตัวอย่างเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลที่ห่อด้วยผ้าขาวบาง	30
รูปที่ 17 ตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมใส่ในถุงตาข่ายเพื่อเตรียมลงจุ่มแช่ในถังบรรจุน้ำทะเล	30
รูปที่ 18 ถังบรรจุน้ำทะเลที่ใช้ในการจุ่มแช่ตัวดูดซับยูเรเนียมในห้องปฏิบัติการวิจัย	31
รูปที่ 19 การแช่ตัวดูดซับในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์	32
รูปที่ 20 ผงธาตุที่ดูดซับได้สี่เกลือที่แห้งติดอยู่ด้านล่างของบีกเกอร์	32
รูปที่ 21 ผลของสัดส่วนขององค์ประกอบมอนอเมอร์ต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม	39
รูปที่ 22 ผลของปริมาณสารเชื่อมโยงต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม	40
รูปที่ 23 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม	41
รูปที่ 24 สเปกตรัมโดยเทคนิค FTIR ของเจลพอลิเมอร์	42
รูปที่ 25 สเปกตรัมโดยเทคนิค FTIR ของเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจล	43
รูปที่ 26 สีของเจลพอลิเมอร์ก่อนดูดซับยูเรเนียม (ซ้าย) และหลังดูดซับ (ขวา)	44

รูปที่ 27 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 90:10 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	45
รูปที่ 28 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 80:20 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	47
รูปที่ 29 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	48
รูปที่ 30 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 60:40 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	50
รูปที่ 31 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่สัดส่วนมอนอเมอร์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน	52
รูปที่ 32 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่สัดส่วนมอนอเมอร์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน	53
รูปที่ 33 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่สัดส่วนมอนอเมอร์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน	55

บทนำ

เนื่องจากวิกฤตด้านพลังงานทั่วโลกในปัจจุบัน ทำให้มากกว่า 30 ประเทศที่ยังไม่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีแผนที่จะสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อย่างจริงจัง และหลายประเทศทั่วโลกที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อยู่แล้ว ก็มีแผนที่จะสร้างเพิ่มขึ้นอีก ทำให้ในปัจจุบันทั่วโลกมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อยู่ระหว่างการก่อสร้างถึง 59 โรง [International Atomic Energy Agency (IAEA), 4 มกราคม ค.ศ. 2018] 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 U₃O₈ หรือสูงกว่าราคาอ้างอิงยูเรเนียมที่ 162 US\$/kg U₃O₈ ประมาณ 18 เท่า

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการที่เชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงและจากการที่ราคายูเรเนียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นลำดับ และจากการที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตไฟฟ้า ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่ราคายูเรเนียมจะสูงพอที่จะสามารถสกัดจากน้ำทะเลในเชิงพาณิชย์ได้ และหากทั่วโลกมีความต้องการยูเรเนียมสูงขึ้นมากในอนาคต หรือหากเกิดกรณีสงครามในหลายแห่งทั่วโลกซึ่งอาจกระทบต่อ Supply ของยูเรเนียม ก็อาจทำให้แต่ละประเทศที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องจัดหาแร่ยูเรเนียมเอง (โดยส่งต่อไปให้บริษัท

ต่างประเทศทำการเสริมสมรรถนะและผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงให้) การที่ประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่ยาวและเป็นอิสระจากเพื่อนบ้านจึงเป็นโอกาสอันดีอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องและให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตั้งแต่เวลานี้ เพราะการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้ดียิ่งขึ้นและการผลิตบุคลากรที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้ต้องใช้เวลาอันยาวนาน ที่สำคัญคือการทำประเทศไทยจะสามารถพึ่งพาตนเองด้านพลังงานได้อย่างยั่งยืน จำเป็นต้องศึกษาหาทางพึ่งพาตนเองด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับเอมีดอกซิมเจลประสิทธิภาพสูง เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

ทฤษฎี สมมติฐาน และ / หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

ได้มีการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลมาก่อนช้านานแล้ว ในแต่ละการศึกษาก็ใช้วัสดุในการดูดซับที่แตกต่างกันเช่น 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

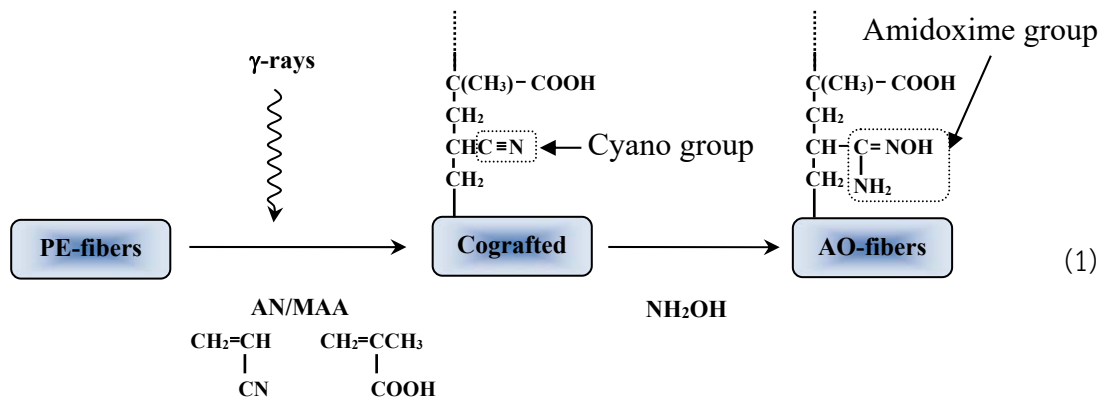
อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใย Polyethylene fiber เพื่อเป็น Substrate ให้เกิดการกราฟต์ของหมู่ฟังก์ชันนั้น มวลของเส้นใยจะเป็นส่วนหนึ่งของมวลของตัวดูดซับ ทำให้เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับโดยมีหน่วยเป็น mg-U adsorbed/g adsorbent แล้วนั้น จะมีค่าที่ไม่สูงเท่ากับหากไม่ต้องมีมวลของ Substrate อยู่ด้วย งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลที่มีประสิทธิภาพสูง Amidoxime gel โดยใน

การสังเคราะห์จะไม่ใช้ Substrate แต่จะใช้ Crosslink agent ระหว่างการฉายรังสีมอนอเมอร์ เพื่อให้หมู่ฟังก์ชันเกิดการ Crosslink และเป็นเจลที่เสถียรขึ้น ซึ่งหลังจากบดให้เจลเป็นอนุภาคขนาดเล็กแล้ว สามารถนำอนุภาค Amidoxime gel เหล่านี้ไปดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้จะไม่ใช้การฉายรังสีแกมมาเพื่อให้เกิดการ Polymerize และ Crosslink แต่จะผสม H_2O_2 เข้ากับสารละลายมอนอเมอร์และ Crosslink agent และฉายรังสี UV-C แทน ซึ่งพลังงานของรังสี UV-C เพียงพอที่จะทำให้ H_2O_2 แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) $OH\cdot$ โดยอนุมูลอิสระนี้จะก่อให้เกิดการ Polymerize และ Crosslink ได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน การใช้การฉายรังสี UV-C นี้จะช่วยลดต้นทุนการผลิต Amidoxime gel ซึ่งไม่ต้องพึ่งพาการฉายรังสีแกมมาที่ต้องมีระบบป้องกันรังสีต่างๆ ด้วย และสามารถทำการฉายรังสี UV-C ในห้องปฏิบัติการวิจัยได้ตลอดเวลาตามที่ต้องการ งานวิจัยลักษณะนี้ยังไม่มีนักวิจัยผู้ใดทำมาก่อน จึงเป็นงานวิจัยใหม่ที่ให้องค์ความรู้ใหม่อย่างแท้จริง

งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้

1. สัดส่วนของ Acrylonitrile (AN) monomer ต่อ Methacrylic acid (MAA) monomer
2. การใช้ Acrylic acid monomer แทน Methacrylic acid monomer (ผลการทดลองส่วนนี้จะอยู่ในเฟสที่ 2 ของการวิจัย)
3. ชนิดและสัดส่วนของ Crosslink agent (ผลการทดลองชนิดของ Crosslink agent จะอยู่ในเฟสที่ 2 ของการวิจัย)
4. ระยะเวลาการฉายรังสี UV-C
5. อุณหภูมิระหว่างการฉายรังสี UV-C

Acrylonitrile (AN) monomer เป็นมอนอเมอร์ที่มีหมู่ Cyano ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนให้เป็นหมู่ Amidoxime ที่ต้องการได้ตั้งสมการที่ (1) จึงเป็นข้อได้เปรียบของการใช้หมู่ฟังก์ชันนี้เทียบกับหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ซึ่งงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้หมู่ Amidoxime ก็ทำการเปลี่ยนหมู่ Cyano โดยสมการนี้เช่นกัน (สถานะต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา รวมถึงความเข้มข้นของ Hydroxylamine hydrochloride จะแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง)



ส่วน Methacrylic acid (MAA) monomer เป็นมอนอเมอร์ที่ก่อให้เกิดความชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้น้ำทะเลซึมเข้าหาหุ้ม Amidoxime ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีมอนอเมอร์อื่นๆ เช่น Acrylic acid monomer ที่ก่อให้เกิดความชอบน้ำเช่นกัน ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษามอนอเมอร์ ชนิดอื่นๆ ด้วย ซึ่งอาจทำให้การดูดซับยูเรเนียมมีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีก

ส่วนการสกัดยูเรเนียมจาก Brine concentrate ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลที่ใช้ระบบ Reverse osmosis นั้น (ประเทศไทยมีดำเนินการที่เกาะล้าน จังหวัดชลบุรี เป็นต้น) Brine concentrate จะมีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูงกว่าในน้ำทะเล มีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำทะเล และมีการไหลถ่ายเทของน้ำตลอดเวลา ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเอื้อต่อการดูดซับยูเรเนียมเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเล นอกจากนี้จะลดค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมากและปลอดภัยกว่าในการที่ไม่ต้องออกไปดำเนินการวางและเก็บตัวดูดซับในทะเลเปิด

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

น้ำทะเลเป็นแหล่งธาตุต่างๆ มากมาย โดยมีธาตุต่างๆ ประมาณ 80 ชนิดที่สามารถตรวจวัดได้ อย่างไรก็ตาม เคมีของน้ำทะเลถูกควบคุมด้วย 6 ไอออนเหล่านี้เท่านั้นคือ Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , และ SO_4^{2-} เนื่องจากเป็นองค์ประกอบ มากกว่า 99.5% ของไอออนทั้งหมดที่ละลายอยู่ในทะเล ตารางที่ 1 แสดงธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล

ตารางที่ 1 ธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล [3]

Metal	Concentration		Main chemical species
	[mol/l]	[mg/l]	
Li	2.5×10^{-5}	0.173	Li^+
Be	6.3×10^{-10}	5.6×10^{-6}	$\text{Be}(\text{OH})^+$
Na	0.468	10.77×10^3	Na^+
Mg	5.32×10^{-2}	12.9×10^2	Mg^{2+}
Al	3.7×10^{-8}	1.0×10^{-3}	$[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$
K	1.02×10^{-2}	3.8×10^2	K^+
Ca	1.02×10^{-2}	4.12×10^2	Ca^{2+}
Sc	1.3×10^{-11}	6×10^{-7}	$\text{Sc}(\text{OH})_3$
Ti	2×10^{-8}	1×10^{-3}	$\text{Ti}(\text{OH})_4$
V	3.7×10^{-8}	1.9×10^{-3}	H_2VO_4^- , HVO_4^{2-}
Cr	1.54×10^{-9}	8.0×10^{-5}	$\text{Cr}(\text{OH})_3$, CrO_4^{2-}
Mn	3.6×10^{-9}	2.0×10^{-4}	Mn^{2+} , MnCl^+
Fe	2.3×10^{-8}	1.3×10^{-3}	$[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$, $[\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$
Co	6.8×10^{-10}	4.0×10^{-5}	Co^{2+}
Ni	3.4×10^{-9}	2.0×10^{-4}	Ni^{2+}
Cu	1.6×10^{-9}	1.0×10^{-4}	CuCO_3 , $\text{Cu}(\text{OH})^+$
Zn	1.5×10^{-10}	1.0×10^{-5}	$\text{Zn}(\text{OH})^+$, Zn^{2+} , ZnCO_3
Ga	4.3×10^{-10}	3×10^{-5}	$[\text{Ga}(\text{OH})_4]^-$
Ge	6.9×10^{-10}	5×10^{-5}	$\text{Ge}(\text{OH})_4$
Rb	1.4×10^{-6}	0.12	Rb^+
Sr	9.2×10^{-5}	8.1	Sr^{2+}
Y	1.5×10^{-11}	1.3×10^{-6}	$\text{Y}(\text{OH})_3$
Zr	3.3×10^{-10}	3×10^{-5}	$\text{Zr}(\text{OH})_4$
Nb	1×10^{-10}	1×10^{-5}	-
Mo	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-2}	MoO_4^{2-}
Ag	9.3×10^{-11}	1.0×10^{-5}	$[\text{AgCl}_2]^-$
Cd	8.9×10^{-11}	1.0×10^{-5}	CdCl_2
In	0.8×10^{-12}	1×10^{-5}	$\text{In}(\text{OH})_2^+$
Sn	8.4×10^{-11}	1×10^{-5}	$[\text{SnO}(\text{OH})_3]^-$
Sb	1.7×10^{-9}	2.1×10^{-5}	$[\text{Sb}(\text{OH})_6]^-$
Cs	3×10^{-9}	4.0×10^{-5}	Cs^+
Ba	1.5×10^{-7}	2.0×10^{-5}	Ba^{2+}
La	2×10^{-11}	3×10^{-5}	$\text{La}(\text{OH})_3$
Ce	1×10^{-10}	1×10^{-5}	$\text{Ce}(\text{OH})_3$
Pr	4×10^{-12}	6×10^{-5}	$\text{Pr}(\text{OH})_3$
Nd	1.9×10^{-11}	3×10^{-5}	$\text{Nd}(\text{OH})_3$

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

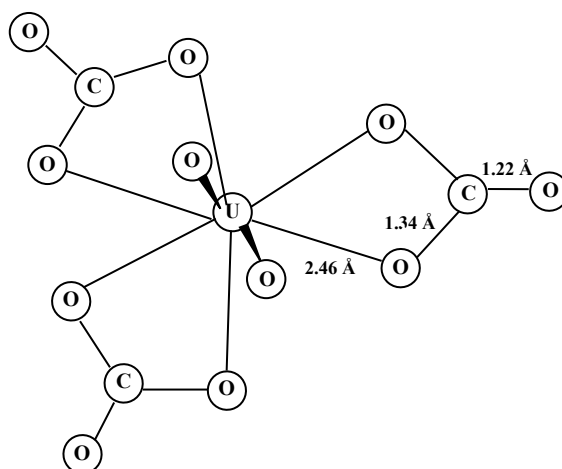
สำหรับยูเรเนียม มีไอออนชนิดต่างๆ ละลายอยู่ในน้ำทะเลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในรูปที่ไอออนต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล [3]

Compound	Concentration [mol/L]	Weight fraction [wt% of U]
UO ₂ ²⁺	1.53×10^{-17}	0.01×10^{-5}
UO ₂ (OH) ₂	1.53×10^{-12}	0.01
[UO ₂ (CO ₃) ₂] ²⁻	5.46×10^{-11}	0.39
[UO ₂ (OH) ₃] ⁻	2.43×10^{-10}	1.75
[UO ₂ (CO ₃) ₃] ⁴⁻	1.37×10^{-8}	98.82

จะเห็นได้ว่ายูเรเนียมที่มีอยู่ในน้ำทะเล อยู่ในรูปไอออนหลักคือ Tricarbonato uranyl anion

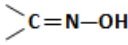
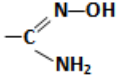
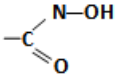

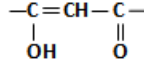
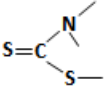
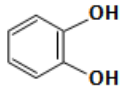
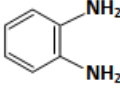
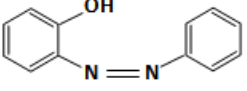
[UO₂(CO₃)₃]⁴⁻ ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของ Tricarbonato uranyl anion [3]

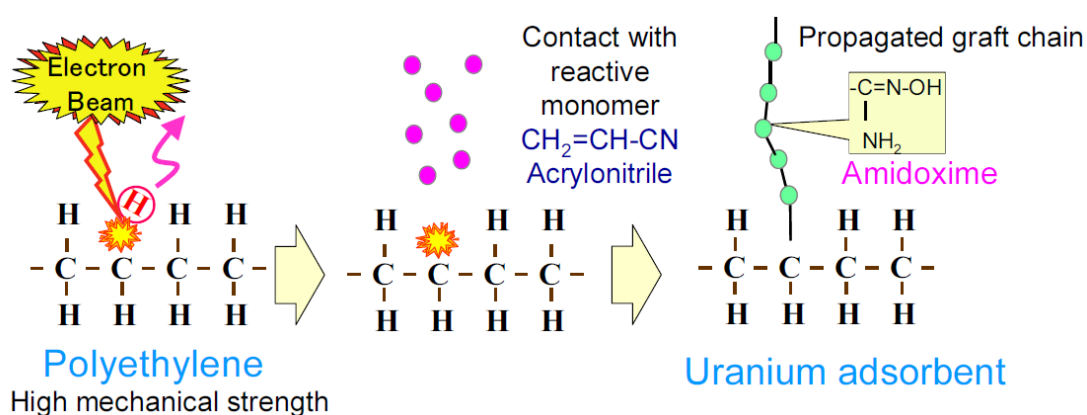
ได้มีการศึกษาการสัถยูเรเนียมจากน้ำทะเลมาก่อนช้านานแล้ว โดยเริ่มครั้งแรกสุดเมื่อปี ค.ศ. 1953 และมีการศึกษาหลังจากนั้นมากมาย โดยหลักๆ มีการศึกษาวิจัยในประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ในแต่ละการศึกษาก็ใช้วัสดุในการดูดจับที่แตกต่างกันเช่น Porous membrane, polymer, lead naphthalene tetracarboxylate, lead pyrophosphate, lead stannate, lead sulfide, hydrous titanium oxide, basic zinc carbonate และ Functional group สำหรับ Functional group ที่สามารถดูดจับยูเรเนียมได้โดยการแทนที่ Carbonate ion ใน $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Functional group ที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้โดยการแทนที่ Carbonate ion ใน $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ [3]

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

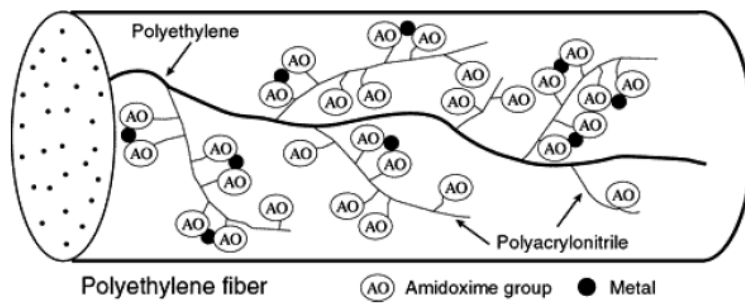
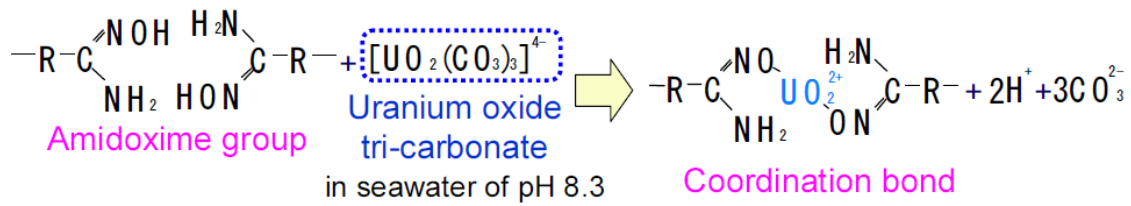
ซึ่งสามารถนำ Functional group เหล่านี้ไปต่อกับวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ จากการศึกษางานวิจัยที่สามารถนำมาพัฒนาต่อยอดได้คือเรื่องในเอกสารอ้างอิงลำดับที่ 4 - 9 โดยงานวิจัยเหล่านี้ได้ศึกษาการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลหรือตัวอย่างน้ำทะเลโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ว่าวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์นี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลที่สูงมากเนื่องจากหมู่ Amidoxime functional group มี Affinity ในการดูดซับยูเรเนียมสูงมาก และการสังเคราะห์วัสดุนี้ก็ไม่มีความยุ่งยากมากนัก สามารถทำได้ใน

ห้องปฏิบัติการวิจัยเกือบทั้งหมด และเนื่องจากในขั้นตอนการสังเคราะห์ต้องใช้รังสีทำให้เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ที่ต่อกิ่ง (Irradiation-induced graft polymerization) จึงต้องมีการใช้ Facility เครื่องฉายรังสีร่วมกับ 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



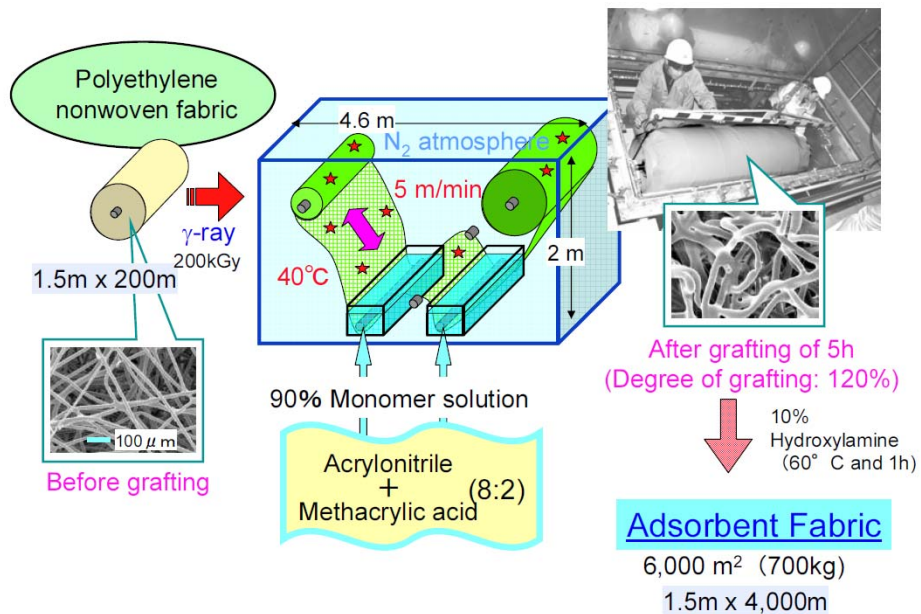
รูปที่ 2 การเกิด Irradiation-induced graft polymerization [10]

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

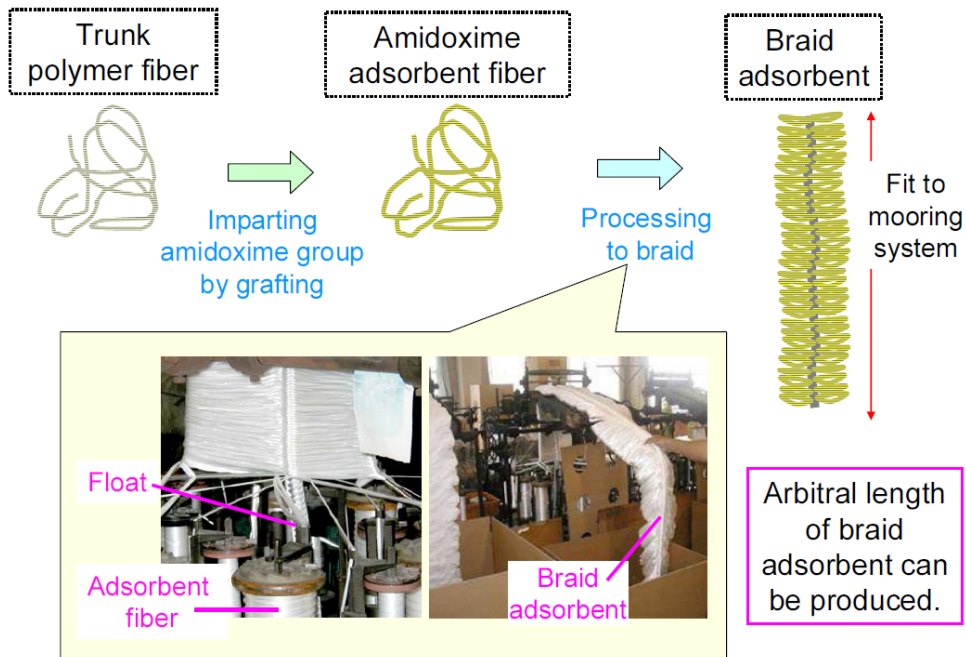


รูปที่ 3 การดูดจับยูเรเนียม (การเกิด Complexion) โดยหมู่ Amidoxime functional group [10]

นอกจากนี้ในประเทศญี่ปุ่น ได้มีการศึกษาการสกัดยูเรเนียมภาคสนามในทะเลอย่างจริงจัง โดยสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์และเส้นใย Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว ดังแสดงในรูปที่ 4

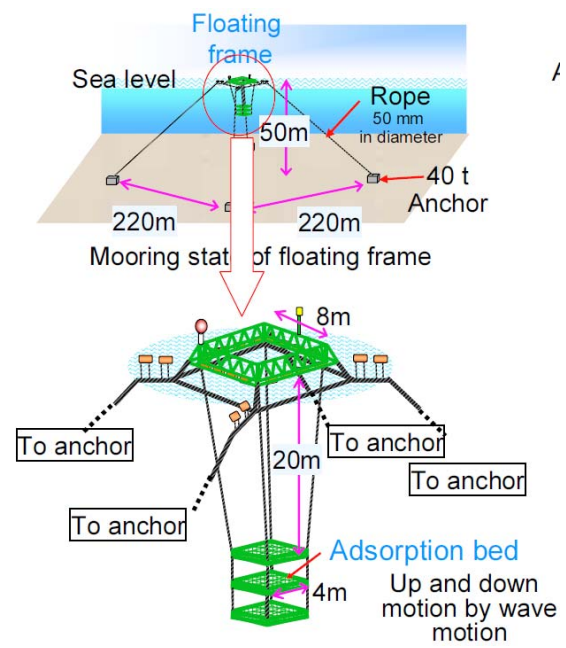
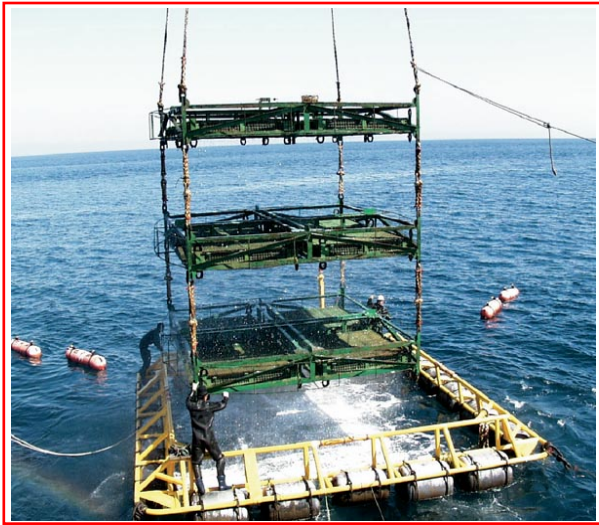


(1) ขั้นตอนการสังเคราะห์แผ่นพอลิเมอร์ Polyethylene ที่มี Amidoxime functional group เกาะอยู่บนผิว



(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



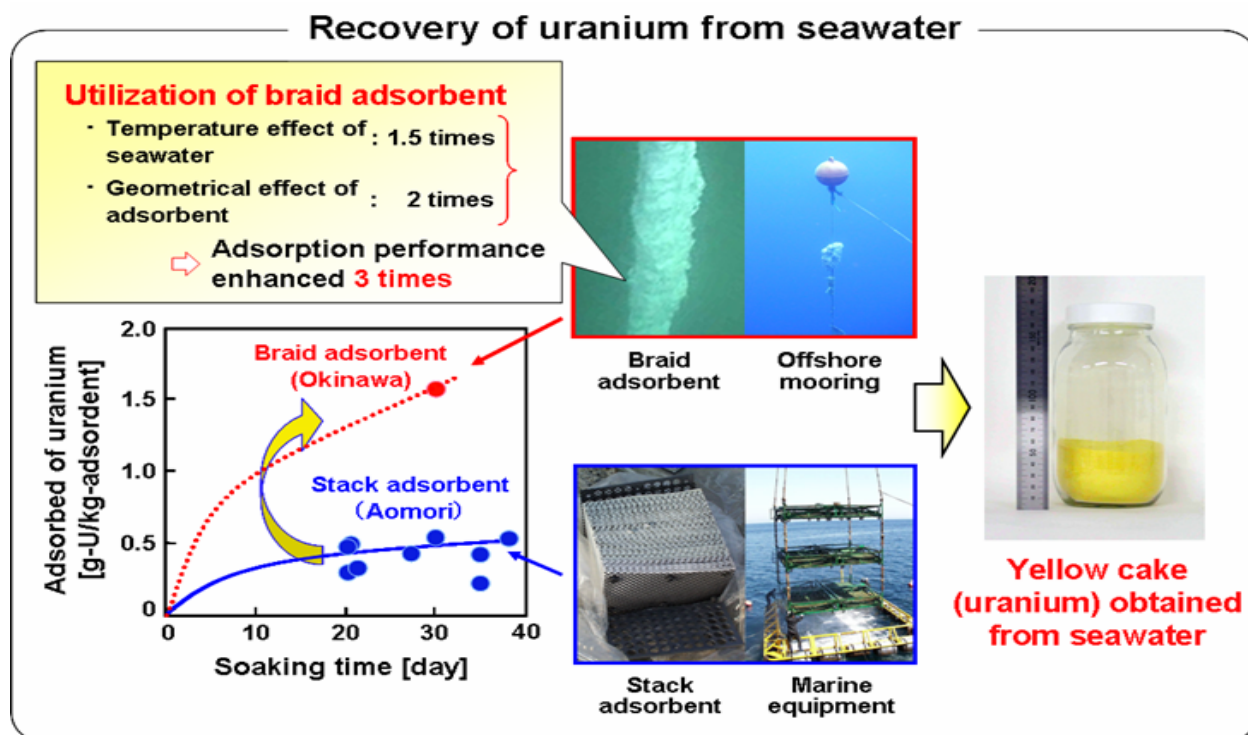
(2) การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์แบบเส้นใยก่อนนำไปใช้ในทะเล



(3) การเก็บวัสดุพอลิเมอร์แบบเส้นใยเพื่อนำมาสกัดยูเรเนียมออก

รูปที่ 5 ลักษณะการทดสอบภาคสนามของการวิจัยการดูดจับยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย [10]

รูปที่ 6 แสดงปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ ซึ่งในการดูดจับจากน้ำทะเลระหว่างปี 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) จากรูปและคำอธิบายในรูปจะเห็นได้ว่าตัวดูดจับแบบเส้นใย (Braid absorbent) มีความสามารถในการดูดจับได้สูงกว่าแบบแผ่น (Stack absorbent) ถึง 2 เท่า นอกจากนี้ ผลของอุณหภูมิยังช่วยให้ดูดจับยูเรเนียมได้มากขึ้นด้วย โดยสถานที่ที่ทำการทดสอบแบบเส้นใย ทำที่ Okinawa ซึ่งอยู่ทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่น มีอุณหภูมิ $30^{\circ}C$ ส่วนสถานที่ที่ทำการทดสอบแบบแผ่น ทำที่ Aomori ทางตอนเหนือของประเทศญี่ปุ่น มีอุณหภูมิอยู่ที่ $20^{\circ}C$ ดังนั้นหากใช้ตัวดูดจับแบบเส้นใยในทะเลประเทศไทย ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่าทะเลในประเทศไทย ควรจะทำให้สามารถดูดจับยูเรเนียมจากน้ำทะเลได้ดียิ่งขึ้นด้วย



รูปที่ 6 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้และตัวอย่างเค้กเหลืองที่สกัดได้ [10]

ได้มีการสรุปว่าต้นทุนการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้เส้นใยนี้ จะสูงกว่าราคา Spot price ของยูเรเนียมที่ \$73/lb-U₃O₈ (ข้อมูลวันที่ 11 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2011) เพียงแค่ประมาณ 30% เท่านั้น 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-U₃O₈.” [11]

จนถึงปัจจุบัน งานวิจัยโดย Hara et al. [12] เป็นงานวิจัยชิ้นเดียวที่ได้มีการศึกษาสังเคราะห์ Amidoxime polymer gel และศึกษาการดูดจับยูเรเนียมในน้ำทะเล 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 ทำการจุ่มแช่เจลในตัวอย่างน้ำทะเลที่เพิ่มปริมาณยูเรเนียมเป็น 4 ppb เป็นเวลา 3 วัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเจลสามารถดูดจับยูเรเนียมได้ในสัดส่วนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นในน้ำทะเลที่ต่ำ

ที่สุด และประมาณครึ่งหนึ่งของยูเรเนียมถูกดูดซับโดยเจลที่อัตราส่วน AM:AN ที่ 4:3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Amidoxime polymer gel สามารถดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ ได้เป็นอย่างดี

การศึกษาวิจัยของนักวิจัยกลุ่มอื่นๆ ทั้งหมด มุ่งเน้นไปที่การกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีดออกซิมบน Substrate ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ตารางที่ 4 แสดงผลการศึกษาดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยกลุ่มนักวิจัยต่างๆ โดยระบุตัวดูดซับที่ใช้ ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา อุณหภูมิและปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยกลุ่มนักวิจัยต่างๆ

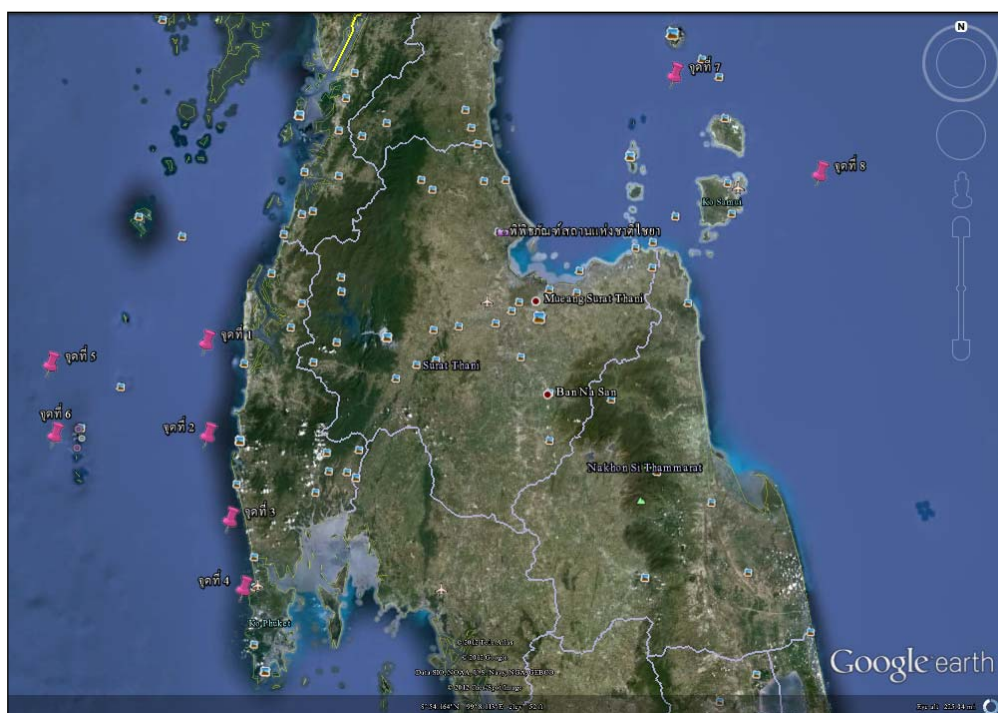
เอกสารอ้างอิง	ตัวดูดซับที่ใช้และโครงสร้าง	ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา	อุณหภูมิ [°C]	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด [mg/g]
13	Silica particles grafted with polyacrylonitrile and subsequent conversion to amidoxime group	2,000 mg/L in Milli-Q water [Uranium acetate, $UO_2(CH_3COO)_2$]	25	442.3
14	Amidoxime-functionalized superparamagnetic polymer microspheres	170 mg/L at pH 4.5	25	200.5
4	Macroporous fibrous polymeric adsorbent containing amidoxime chelating functional group (MFPA)	4.17×10^{-4} mol/dm ³ at pH 8.0	25	44.0
15	Multiwalled carbon nanotubes grafted with amidoxime using plasma techniques	150 mg-U/L at pH 4.5	25	145
16	Polyacrylonitrile/palygorskite composite chemically modified with amidoxime groups	50 mg-U/L at pH 5	30	78.13
17	Amidoximated chitosan-grafted polyacrylonitrile	70 mg/L at pH 7	Room temp.	312.06
6	Amidoximated electron-beam-grafted polypropylene membranes	9.54 mg/L (U-233 spiked seawater)	Not specified	0.38

เอกสารอ้างอิง	ตัวดูดซับที่ใช้และโครงสร้าง	ความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลที่ใช้ศึกษา	อุณหภูมิ [°C]	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้สูงสุด [mg/g]
18	Microporous polyethylene hollow fiber grafted with acrylonitrile and subsequent conversion to amidoxime	Pumped water, 3% NaCl solution, 0.01 M CaCl ₂ and 0.05 M MgCl ₂ solutions and natural seawater from a feed tank through fibers.	30	Not reported
19	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
20	Amidoximated ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibrous adsorbent	Flowed simulated seawater through the adsorption column at the rate of 25 ± 2 mL/min. The pH value was controlled to 8.1 ± 0.3. Uranium concentration in simulated seawater was 3.6 ppb.	25 ± 1	1.97 mg-U/g after 42 days
21	Amidoxime functional group grafted onto porous polyethylene fibers	Filtered (0.45 µm) natural seawater with 2 flow rates (250 and 500 mL/min) using electrical pumping systems.	20 ± 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 ในทุกบริเวณของทะเลอ่าวไทยและอันดามันที่ทำการศึกษารวมถึงบริเวณที่ผิวน้ำและบริเวณที่ลึกถึง 100 และ 150 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

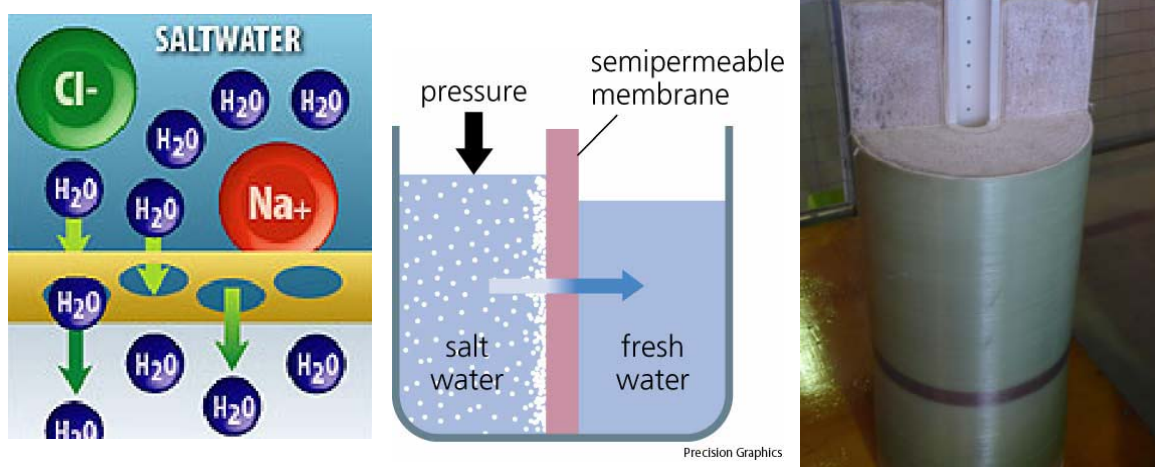


รูปที่ 7 ตำแหน่งที่ทำการศึกษเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและวางตัวดูดจับยูเรเนียมในโครงการศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย

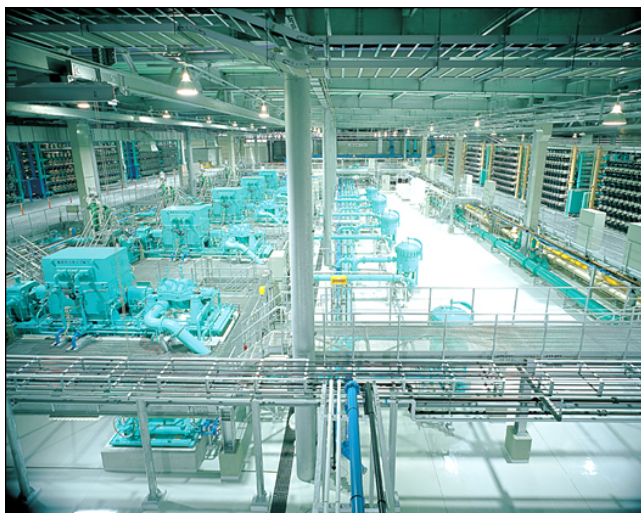
4. Amidoxime fiber เหมาะสมในการนำมาดูดจับยูเรเนียมจากน้ำทะเล เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดูดจับที่สูงที่ pH ของน้ำทะเลที่ประมาณ 8 และมี Selectivity ที่สูงมากสำหรับยูเรเนียม
5. ประสิทธิภาพการดูดจับยูเรเนียมของ Amidoxime fiber จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิของน้ำทะเล
6. การจุ่มแช่ตัวดูดจับยูเรเนียมที่ความลึก 30 เมตร จะทำให้สามารถดูดจับยูเรเนียมได้ไวกว่าที่ชายฝั่งมาก เนื่องจากที่ความลึก 30 เมตร จะมีการไหลของกระแสน้ำในทุกทิศทาง ทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง ซึ่งจะพัดพาเอายูเรเนียมใหม่มาตลอดเวลา ส่วนที่ชายฝั่งจะมีการเคลื่อนไหวถ่ายเทของน้ำในแนวราบเท่านั้น และน้ำทะเลใหม่จะเข้ามาทับคลื่นในแนวขนานกับชายฝั่งเป็นหลักเท่านั้น

7. สามารถวางตัวดูดซับบริเวณที่ไม่สึกจนเกินไปได้ เพราะน้ำจะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำที่ลึกและอยู่ไกลออกไป ซึ่งจะทำให้ได้ความเร็วในการดูดซับที่สูงและจะไม่มีคามยุ่งยากรวมถึงไม่เกิดความเสียหายในการปฏิบัติงานบริเวณทะเลน้ำลึกที่อยู่ไกลออกไปจากชายฝั่งมาก นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการเดินทางในทะเลที่น้อยกว่าด้วย
8. เนื่องจากน้ำทะเลที่ขุ่น จะทำให้มีตะกอนมาเกาะติดบนตัวดูดซับและจะขัดขวางการดูดซับยูเรเนียมจากน้ำทะเล ดังนั้นต้องทำการดูดซับยูเรเนียมในบริเวณน้ำทะเลที่ใส โดยแนะนำบริเวณทะเลอันดามันเพราะน้ำทะเลใสกว่าที่อ่าวไทย
9. สามารถใช้ตัวดูดซับซ้ำได้หลายครั้งมาก โดยประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมจะลดลงเหลือประมาณ 50% หลังผ่านการใช้งานประมาณ 14 ครั้ง ซึ่งการที่สามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งนี้จะช่วยลดต้นทุนในการสกัดในเชิงพาณิชย์

ได้มีการใช้ระบบ Seawater Reverse Osmosis (RO) ในการนำน้ำทะเลมาผลิตเป็นน้ำจืด ซึ่งหลักการทำงานในภาพรวมคือ อัดน้ำทะเลภายใต้ความดันสูงที่เหมาะสมผ่านตัวกรอง Membrane ที่ออกแบบให้กรองโดยไม่ให้โมเลกุลและไอออนขนาดใหญ่ผ่านไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 8 ส่วนรูปที่ 9 แสดงโรงงาน Desalination plant ในต่างประเทศ



รูปที่ 8 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 9 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 ซึ่งในต่างประเทศตามกฎหมายจะต้องกระจายทิ้งเหมือนการทำให้เจือจางเสียก่อน เพราะหากปล่อยลงสู่ทะเลโดยตรง น้ำที่มีความเค็มเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตรอบๆ จุดปล่อยได้ ส่วนประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายในเรื่องนี้ที่ชัดเจน

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

กิจการประปาเกาะสมุยถือได้ว่าเป็นกิจการที่ผลิตน้ำประปาจากน้ำทะเลเป็นรายใหญ่ที่สุดของประเทศไทย 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 ได้รายละเอียดว่าไม่มีการเทตะกอนใดๆ มารวมในถัง Brine tank ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (เนื่องจากตะกอนที่ได้จากการกรองและบำบัดน้ำทะเลก่อนเข้าระบบ จะจับกับผิวของตัวดูดซับยูเรเนียม ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงมาก) ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษาการสกัดยูเรเนียมจาก Brine concentrate ที่โรงงาน Seawater reverse osmosis plant นี้ ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยในเฟสที่สองของงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิงในลำดับที่ 22 ได้สรุปผลการศึกษาวิจัยในต่างประเทศเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดยูเรเนียมจาก Brine concentration ที่ปลดปล่อยจากระบบ Integrated nuclear desalination system ซึ่งงานวิจัยนี้กำลังอยู่ระหว่างการศึกษาวิจัยและพัฒนาในเบื้องต้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้ในการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับเจลเอมีดอวกซิมประสิทธิภาพสูง เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

เนื้อเรื่อง

ในเฟสแรกของงานวิจัยเรื่อง การสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลโดยใช้ตัวดูดซับประสิทธิภาพสูงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ เพื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับยูเรเนียมประสิทธิภาพสูงในน้ำทะเล

1. สัดส่วนของมอนอเมอร์และสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์
2. ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C)
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C)

จากนั้นนำตัวดูดซับที่ได้สังเคราะห์ขึ้นไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลตัวอย่างในห้องปฏิบัติการวิจัยที่ได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมเป็น 10 ppm เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และนำไปสกัดเอายูเรเนียมออกด้วยวิธีการ Elution สุดท้ายนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ดูดซับได้โดยใช้เทคนิค ICP-OES อีกทั้งมีการวิเคราะห์ Characteristic band ของหมู่ฟังก์ชัน Cyano และ Amidoxime เพื่อยืนยันว่าเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ได้อย่างแท้จริง โดยรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

1. สารเคมีและอุปกรณ์

- Acrylonitrile (AN)
- Methacrylic acid (MAA)
- Dimethyl sulfoxide (DMSO)
- N,N'- Methylenebisacrylamide (crosslinking agent)
- Hydrogen peroxide (H₂O₂)
- N,N -dimethylformamide (DMF)
- Hydroxylamine hydrochloride (NH₂OH·HCl)
- Methanol (CH₃OH)
- Potassium hydroxide (KOH)
- Hydrochloric acid (HCl)

- Nitric acid (HNO₃)
- Deionized water (DI water)
- Seawater sample
- Tricarbonate uranyl solution
- Plastic container
- UV-C lamp
- Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)
- Inductively Coupled Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

2. พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

ในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษามอนอเมอร์เพื่อใช้สังเคราะห์เป็นตัวดูดซับยูเรเนียม ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ใช้สารประกอบอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไซยาโน (Cyano group) แต่เพราะอะคริโลไนไตรล์เป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้มอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่มีขั้วหรือชอบน้ำมาผสมด้วย เนื่องจากยูเรเนียมละลายอยู่ในน้ำทะเลในรูปสารประกอบ Tricarbonate uranyl anion จึงจำเป็นต้องมีน้ำเป็นตัวนำพาให้อิออนของยูเรเนียมแพร่เข้าไปในเจลพอลิเมอร์เพื่อให้สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ ซึ่งในที่นี้คือเมทาคริลิกแอซิด (Methacrylic acid) โดยจะทำการผสมมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ จากนั้นศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยง (Crosslink agent) ที่ใช้ ปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ระยะเวลาการฉายและอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยจะทำการสังเคราะห์ศึกษาทั้งหมด 64 ตัวอย่าง ซึ่งช่วงของพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในการสังเคราะห์ตัวดูดซับเป็นดังนี้

- อัตราส่วน AN : MAA = 90:10, 80:20, 70:30, 60:40
- ปริมาณสารเชื่อมโยง (Crosslink agent) (กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์) = 0.25, 0.5, 1, 2
- ปริมาตร H₂O₂ (มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์) = 50, 60, 70, 80
- ระยะเวลาในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) (ชั่วโมง) = 4, 6, 8, 10
- อุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) (°C) = 45, 80

3. การสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์

การสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

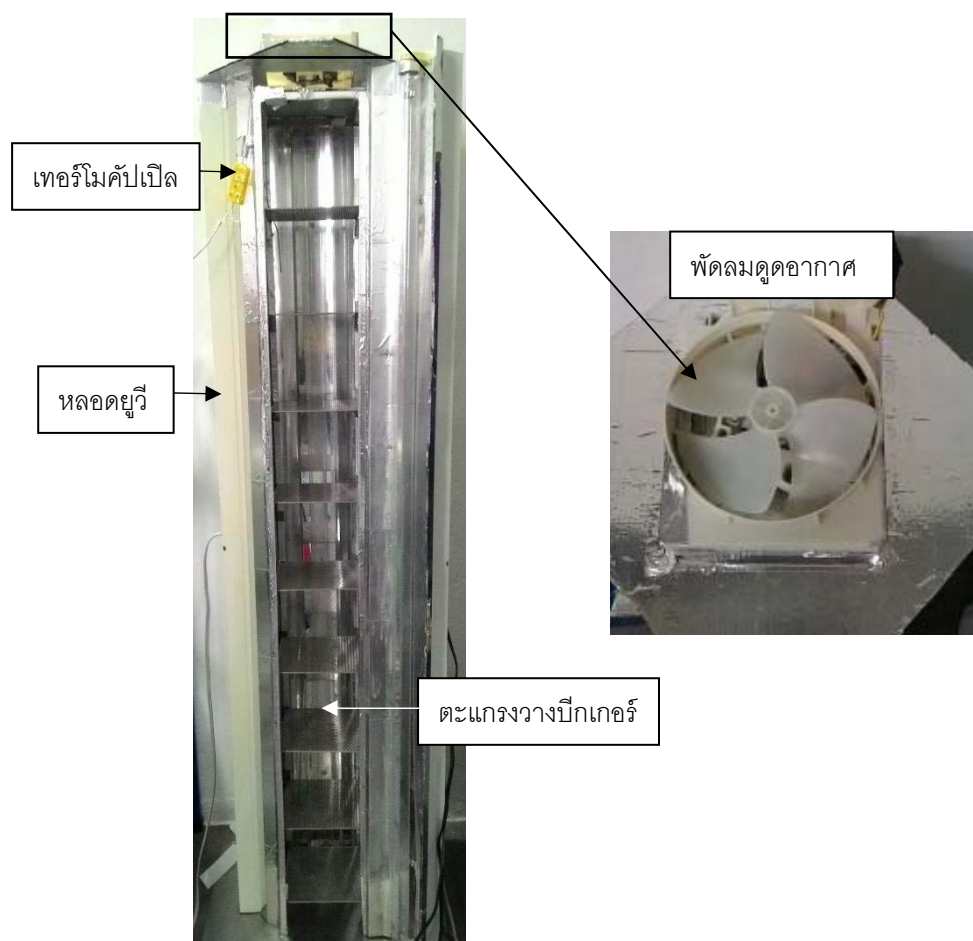
3.1. Irradiation-induced polymerization

เป็นการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ทำลายพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจน (O-H) ของสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ขึ้น และทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายอะครีโลไนไตรล์ ซึ่งผสมอยู่กับสารละลายเมทาคริลิกแอซิด โดยมีสารเมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N,N' – Methylenebisacrylamide) ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยง (Crosslink agent) เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชนขึ้น การเหนี่ยวนำให้เกิดพอลิเมอร์เชนมีขั้นตอนย่อยดังนี้

1. เตรียมสารละลายมอนอเมอร์ประกอบด้วย อะครีโลไนไตรล์ ผสมกับเมทาคริลิกแอซิด โดยใช้ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide) 50 (w/w)% เป็นตัวทำละลายและใส่เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยง จากนั้นคนให้สารเชื่อมโยงละลาย สุดท้ายจึงใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการเตรียมมอนอเมอร์จะใส่สารต่างๆ ในปริมาณและอัตราส่วนตามที่ได้แสดงไว้แล้ว และนำมอนอเมอร์ที่เตรียมไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ดังแสดงในรูปที่ 10
2. นำสารละลายมอนอเมอร์ที่ผสมแล้วมาฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเครื่องมือฉายรังสีแสดงในรูปที่ 11 โดยเครื่องมือฉายรังสีจะประกอบด้วยชั้นโครงเหล็กที่มีตะแกรง 9 ชั้นไว้สำหรับวางปีกเกอร์ ประกอบด้วยคอมพลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตทั้งสี่ด้าน ปิดผนึกช่องว่างต่างๆ ด้วยเทปกาวอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันไม่ให้แสงสว่างจากภายนอกเข้ามารบกวน และยังเป็น การช่วยสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตกลับเข้าไประบบอีกด้วย ส่วนคอมพลอดยูวีด้านหน้าจะสามารถเปิดออกได้เมื่อต้องการบรรจุตัวอย่างและเมื่อจะทำการฉายรังสีจะผนึกด้วยเทปกาวอะลูมิเนียมเพื่อให้เป็นระบบปิด ส่วนด้านบนของชั้นสแตนเลสทำการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ เพื่อดูดความร้อนที่จะสะสมจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ให้ภายในระบบร้อนจนเกินไป รวมทั้งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ด้านในเพื่อวัดอุณหภูมิขณะฉายรังสียูวี เมื่อฉายรังสียูวีแล้วสารละลายมอนอเมอร์จะเกิดเป็นเจลพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งเจลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันตามแต่ละพารามิเตอร์ โดยจะสรุปไว้ในหัวข้อที่ 4 ผลการดำเนินงาน



รูปที่ 10 ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่เตรียมสำหรับนำไปฉายรังสี UV-C



รูปที่ 11 เครื่องมือสำหรับฉายรังสี UV-C



รูปที่ 12 ตัวอย่างเจลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นหลังฉายรังสียูวี

3. บดเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดเล็กเพื่อให้มีพื้นผิวสัมผัสกับน้ำทะเลที่สูง จากนั้นล้างโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ออกโดยแช่ในสารละลายไดเมทิลฟอร์มามิเด (N,N-dimethylformamide) ที่งัวไว้ 24 ชั่วโมง และล้างสารละลายไดเมทิลฟอร์มามิเดด้วย DI water : Methanol 50 (w/w)%
4. อบเจลพอลิเมอร์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักบันทึกค่าเป็น W_1
5. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันไซยาโน (Cyano) บนเจลพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

3.2. Amidoximation

เป็นการใช้กระบวนการทางเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันเอมีตอกซิมในเจลพอลิเมอร์ โดยมีขั้นตอนย่อยดังนี้

1. นำเจลพอลิเมอร์แช่ในสารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride) ที่มีความเข้มข้น 3 (w/v)% และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7 ซึ่งปรับ

ค่าโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ที่มีความเข้มข้น 20 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 73 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกเจลพอลิเมอร์หลังขั้นตอน Amidoximation นี้ว่าเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจล

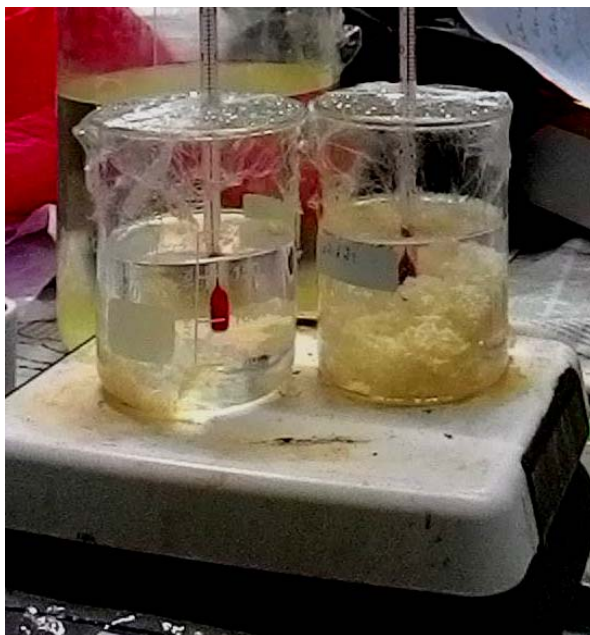
2. ล้างเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water : Methanol 50 (w/w)% จากนั้นนำเข้าอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. จุ่มเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลในสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 14
4. ล้างเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water และนำเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ชั่งน้ำหนักของเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลและบันทึกค่าเป็น W_2
6. คำนวณหาค่า Amidoxime group density จากสมการ (2)

$$\text{Amidoxime group density (mol/kg)} = \frac{W_2 - W_1}{69.5W_2} \times 1000 \quad (2)$$

โดย W_1 คือ น้ำหนักเจลพอลิเมอร์ก่อนขั้นตอน Amidoximation

W_2 คือ น้ำหนักเจลพอลิเมอร์หลังขั้นตอน Amidoximation

7. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิม (Amidoxime functional group) บนผิวเจลพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)



รูปที่ 13 ขั้นตอนการแช่เจลพอลิเมอร์ในสารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์



รูปที่ 14 ขั้นตอนการแช่เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลในกรดไฮโดรคลอริก

3.3. Alkaline Treatment

เป็นขั้นตอนการทำให้เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลมีความเป็นด่างพร้อมสำหรับนำไปดักจับยูเรเนียมในน้ำทะเล ซึ่งมีขั้นตอนย่อยดังนี้

1. นำเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.5 (w/v)% อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. ล้างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลด้วย DI water จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 9 จากนั้นนำเข้าสู่ตูบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ตัวดูดซับที่พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตัวอย่างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลที่พร้อมนำไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

3.4. การนำเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลไปดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเล

เมื่อได้ทำการสังเคราะห์เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลเสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นจึงนำเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลแต่ละตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 0.15 - 0.2 กรัม และนำไปใส่ในผ้าขาวบางที่มีความถี่หนาพอสมควรที่จะไม่ให้เอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลสามารถหลุดรอดออกจากผ้าขาวบางไปได้ จากนั้นมัดผ้าขาวบางด้วยหนังยางให้แน่นดังรูปที่ 16 เมื่อเตรียมตัวอย่างใส่ในผ้าขาวบางแล้ว จึงนำตัวอย่างที่เตรียมใส่ในถุงตาข่ายขนาดใหญ่ดังรูปที่ 17 เพื่อเตรียมนำไปจุ่มแช่ในถังบรรจุน้ำทะเลขนาด 64 ลิตร ซึ่งทำการเติมยูเรเนียมในน้ำทะเลให้มีความเข้มข้นประมาณ 10 ppm เพื่อให้เพียงพอสำหรับการดูดซับในแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 16 ตัวอย่างเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลที่ห่อด้วยผ้าขาวบาง



รูปที่ 17 ตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมใส่ในถุงตาข่ายเพื่อเตรียมลงจุ่มแช่ในถังบรรจุน้ำทะเล

จุ่มแช่ตัวดูดซับยูเรเนียมในถังบรรจุน้ำทะเลดังรูปที่ 18 และทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำทะเลผ่านตัวดูดซับตลอดเวลาด้วยการวางปั้มน้ำตู้ปลาที่ด้านล่างของถังนี้ โดยทำการโพล์ร่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีก่อนจุ่มแช่ตัวดูดซับเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจลเพื่อให้มั่นใจว่าสารละลายยูเรเนียมที่ใส่เพิ่มได้ละลายไปในน้ำทะเลทั้งหมด โดยขั้นตอนทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น (การจุ่มแช่ตัวดูดซับในทะเลจริงจะดำเนินการในเฟสต่อไปของงานวิจัย)



รูปที่ 18 ถังบรรจุน้ำทะเลที่ใช้ในการจุ่มแช่ตัวดูดซับยูเรเนียมในห้องปฏิบัติการวิจัย

3.5. การสกัดยูเรเนียมออกจากเอมีตอกซิมพอลิเมอร์เจล

หลังจากจุ่มแช่ตัวอย่างในถังจนครบกำหนด 1 สัปดาห์แล้วจึงเก็บตัวอย่างทั้งหมดขึ้นมาแช่ในน้ำ DI water เป็นเวลา 3 วันเพื่อล้างเกลือและยูเรเนียมที่ติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับออก จากนั้นนำไปอบให้แห้ง

ทำการ Elution โดยแช่ตัวดูดซับที่อบให้แห้งแล้วในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงดังรูปที่ 19 เมื่อครบเวลาแล้วนำตัวดูดซับออก และต้มสารละลายไฮโดรคลอริกให้เดือดช้าๆ จนกระทั่งสารละลายแห้งเหลือแต่ผงธาตุที่ดูดซับได้สีเหลืองที่ติดอยู่ด้านล่างของบีกเกอร์ดังรูปที่ 20

จากนั้นเจือจางผงที่ได้จากกระบวนการ Elution ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 1 % และนำสารละลายกรดไนตริกดังกล่าวไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของยูเรเนียมโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)



รูปที่ 19 การแช่ตัวตุดจับในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์





รูปที่ 20 ผงธาตุที่ตุดจับได้สีเหลืองที่แห้งติดอยู่ด้านล่างของบีกเกอร์



4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1. ผลของระยะเวลาการฉายรังสีและอุณหภูมิที่ใช้ฉายรังสี



หลังนำสารละลายพอลิเมอร์ไปฉายรังสี UV-C ที่ระยะเวลาและที่อุณหภูมิต่างๆ แล้ว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 ผลของระยะเวลาการฉายรังสี UV-C

ระยะเวลาการฉายรังสี (ชั่วโมง)	ตัวอย่างเจลที่เกิดขึ้น
4	
6	

ระยะเวลาการฉายรังสี (ชั่วโมง)	ตัวอย่างเจลที่เกิดขึ้น
8	
10	

ตารางที่ 6 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ฉายรังสี UV-C

อุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสี (°C)	ตัวอย่างเจลที่เกิดขึ้น
45	
80	

จากตารางที่ 5 เมื่อฉายรังสีที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง เจลพอลิเมอร์ที่ได้ยังเป็นของเหลวอยู่เป็นส่วนใหญ่ โดยเปลี่ยนเป็นเจลพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งประมาณ 60% ส่วนที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง มอนอเมอร์กลายเป็นของแข็งเกือบทั้งหมดที่ประมาณ 90% แต่ก็ยังมีบางส่วนที่อยู่กันปึกเกอร์ที่ยังเป็นของเหลว และมีฟองก๊าซเกิดขึ้นด้วย ส่วนที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเจลที่เกิดขึ้นเป็นของแข็ง 100% เจลที่ได้มีลักษณะอ่อนนุ่ม แต่ยังสามารถนำไปดัดให้เป็นอนุภาคเล็กๆ และนำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ ส่วนที่ระยะเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าเจลที่เกิดขึ้นเป็นของแข็ง 100% เช่นเดียวกัน แต่ในทางกลับกันเจลที่ได้มีลักษณะแข็งมากเกินไป ไม่สามารถดัดหรือนำไปดัดให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ ดังนั้นระยะเวลาในการฉายรังสีที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้เกิดเป็นเจลที่มีความสมบูรณ์สามารถนำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ คือ 8 ชั่วโมง

จากตารางที่ 6 เมื่อทดสอบอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสี คือ 45 °C และ 80 °C พบว่า ที่อุณหภูมิ 45 °C เจลที่ได้มีลักษณะเป็นของแข็ง 100% มีความอ่อนนุ่ม ไม่แข็งจนเกินไป สามารถนำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ ส่วนที่อุณหภูมิ 80 °C พบว่าเป็นอุณหภูมิที่สูงทำให้ AN ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 °C ระเหยและเดือดกลายเป็นไอ อีกทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็น Initiator ของการเกิดพอลิเมอร์ เมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงก็สามารถระเหยได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อฉายรังสีที่อุณหภูมิ 80 °C พบว่าสารละลายมอนอเมอร์ไม่กลายเป็นของแข็ง ยังคงเป็นของเหลวอยู่ ซึ่งอาจเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีการระเหยออกไปจึงเหลือในปิกเกอร์อยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้สารละลายไม่เกิดเป็นเจลพอลิเมอร์ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีที่เหมาะสมคือ 45 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิในเครื่องระหว่างฉายรังสี ไม่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมเพื่อลดอุณหภูมิหรือเพิ่มอุณหภูมิ

4.2. ลักษณะเจลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นหลังฉายรังสี

หลังนำสารละลายมอนอเมอร์ไปฉายรังสียูวีแล้ว สารละลายจะกลายเป็นเจลพอลิเมอร์ของแข็งที่มีลักษณะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยเจลที่เกิดขึ้นจากพารามิเตอร์อัตราส่วน AN : MAA ที่ 70:30 และ 60:40 ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.25 กรัมและปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทั้ง 50, 60, 70 และ 80 มิลลิลิตร มีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวยืดคล้ายน้ำผึ้งและไม่รวมตัวกันเป็นของแข็ง ทำให้นำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไปไม่ได้ ดังนั้นเจลที่สามารถนำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ จึงเหลือแค่ 56 ตัวอย่าง จากทั้งสิ้น 64 ตัวอย่าง

ตารางที่ 7 ลักษณะของเจลพอลิเมอร์หลังนำไปฉายรังสียูวี

พารามิเตอร์			ลักษณะเจลที่เกิดขึ้น
อัตราส่วน AN : MAA	ปริมาณสาร เชื่อมโยง (กรัม)	ปริมาตร H ₂ O ₂ (มิลลิลิตร)	
90:10	0.25	50, 60, 70, 80	เจลมีความอ่อนนุ่มมาก และมีสีขาว
	0.5	50, 60, 70, 80	
	1	50, 60, 70, 80	
	2	50, 60, 70, 80	
80:20	0.25	50, 60, 70, 80	เจลมีความอ่อนนุ่มเล็กน้อย และมีสีขาว
	0.5	50, 60, 70, 80	
	1	50, 60, 70, 80	
	2	50, 60, 70, 80	
70:30	0.25*	50, 60, 70, 80	เจลหนืด ลักษณะคล้ายน้ำผึ้งใส
	1	50	เจลแข็ง สีใส
		60	เจลแข็ง สีใสและขาวขุ่นเล็กน้อย
		70	เจลแข็ง สีใสและขาวขุ่นมาก
		80	เจลแข็ง สีขาวขุ่น
	2	50	เจลแข็ง สีใส
		60	เจลแข็ง สีใสและขาวขุ่นเล็กน้อย
		70	เจลแข็ง สีใสและขาวขุ่นมาก
80		เจลแข็ง สีขาวขุ่น	
60:40	0.25*	50, 60, 70, 80	เจลหนืด ลักษณะคล้ายน้ำผึ้งใส
	0.5	50, 60, 70, 80	เจลแข็ง สีใส
	1	50, 60, 70, 80	เจลแข็งมาก สีขาวและเหลือง
	2	50, 60, 70, 80	เจลแข็งมาก สีขาวและเหลือง

หมายเหตุ:

* หมายถึง ไม่ทำการทดลองต่อ เนื่องจากเจลที่ได้มีลักษณะหนืดเกินไป และไม่สามารถบดให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ได้

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าเจลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นหลังนำสารละลายมอนอเมอร์ไปฉายรังสียูวี จะมีลักษณะต่างกันตามแต่ละพารามิเตอร์ที่ศึกษา เช่น อัตราส่วน AN : MAA ที่ 90:10 และ 80:20 เจลพอลิเมอร์ที่

ได้จะค่อนข้างอ่อนนุ่มและมีสีขาว ที่อัตราส่วน 70:30 และ 60:40 เจลพอลิเมอร์ที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างแข็ง แต่ยังสามารถนำมาบดให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่มีอัตราส่วนเมทาคริลิกแอซิดเพิ่มขึ้นจะทำให้เจลแข็งมากขึ้น นอกจากนี้สีของเจลที่ได้จะมีสีใส สีขาว หรือสีเหลือง แล้วแต่ละพารามิเตอร์การทดลอง

4.3. Amidoxime group density

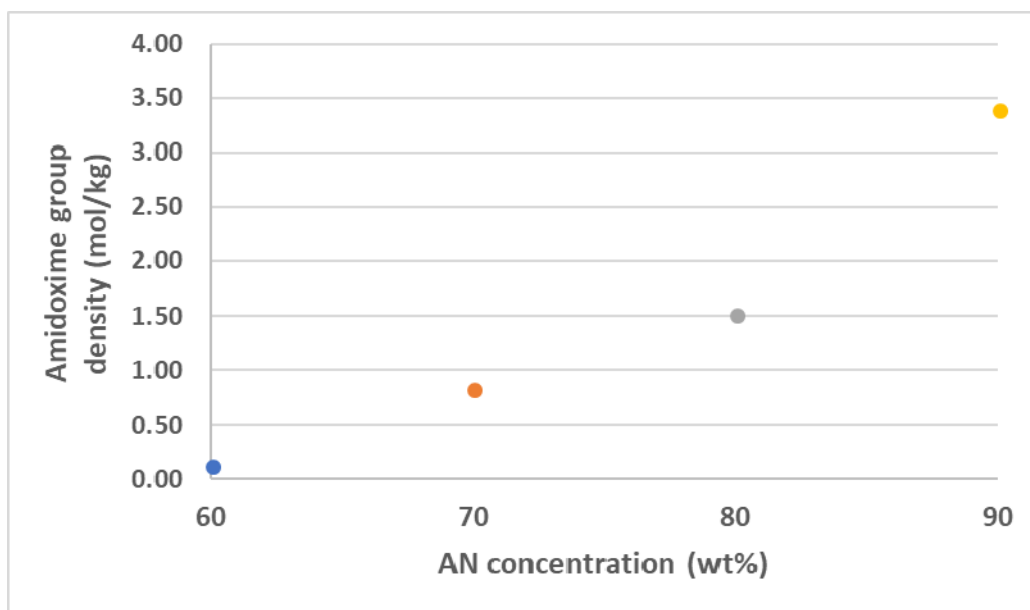
เมื่อนำเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์แล้วมาทำการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันจากหมู่ไซยาโนให้กลายเป็นหมู่เอมีดอกซิม โดยใช้สารละลายไฮดรอกซิลมีน ไฮโดรคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 3 (w/v)% จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมสำหรับแต่ละพารามิเตอร์ของการทดลองดังนี้

4.3.1. ผลของสัดส่วนขององค์ประกอบมอนอเมอร์ต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม

สัดส่วนของมอนอเมอร์ที่ทำการศึกษาต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม คือสัดส่วน อะครีโลไนไตรล์ : เมทาคริลิกแอซิด ดังนี้ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์

ตารางที่ 8 ความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมของแต่ละสัดส่วนมอนอเมอร์

สัดส่วน AN:MAA (Crosslink agent 1 g/100 mL monomer, H ₂ O ₂ 50 mL/100 mL monomer)	W ₁ (g)	W ₂ (g)	Amidoxime group density (mol/kg)
90:10	4.312	5.647	3.402
80:20	5.605	6.267	1.522
70:30	3.833	4.068	0.832
60:40	3.509	3.541	0.130



รูปที่ 21 ผลของสัดส่วนขององค์ประกอบมอนอเมอร์ต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม (Crosslink agent 1 g/100 mL monomer, H₂O₂ 50 mL/100 mL monomer)

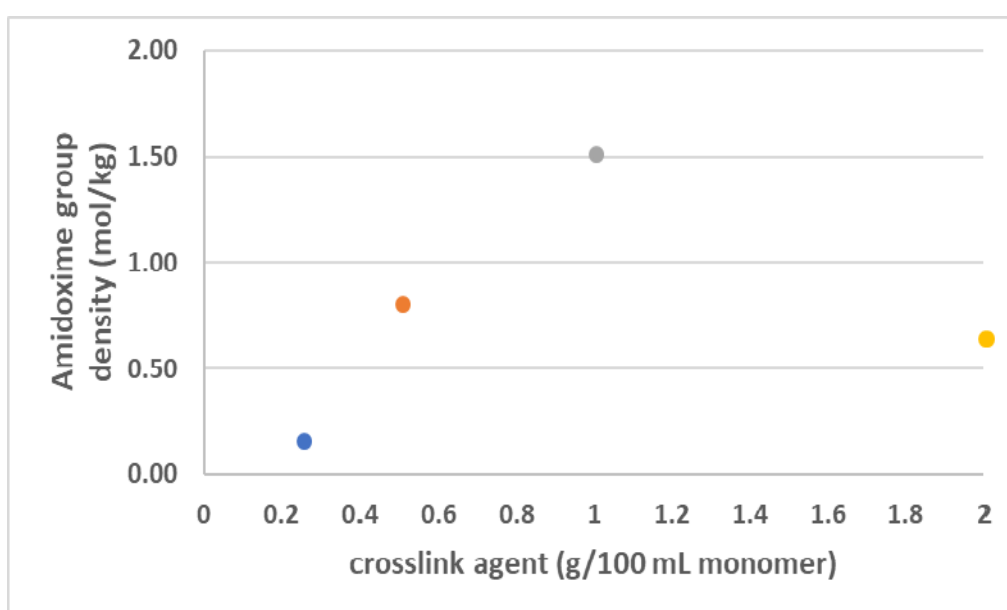
จากตารางที่ 8 และรูปที่ 21 พบว่าสัดส่วนของอะครีโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิดที่ 90:10 จะให้ค่าความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมสูงที่สุด คือ 3.402 mol/kg และเมื่อสัดส่วนของอะครีโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด ลดลงก็ส่งผลให้ความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมลดลงตามลำดับเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า หากมีสัดส่วนของอะครีโลไนไตรล์มากขึ้นในสารละลายมอนอเมอร์ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมมากขึ้นด้วย

4.3.2. ผลของปริมาณสารเชื่อมโยงต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม

ปริมาณสารเชื่อมโยงที่ทำการศึกษาต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม คือ 0.25, 0.5, 1 และ 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยเปรียบเทียบที่สัดส่วนของมอนอเมอร์ AN:MAA ที่ 80:20 และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์

ตารางที่ 9 ความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมของแต่ละปริมาณสารเชื่อมโยง

ปริมาณสารเชื่อมโยง (g) (AN:MAA 80:20, H ₂ O ₂ 50 mL/100 mL monomer)	W ₁ (g)	W ₂ (g)	Amidoxime group density (mol/kg)
0.25	9.385	9.497	0.170
0.5	2.427	2.574	0.820
1	5.604	6.267	1.522
2	4.557	4.774	0.655



รูปที่ 22 ผลของปริมาณสารเชื่อมโยงต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม
(AN:MAA 80:20, H₂O₂ 50 mL/100 mL monomer)

จากตารางที่ 9 และรูปที่ 22 พบว่าปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ 1 กรัม/100 มิลลิตร มอนอเมอร์ จะมีความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมสูงที่สุด คือ 1.522 mol/kg โดยความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมโยงที่มากขึ้น แต่ที่ปริมาณ 2 กรัม/100 มิลลิตร มอนอเมอร์ กลับพบว่าความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมลดลง สาเหตุอาจเนื่องมาจากการที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงมากเกินไป ทำให้เกิดโครงร่างแหสามมิติของพอลิเมอร์ที่หนาแน่นและขาดความยืดหยุ่น ส่งผลให้สารละลายต่างๆ ผ่านเข้าไปภายในเจลพอลิเมอร์ได้ยาก ทำให้หมู่ไซยาโนถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีดอกซิมได้น้อย ซึ่งหากนำเจลพอลิเมอร์เหล่านี้ไปดูดจับ

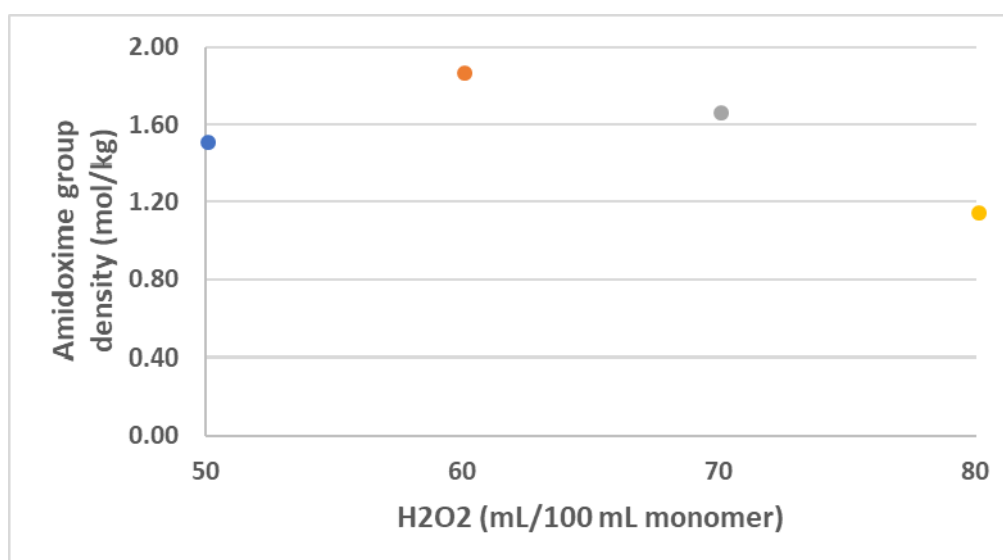
ยูเรเนียมในน้ำทะเล คาดว่าจะดูดจับได้น้อยเช่นกันเนื่องจากน้ำทะเลจะแพร่เข้าไปภายในอนุภาคเจลได้ยากด้วยเช่นกัน

4.3.3. ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำการศึกษาต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม คือ 50, 60, 70 และ 80 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยเปรียบเทียบที่สัดส่วนของมอนอเมอร์ AN:MAA ที่ 80:20 และปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์

ตารางที่ 10 ความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมของแต่ละปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

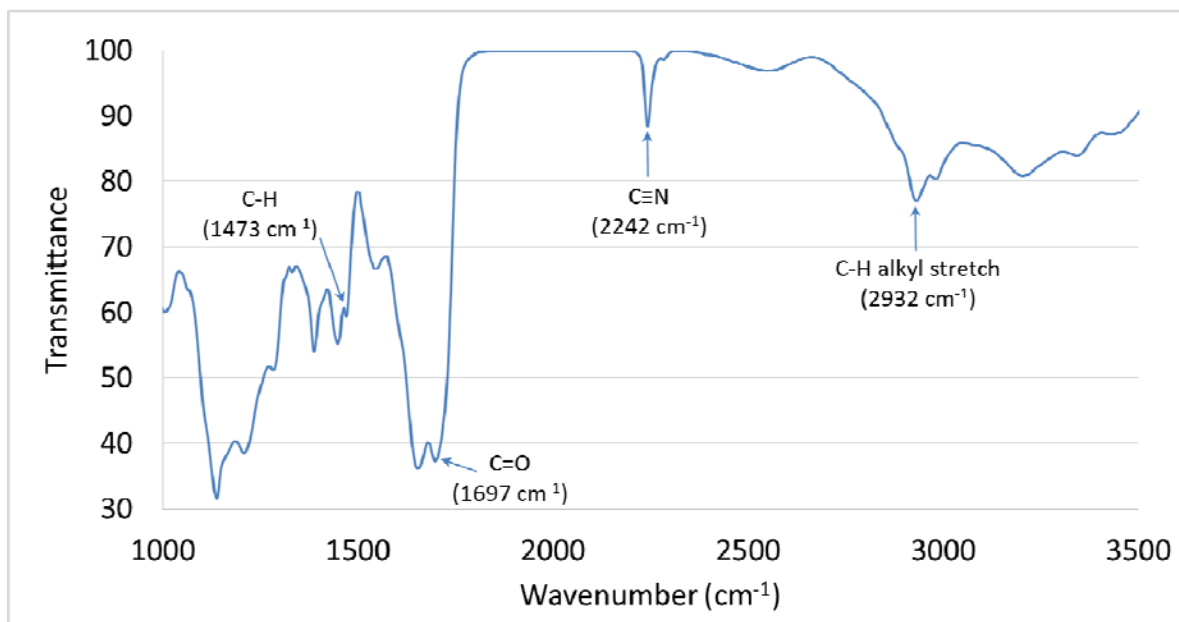
ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL) (AN:MAA 80:20, Crosslink agent 1 g/100 mL monomer)	W ₁ (g)	W ₂ (g)	Amidoxime group density (mol/kg)
50	5.604	6.267	1.522
60	5.126	5.896	1.879
70	8.322	9.417	1.673
80	7.037	7.6532	1.158



รูปที่ 23 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิม
(AN:MAA 80:20, Crosslink agent 1 g/100 mL monomer)

จากตารางที่ 10 และรูปที่ 23 พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ จะมีความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมบนเจลพอลิเมอร์สูงสุด คือ 1.879 mol/kg แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นกลับพบว่าความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมบนเจลพอลิเมอร์มีค่าลดลง (และเมื่อนำไปทดสอบการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลในขั้นตอนต่อไป พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ มีปริมาณการดูดซับยูเรเนียมสูงสุดด้วย) ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำไปฉายรังสียูวี จะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระมากเกินไป ซึ่งจะไปทำลายพันธะของเจลพอลิเมอร์และของหมู่เอมีดอกซิม ความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมจึงลดลง นอกจากนี้การที่มีปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป จะส่งผลให้ความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงและมอนอเมอร์ลดลงด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาแน่นของหมู่เอมีดอกซิมลดลงเช่นกัน

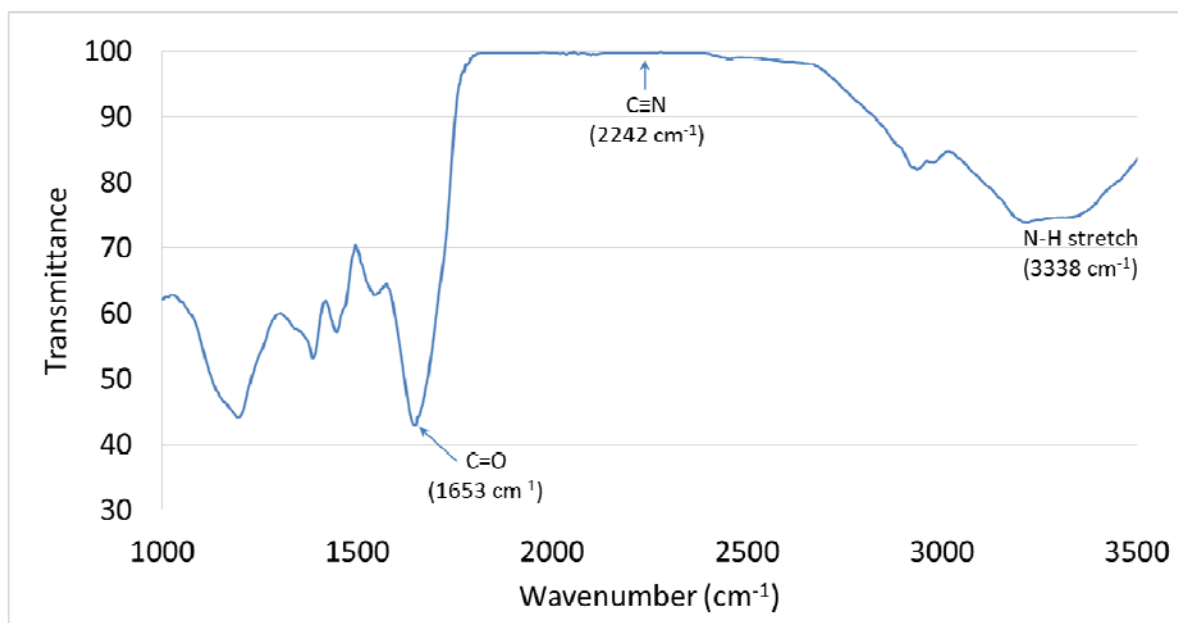
4.4. ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมบนผิวเอมีดอกซิมเจลโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)



รูปที่ 24 สเปกตรัมโดยเทคนิค FTIR ของเจลพอลิเมอร์

จากรูปที่ 24 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันของเจลพอลิเมอร์ก่อนขั้นตอน Amidoximation ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ปรากฏแถบดูดกลืน C-H alkyl stretch ที่เลขคลื่น 2932 cm^{-1} และ C-H ที่เลขคลื่น 1473

cm^{-1} นอกจากนี้ยังปรากฏแถบดูดกลืน $\text{C}\equiv\text{N}$ (Nitrile) stretch ที่เลขคลื่น 2242 cm^{-1} และแถบดูดกลืน $\text{C}=\text{O}$ ที่เลขคลื่น 1697 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดหมู่ไซยาโน



รูปที่ 25 สเปกตรัมโดยเทคนิค FTIR ของเอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจล

จากรูปที่ 25 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันของเจลพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR หลังขั้นตอน Amidoximation ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากหมู่ฟังก์ชันไซยาโนเป็นหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิม พบแถบดูดกลืนของ N-H stretch ที่เลขคลื่น 3338 cm^{-1} และแถบดูดกลืน $\text{C}=\text{O}$ ที่เลขคลื่น 1653 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดหมู่เอมีดอกซิม นอกจากนี้ยังพบว่าแถบดูดกลืน $\text{C}\equiv\text{N}$ (Nitrile stretch) ที่เลขคลื่น 2242 cm^{-1} หายไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมู่ไซยาโนทั้งหมด (หรือเกือบทั้งหมด) ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีดอกซิม

4.5. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของแต่ละสัดส่วนมอนอเมอร์

เมื่อนำเจลพอลิเมอร์ไปจุ่มแช่ในน้ำทะเลในห้องปฏิบัติการวิจัยเพื่อให้มีการดูดจับยูเรเนียม พบว่าสีของเจลพอลิเมอร์ก่อนและหลังการดูดจับยูเรเนียมเปลี่ยนไปดังรูปที่ 26 โดยสีก่อนการดูดจับมีสีเหลืองอ่อน แต่หลังจากการดูดจับเปลี่ยนเป็นสีส้มออกแดง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเจลมีการดูดจับยูเรเนียมได้จริง



รูปที่ 26 สีของเจลพอลิเมอร์ก่อนดูดซับยูเรีย (ซ้าย) และหลังดูดซับ (ขวา)

เมื่อนำเจลพอลิเมอร์หลังการดูดซับมาทำการ Elution เพื่อสกัดแยกเอายูเรียออกจากเจลพอลิเมอร์แล้ว จึงนำเอาสารละลายกรดไนตริกที่มียูเรียละลายอยู่ไปวิเคราะห์หาปริมาณยูเรียด้วยเทคนิค ICP-OES

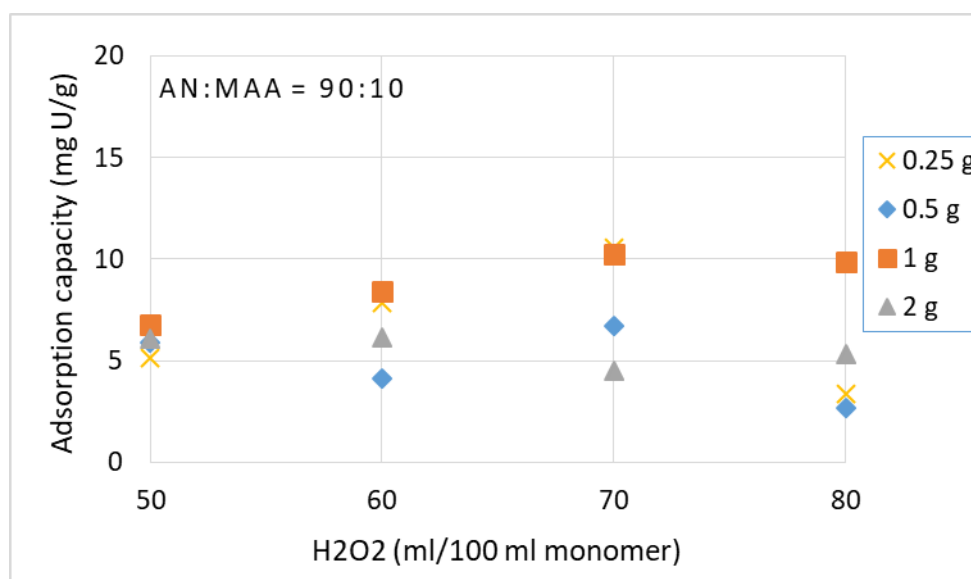
4.5.1. ปริมาณยูเรียที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 90:10

จากการทดลองศึกษาสัดส่วนของมอนอเมอร์ คือสัดส่วน อะคริโลไนไตรล์ : เมทาคริลิกแอซิด ดังนี้ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ผลการดูดซับยูเรียของสัดส่วน 90:10 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ปริมาณยูเรียที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 90:10

ปริมาณสารเชื่อมโยง (g/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรียที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
0.25	50	5.104
	60	7.837
	70	10.579
	80	3.334
0.5	50	5.916
	60	4.092

ปริมาณสารเชื่อมโยง (g/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
	70	6.684
	80	2.645
1	50	6.752
	60	8.387
	70	10.222
	80	9.856
2	50	6.046
	60	6.125
	70	4.511
	80	5.303



รูปที่ 27 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 90:10 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

จากตารางที่ 11 และรูปที่ 27 พบว่าสัดส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ : เมทาคริลิกแอซิด 90:10 ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.25 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 70 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ แสดงการดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุด คือ 10.579 mg U/g adsorbent รองลงมาคือ ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 70 มิลลิลิตร/100

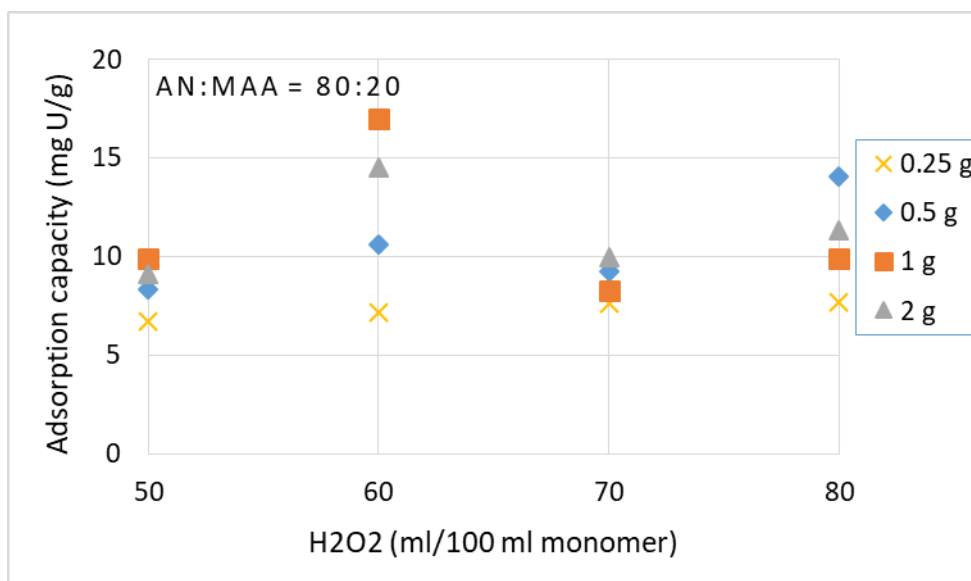
มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยดูดซับยูเรเนียมได้ 10.222 mg U/g adsorbent ซึ่งต่างกันเพียง 0.357 mg U/g adsorbent อย่างไรก็ตามเมื่อมองแนวโน้มของกราฟในภาพรวม จะพบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ มีแนวโน้มที่จะดูดซับยูเรเนียมได้ดีในเกือบทุกปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.5.2. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 80:20

จากการทดลองศึกษาสัดส่วนของมอนอเมอร์ คือสัดส่วน อะคริโลไนไตรล์ : เมทาคริลิกแอซิด ดังนี้ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ผลการดูดซับยูเรเนียมของสัดส่วน 80:20 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 80:20

ปริมาณสารเชื่อมโยง (g/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
0.25	50	6.724
	60	7.192
	70	7.624
	80	7.708
0.5	50	8.381
	60	10.613
	70	9.239
	80	14.044
1	50	9.919
	60	17.021
	70	8.310
	80	9.890
2	50	9.100
	60	14.504
	70	9.993
	80	11.359



รูปที่ 28 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 80:20 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

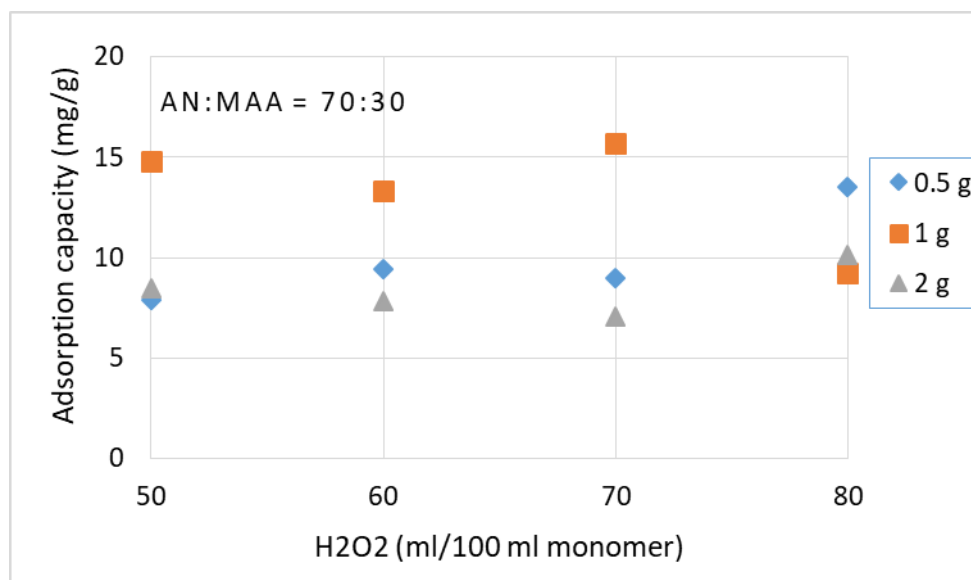
จากตารางที่ 12 และรูปที่ 28 พบว่าสัดส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด 80:20 ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ แสดงการดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุด คือ 17.021 mg U/g adsorbent รองลงมาคือ ปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยดูดซับยูเรเนียมได้ 14.504 mg U/g adsorbent สำหรับแนวโน้มของกราฟในภาพรวมของสัดส่วน 80:20 นี้ พบว่าปริมาณของสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และ 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ มีแนวโน้มที่จะดูดซับยูเรเนียมได้ดี

4.5.3. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30

จากการทดลองศึกษาสัดส่วนของมอนอเมอร์ คือสัดส่วน อะคริโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด ดังนี้ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ผลการดูดซับยูเรเนียมของสัดส่วน 70:30 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัตส่วนมอนอเมอร์ 70:30

ปริมาณสารเชื่อมโยง (g/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
0.5	50	7.888
	60	9.427
	70	8.972
	80	13.503
1	50	14.779
	60	13.349
	70	15.727
	80	9.211
2	50	8.453
	60	7.856
	70	7.053
	80	10.117



รูปที่ 29 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัตส่วนมอนอเมอร์ 70:30 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

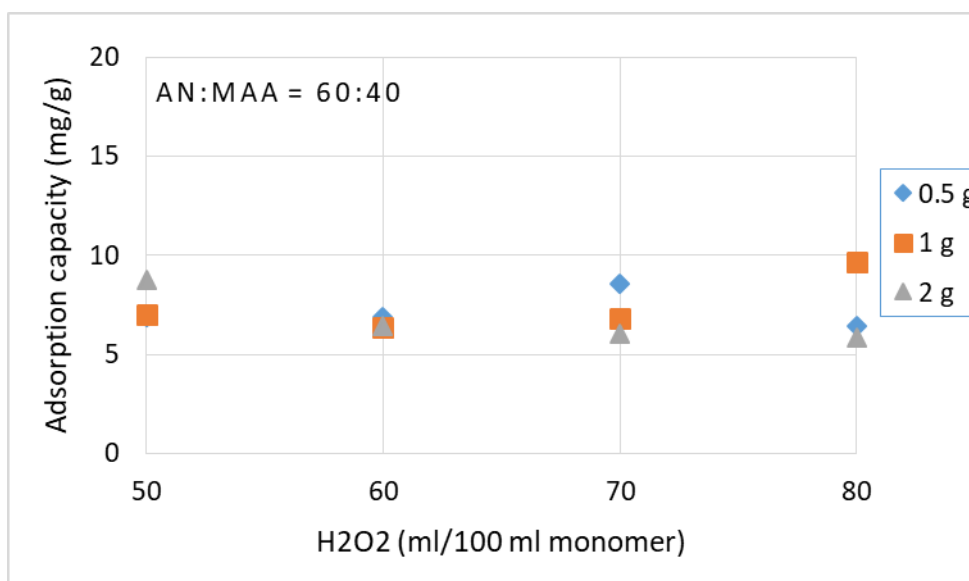
จากตารางที่ 13 และรูปที่ 29 พบว่าสัดส่วนมอนอเมอร์อะครีโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด 70:30 ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 70 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ แสดงการดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุด คือ 15.727 mg U/g adsorbent รองลงมาคือ ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยดูดซับยูเรเนียมได้ 14.779 mg U/g adsorbent สำหรับแนวโน้มของกราฟในภาพรวมของสัดส่วน 70:30 นี้ พบว่าปริมาณของสารเชื่อมโยง 1 กรัม มีแนวโน้มที่จะดูดซับยูเรเนียมได้ดีในเกือบทุกปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และรองลงมาคือปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะดูดซับยูเรเนียมได้ดีเช่นกัน

4.5.4. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 60:40

จากการทดลองศึกษาสัดส่วนของมอนอเมอร์ คือสัดส่วน อะครีโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด ดังนี้ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ผลการดูดซับยูเรเนียมของสัดส่วน 60:40 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 60:40

ปริมาณสารเชื่อมโยง (g/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
0.5	50	6.865
	60	6.869
	70	8.572
	80	6.445
1	50	6.990
	60	6.355
	70	6.827
	80	9.640
2	50	8.732
	60	6.399
	70	6.040
	80	5.852



รูปที่ 30 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของสัดส่วนมอนอเมอร์ 60:40 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

จากตารางที่ 14 และรูปที่ 30 พบว่าสัดส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ : เมทอะคริลิกแอซิด 60:40 ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 80 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ แสดงการดูดซับยูเรเนียมได้สูงสุด คือ 9.640 mg U/g adsorbent รองลงมาคือ ปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ โดยดูดซับยูเรเนียมได้ 8.732 mg U/g adsorbent สำหรับแนวโน้มของกราฟในภาพรวมของสัดส่วน 60:40 นี้ พบว่าปริมาณของสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และ 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ มีแนวโน้มที่จะดูดซับยูเรเนียมได้ดี

4.6. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของแต่ละปริมาณสารเชื่อมโยง

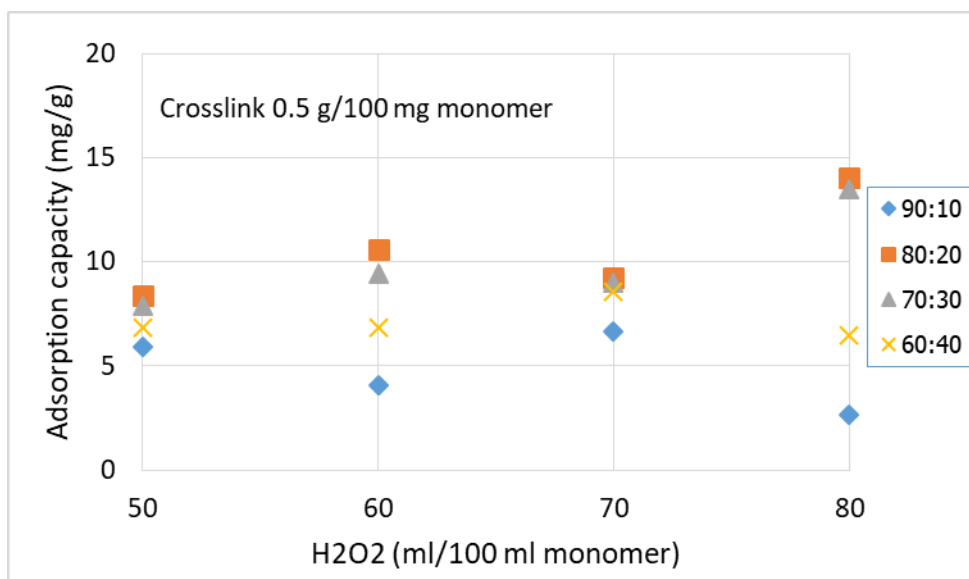
เนื่องจากที่สัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30 และ 60:40 ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.25 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ เจลพอลิเมอร์ที่ได้ไม่สามารถนำมาดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้ ดังนั้น จึงทำการเปรียบเทียบปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของแต่ละปริมาณสารเชื่อมโยง คือ 0.5, 1 และ 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์

4.6.1. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์

ผลการดูดซับยูเรเนียมสำหรับปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่สัดส่วนมอนอเมอร์ต่างๆ และที่ปริมาณไฮโดรเปอร์เจนออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม

สัดส่วน AN:MAA	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
90:10	50	5.916
	60	4.092
	70	6.684
	80	2.645
80:20	50	8.381
	60	10.613
	70	9.239
	80	14.044
70:30	50	7.888
	60	9.427
	70	8.972
	80	13.503
60:40	50	6.865
	60	6.869
	70	8.572
	80	6.445



รูปที่ 31 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่ สัดส่วนมอนอเมอร์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

จากตารางที่ 15 และรูปที่ 31 พบว่าเมื่อใส่ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ สัดส่วนมอนอเมอร์ที่แสดงปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้มากที่สุด คือ 80:20 ในทุกๆ ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ รองลงมาคือ สัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30 ส่วนสัดส่วนที่ดูดซับได้ต่ำที่สุด คือ 90:10 ซึ่งดูดซับได้ต่ำที่สุดในทุกๆ ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แสดงการดูดซับได้มากที่สุด คือ 60 และ 80 มิลลิลิตร

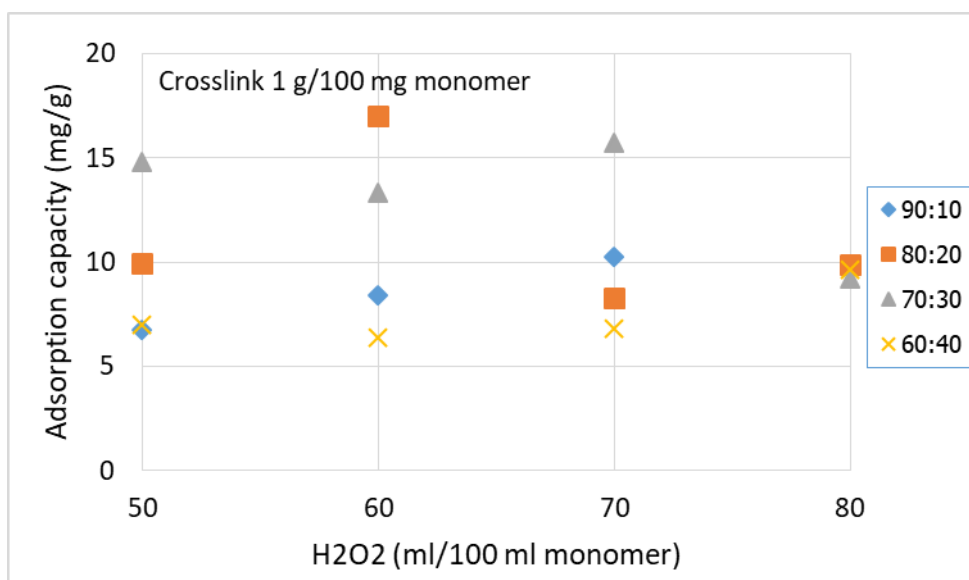
4.6.2. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์

ผลการดูดซับยูเรเนียมสำหรับปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ของสัดส่วน มอนอเมอร์ต่างๆ และที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม

สัดส่วน AN:MAA	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
90:10	50	6.752
	60	8.387
	70	10.222

สัดส่วน AN:MAA	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
	80	9.856
80:20	50	9.919
	60	17.021
	70	8.310
	80	9.890
70:30	50	14.779
	60	13.349
	70	15.727
	80	9.211
60:40	50	6.990
	60	6.355
	70	6.827
	80	9.640



รูปที่ 32 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่สัดส่วนมอนอเมอร์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

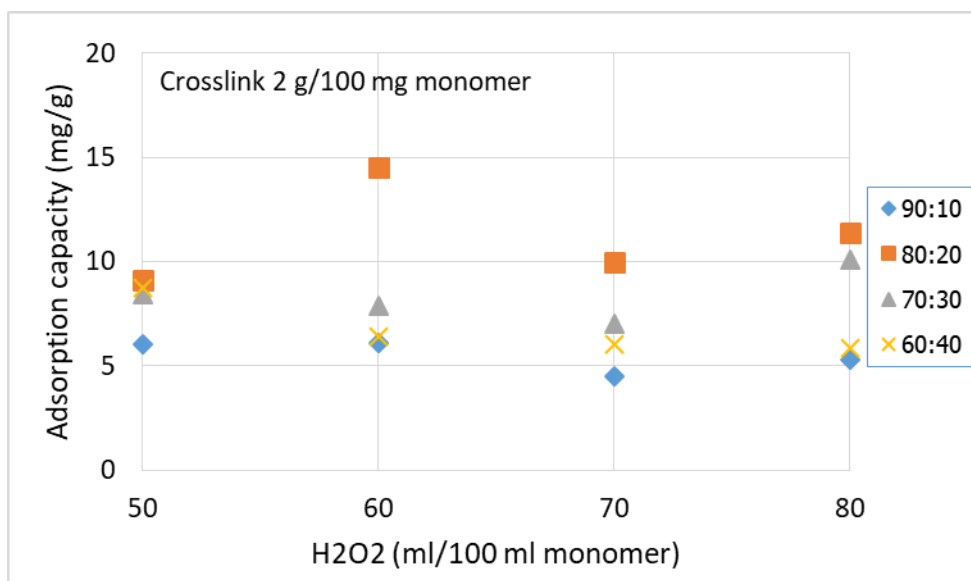
จากตารางที่ 16 และรูปที่ 32 พบว่าเมื่อใส่ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ สัดส่วนมอนอเมอร์ที่แสดงปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้มากที่สุด คือ 80:20 ที่ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ รองลงมาคือ สัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30 ที่ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 และ 70 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ส่วนสัดส่วนมอนอเมอร์ที่ดูดซับได้ต่ำที่สุด คือ 60:40

4.6.3. ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม

ผลการดูดซับยูเรเนียมสำหรับปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม ของสัดส่วนมอนอเมอร์ต่างๆ และที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม

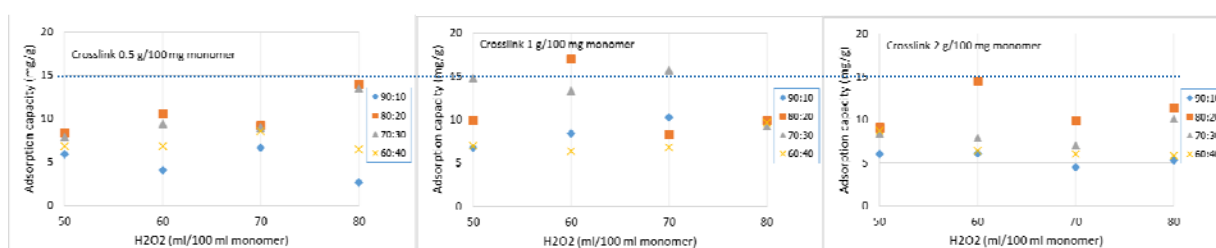
สัดส่วน AN:MAA	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับ (mg U/g adsorbent)
90:10	50	6.046
	60	6.125
	70	4.511
	80	5.303
80:20	50	9.100
	60	14.504
	70	9.993
	80	11.359
70:30	50	8.453
	60	7.856
	70	7.053
	80	10.117
60:40	50	8.732
	60	6.399
	70	6.040
	80	5.852



รูปที่ 33 ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ของปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ที่สัดส่วนมอนอเมอร์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

จากตารางที่ 17 และรูปที่ 33 พบว่าเมื่อใส่ปริมาณสารเชื่อมโยง 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ สัดส่วนมอนอเมอร์ที่แสดงปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้มากที่สุด คือ 80:20 ที่ทุกๆ ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รองลงมาคือ สัดส่วนมอนอเมอร์ 70:30 ที่ทุกๆ ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เช่นเดียวกัน ส่วนสัดส่วนมอนอเมอร์ที่ดูดจับได้ต่ำที่สุด คือ 90:10

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรต่างๆ ต่อปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้อย่างชัดเจน ได้นำรูปที่ 31, 32 และ 33 มาแสดงรวมกันดังนี้



จากกราฟทั้งสาม พบว่า สัดส่วนของมอนอเมอร์ 80:20 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ มีการดูดจับยูเรเนียมได้มากที่สุด คือ 17.021 mg U/g adsorbent รองลงมา คือ สัดส่วนของมอนอเมอร์ 70:30 ที่ปริมาณสาร

เชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 70 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ คือ 15.727 mg U/g adsorbent

4.7. ความสัมพันธ์ระหว่าง Amidoxime group density กับปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้

เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้นสำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดจับยูเรเนียม จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Amidoxime group density กับปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ : เมทาคริลิกแอซิด, ปริมาณสารเชื่อมโยง และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ โดยแสดงในตารางที่ 18 ดังนี้

ตารางที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Amidoxime group density กับปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับได้ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ : เมทาคริลิกแอซิด, ปริมาณสารเชื่อมโยง และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ

สัดส่วน AN:MAA	ปริมาณสารเชื่อมโยง (g/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	ปริมาณ H ₂ O ₂ (mL/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์)	Amidoxime group density (mol/kg)	ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดจับ (mg U/g adsorbent)
90:10	1	50	3.402	6.752
80:20	1	50	1.522	9.919
70:30	1	50	0.832	14.779
60:40	1	50	0.130	6.990
80:20	0.25	50	0.170	6.724
	0.5	50	0.820	8.381
	1	50	1.522	9.919
	2	50	0.655	9.100
80:20	1	50	1.522	9.919
	1	60	1.879	17.021
	1	70	1.673	8.310
	1	80	1.158	9.890

จากตาราง จะเห็นได้ว่า เมื่อลดสัดส่วนของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ (และเพิ่มสัดส่วนของมอนอเมอร์เมทาคริลิกแอซิด) โดยปริมาณสารเชื่อมโยงและปริมาณ H_2O_2 คงที่ ถึงแม้ว่าค่า Amidoxime group density จะลดลงเนื่องจากจำนวน Cyano group ลดลง แต่ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้กลับมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดที่อัตราส่วน 70:30 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับยูเรเนียมไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า Amidoxime group density ที่สูงเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหมู่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ของตัวดูดซับด้วย (สัดส่วนของมอนอเมอร์เมทาคริลิกแอซิด) เนื่องจากหากสัดส่วนของมอนอเมอร์เมทาคริลิกแอซิดมีค่าน้อยเกินไป จะทำให้เจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้สามารถดูดซับน้ำได้น้อย ทำให้น้ำทะเลแพร่เข้าไปยังภายในของเจลพอลิเมอร์ไม่เพียงพอ ส่งผลให้เกิดสภาวะ Mass transfer limited ทำให้ความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมลดลง

นอกจากนี้ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์และปริมาณ H_2O_2 ที่คงที่ เมื่อเปลี่ยนปริมาณสารเชื่อมโยง ซึ่งส่งผลให้ค่า Amidoxime group density เปลี่ยนไป ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้มีค่ามากสุดในสภาวะที่เจลพอลิเมอร์มีค่า Amidoxime group density สูงสุด นอกจากนี้ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์และปริมาณสารเชื่อมโยงที่คงที่ เมื่อเปลี่ยนปริมาณ H_2O_2 ซึ่งส่งผลให้ค่า Amidoxime group density เปลี่ยนไป ปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้มีค่ามากสุดในสภาวะที่เจลพอลิเมอร์มีค่า Amidoxime group density สูงสุดเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่คงที่ ความชอบน้ำของตัวดูดซับจะมีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าปริมาณ H_2O_2 และปริมาณสารเชื่อมโยงจะต่างกัน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมจะเป็นผลจากความหนาแน่นของหมู่ Amidoxime ที่มีอยู่ในเจลพอลิเมอร์เป็นหลัก

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสังเคราะห์เอมีดอกซิมพอลิเมอร์เจลเพื่อดักจับยูเรเนียมในน้ำทะเล โดยศึกษาสัดส่วนของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์และเมทอะคริลิกแอซิด ปริมาณของสารเชื่อมโยง และปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อีกทั้งยังทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการฉายและอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) เพื่อการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการนำไปดักจับยูเรเนียมในน้ำทะเล

สัดส่วนของมอนอเมอร์อะคริโลไนไตรล์ต่อเมทอะคริลิกแอซิด ที่ทำการศึกษาคือ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ทำการศึกษา คือ 0.25, 0.5, 1 และ 2 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 50, 60, 70 และ 80 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) คือ 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต คือ 45 และ 80 °C ผลการสังเคราะห์พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เหมาะสมที่สุด คือ 8 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้ในการฉายรังสีที่ที่เหมาะสม คือ 45 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิในเครื่องระหว่างฉายรังสี ส่วนพารามิเตอร์ของสารตั้งต้นต่างๆ เมื่อนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมตามข้างต้นแล้ว พบว่าทุกพารามิเตอร์สามารถกลายเป็นเจลพอลิเมอร์ได้สมบูรณ์ ยกเว้นพารามิเตอร์ 70:30 และ 60:40 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.25 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ พบว่ากลายเป็นเจลพอลิเมอร์ที่ไม่แข็งตัว ยังคงเป็นของเหลวเหนียวคล้ายน้ำผึ้ง ไม่สามารถนำไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไปได้

ผลของความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมในเจลพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสัดส่วนอะคริโลไนไตรล์ โดยสัดส่วนมอนอเมอร์ที่มีความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันเอมีดอกซิมสูงที่สุด คือ 90:10 รองลงมาคือ 80:20 70:30 และ 60:40 ตามลำดับ

ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันในเจลพอลิเมอร์ก่อนขั้นตอน Amidoximation ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ปรากฏแถบดูดกลืน C-H alkyl stretch ที่เลขคลื่น 2932 cm^{-1} แถบดูดกลืน C-H ที่เลขคลื่น 1473 cm^{-1} แถบดูดกลืน $\text{C}\equiv\text{N}$ (Nitrile stretch) ที่เลขคลื่น 2242 cm^{-1} และแถบดูดกลืน C=O ที่เลขคลื่น 1697 cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดหมู่ไซยาโน ส่วนผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันของเจลพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR หลังขั้นตอน Amidoximation พบแถบดูดกลืนของ N-H stretch ที่เลขคลื่น 3338 cm^{-1} และแถบดูดกลืน

C=O ของหมู่เอมีดอิมิดที่เลขคลื่น 1653 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบว่าแถบดูดกลืน $\text{C}\equiv\text{N}$ (Nitrile stretch) ที่เลขคลื่น 2242 cm^{-1} หายไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมู่ไซยาโนทั้งหมด (หรือเกือบทั้งหมด) ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีดอิมิด

เทคนิค ICP-OES ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมในสารละลายกรดไนตริก ซึ่งละลายผงยูเรเนียมที่สกัดได้จากเอมีดอิมิดพอลิเมอร์เจลของแต่ละพารามิเตอร์ โดยใช้วิธี Elution ผลของการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลในห้องปฏิบัติการวิจัยของเอมีดอิมิดพอลิเมอร์เจล โดยจุ่มแช่เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลเป็น 10 ppm พบว่าสัดส่วนของมอนอเมอร์ที่ดูดซับยูเรเนียมได้ปริมาณมากที่สุดคือ 80:20 รองลงมา คือ 70:30 ส่วนปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อเทียบกับปริมาณสารเชื่อมโยงที่ใช้พบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ สามารถดูดซับยูเรเนียมได้มากที่สุด ส่วนปริมาณยูเรเนียมที่ดูดซับได้เมื่อเทียบกับปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มากขึ้น ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปจนกระทั่งถึง 70 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมกลับลดลง ดังนั้น ปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมและดูดซับยูเรเนียมได้มากที่สุด คือ 60 มิลลิลิตร

โดยสรุปแล้ว สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์เพื่อให้ได้ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมสูงสุด คือ สัดส่วนของอะคริลาไมด์ต่อเมทาคริลิกแอซิดที่ 80:20 ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 1 กรัม/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ และปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 60 มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร มอนอเมอร์ ซึ่งสามารถดูดซับยูเรเนียมได้สูงถึง $17.02\text{ mg U/g adsorbent}$ ในน้ำทะเลในห้องปฏิบัติการวิจัย โดยทำการจุ่มแช่เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลเป็น 10 ppm

การใช้มอนอเมอร์มาสังเคราะห์เพื่อให้ได้เจลพอลิเมอร์นี้มีประสิทธิภาพดีกว่างานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนเป็น Substrate เนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายของ Substrate และเมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับในหน่วย mg U/g adsorbent เจลพอลิเมอร์จะมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าการใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนเนื่องจากไม่มีมวลของ Substrate อยู่ในตัวหาร นอกจากนี้หากนำไปใช้งานจริง การที่มวลของตัวดูดซับลดลงจะทำให้มีความสะดวกในการขนย้ายและการติดตั้งมากขึ้น ท้ายสุดแล้ว การที่ไม่ใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อม ทำให้ตัวดูดซับนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้มีดังนี้

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการ Elution เพื่อให้ใช้เวลาลดลง

2. ทดลองหาค่าการดูดซับสูงสุดของเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมในน้ำทะเลให้สูงกว่า 10 ppm มาก (เช่น 1,000 ppm) รวมถึงเพิ่มระยะเวลาการจุ่มแช่
3. คำนวณหาค่าการดูดซับสูงสุดทางทฤษฎีของเจลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น (Maximum theoretical adsorption capacity) และเปรียบเทียบกับค่าการดูดซับสูงสุดที่วัดได้จากข้อเสนอแนะที่ 2
4. ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับในกรณีอื่นๆ เช่นการดูดซับยูเรเนียมในน้ำทะเลหากมีอุบัติเหตุของสถานปฏิบัติการทางนิวเคลียร์และมีการปลดปล่อยยูเรเนียมลงสู่น้ำทะเล เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

1. ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง และคณะ “การศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากน้ำทะเลในประเทศไทย (Study on Uranium Extraction from Thailand’s Seawater)” สนับสนุนโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สัญญาเลขที่ 54-B104000-076-IO.SS03A3008125-CU (2556)
2. Vareeporn Ratnitsai, Doonyapong Wongsawaeng and Nares Chankow, “Enhancement of uranium extraction from seawater using chromic-acid-treated amidoxime adsorbent prepared by simultaneous irradiation grafting technique,” *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2015; 52: 1151-1161.
3. Klaus Scbwochau, Extraction of Metals from Sea Water, Institute of Chemistry, Nuclear Research Centre (KFA) D-5170 Jilich, FRG.
4. A. Zhang *et.al.*, “pH Effect on the uranium adsorption from seawater by a macroporous fibrous polymeric material containing amidoxime chelating functional group,” *Reactive & Functional Polymers*, 63 (2005) 143–153.
5. K. Saito *et. al.*, “Characteristics of Uranium Adsorption by Amidoxime Membrane Synthesized by Radiation-Induced Graft Polymerization,” *Journal of Membrane Science*, 34 (1987) 307-315.
6. Sadananda Das *et. al.*, “Chemical aspects of uranium recovery from seawater by amidoximated electron-beam-grafted polypropylene membranes,” *Desalination*, 232 (2008) 243–253.
7. Anyun Zhang *et. al.*, “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.
8. Nalan Kabay *et. al.*, “Preparation of amidoxime-fiber adsorbents by radiation-induced grafting,” *Radiation Physics and Chemistry*, 46 (1995) 833-836.

9. Sugo Takanobu, Tamada Masao, Seguchi Tadao, Shimizu Takao, Uotani Masaki, and Kashima Ryoichi, "Recovery System for Uranium from Seawater with Fibrous Adsorbent and Its Preliminary Cost Estimation," *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, 43 (2001) 1010-1016.
10. Masao TAMADA, "Collection of uranium from seawater," Technical Meeting at IAEA, Vienna, Austria, 11/5/2009.
11. Masao Tamada, "Current status of technology for collection of uranium from seawater," Environment and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 2009.
12. K. Hara, S. Fujiwara, T. Fujii, S. Yoshioka, Y. Hidaka, H. Okabe, Attempts to capturing ppb-level elements from sea water with hydrogels, *Progress in Nuclear Energy* 92 (2016) 228–233.
13. G. Bayramoglu, M. Y. Arica, 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.
14. D. Yuan, L. Chen, X. Xiong, L. Yuan, S. Liao, Y. Wang, 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.
15. Y. Wang, Z. Gu, J. Yang, J. Liao, Y. Yang, N. Liu, J. Tang, Amidoxime-grafted multiwalled carbon nanotubes by plasma techniques for efficient removal of uranium (VI), *Applied Surface Science* 320 (2014) 10–20.
16. H.W. Yu, S.S. Yang, H.M. Ruan, J.N. Shen, C.J. Gao, B.V. der Bruggen, Recovery of uranium ions from simulated seawater with palygorskite/ amidoxime polyacrylonitrile composite, *Applied Clay Science* 111 (2015) 67–75.
17. C. Xu, J. Wang, T. Yang, X. Chen, X. Liu, X. Ding, Adsorption of uranium by amidoximated chitosan-grafted polyacrylonitrile, using response surface methodology, *Carbohydrate Polymers* 121 (2015) 79–85.

18. K. Sekiguchi, K. Serizawa, S. Konishi, K. Saito, S. Furusaki, T. Sugo, Uranium uptake during permeation of seawater through amidoxime-group-immobilized micropores, *Reactive Polymers* 23 (1994) 141–145.
19. T. Takeda, K. Saito, K. Uezu, S. Furusaki, T. Sugo, J. Okamoto, Adsorption and Elution in Hollow-Fiber-Packed Bed for Recovery of Uranium from Seawater, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 30 (1991) 185–190.
20. Q. Gao, J. Hu, R. Li, Z. Xing, L. Xu, M. Wang, X. Guo, G. Wu, 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.
21. J. Kim, C. Tsouris, Y. Oyola, C.J. Janke, R.T. Mayes, S. Dai, G. Gill, L.J. Kuo, J. Wood, K.Y. Choe, E. Schneider, H. Lindner, Uptake of Uranium from Seawater by Amidoxime-Based Polymeric Adsorbent: Field Experiments, Modeling, and Updated Economic Assessment, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 53 (2014) 6076–6083.
22. H. Sodaye *et. al.*, “Extraction of uranium from the concentrated brine rejected by integrated nuclear desalination plants,” *Desalination* 235 (2009) 9–32.