

สรุปผลการวิจัยและข้อ เสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยในเรื่องนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อหากระบวนการผลิต เค้ก เหลืองจากแร่โมนาไซต์ในประเทศไทย ด้วยวิธีการที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก สามารถจัดและหาวัสดุ เคมีภัณฑ์ได้ง่าย พร้อมทั้งให้ประสิทธิภาพในการผลิตได้สูง ดังข้อสรุปผลการวิจัยดังต่อไปนี้

7.1.1 ขั้นตอนการสกัดยูเรเนียม

จากการหาปริมาณยูเรเนียมในแร่ขนาดต่าง ๆ ดังผลในตาราง 6.1 นั้น โดยแร่ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมียูเรเนียมปนอยู่มากกว่า เพราะ เม็ดแร่ขนาดเล็กนั้นมักจะมี เศษวัตถุ เจือปนต่าง ๆ ที่มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับ เม็ดแร่ขนาดเล็กนี้ ทำให้หลุดลอดตะแกรงร่อนแร่ออกมาปนอยู่กับแร่ได้ เศษวัตถุเหล่านี้อาจจะ เป็นหิน กรวด ทรายหรือดิน ส่วนขนาดของ เม็ดแร่ตามธรรมชาตินั้นจะมีปริมาณยูเรเนียมอยู่ในช่วงของ เม็ดแร่ขนาด -200 ถึง -270 เมช ฉะนั้นแร่โมนาไซต์ตามธรรมชาติส่วนใหญ่จึงควรจะมีขนาดอยู่ในระหว่าง -200 ถึง -270 เมช

ในการย่อยแร่ที่สภาวะต่าง ๆ นั้น มีรายละเอียดดังนี้

ก. ขนาดเม็ดแร่ ดังผลในตาราง 6.3 และรูป 6.2 โดยจะย่อยสกัดยูเรเนียมออกมาได้สูงสุด เมื่อใช้แร่ขนาด -200 เมช เพราะแร่ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารที่ใช้ย่อยได้น้อยกว่า จึงทำให้เม็ดแร่แตกสลายได้ยากกว่า ส่วนการที่แร่ที่มีขนาดเล็กกว่า -200 เมชนั้นจะมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้เมื่อสัมผัสกับสารที่ใช้ย่อยแล้ว มักจะรวมกันเอง เป็นก้อนได้ง่าย และทำการปั่นกวนลำบาก จึงถูกย่อยให้แตกสลายได้ยาก ที่สำคัญคือ เม็ดแร่ขนาดเล็กมากนี้จะดูดซับยูเรเนียมในสารละลายกลับ เข้าที่ผิวของ เม็ดแร่ เป็นเหตุให้ยูเรเนียมถูกสกัดออกมาได้น้อย

ข. อัตราส่วนกรดต่อแร่ ดังผลจากตาราง 6.4 และรูป 6.3 โดยยูเรเนียมจะถูกสกัดออกมาได้สูงสุด เมื่อใช้อัตราส่วนกรดต่อแร่เป็น 1.5:1 การใช้กรดมากเกินไปอัตราส่วนนี้จะ

ทำให้ยูเรเนียมถูกสกัดออกได้ลดน้อยลง เพราะจะมีปริมาณของกรดซัลฟูริกอิสระ เหลืออยู่มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของการ เกิดออกซิ เคชันระหว่างยูเรเนียมและยูเรเนียมออกไซด์ลดลง ดังนั้นยูเรเนียมจึงถูก เปลี่ยนไป เป็นยูเรเนียมออกไซด์น้อยลง ซึ่งยูเรเนียมสามารถละลายใน สารละลายกรดเจือจางได้น้อย เป็นเหตุให้มีปริมาณยูเรเนียมถูกละลายชะล้างออกมาได้ลดน้อยลง (51)

ค. ความเข้มข้นของกรด ดังผลจากตาราง 6.5 และรูป 6.4 โดยยูเรเนียม จะถูกสกัดออกได้มากขึ้น เมื่อใช้กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งยูเรเนียมจะถูกสกัดออกได้ สูงสุดที่ความเข้มข้น 90% ถ้าความเข้มข้น เกินกว่านี้จะสกัดยูเรเนียมออกมาได้ลดน้อยลง เพราะ กรดซัลฟูริกที่เข้มข้นมาก ๆ จะมีความหนืดมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการปั่นกวาลดลง โอกาสของ กรดที่จะสัมผัสผิว เม็ดแร่ได้อย่างทั่วถึงจึงลดน้อยลง เม็ดแร่จึงแตกสลายได้ยากกว่า นอกจากนี้กรด ซัลฟูริกที่เข้มข้นมาก ๆ จะทำให้มีปริมาณกรดซัลฟูริกอิสระ เหลืออยู่มาก ซึ่งยูเรเนียมก็จะถูกละลาย ชะล้างออกมาได้ลดน้อยลง (เหตุผลเดียวกับข้อ ข.)

ง. อุณหภูมิ ดังผลจากตาราง 6.6 และรูป 6.5 โดยยูเรเนียมจะถูกสกัดออก ได้ดียิ่งขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในการย่อยสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิเกินกว่า 190°ซ. นั้น จะให้ผลต่อการสกัด ยูเรเนียมออกมาได้ใกล้เคียงกับ เมื่อใช้อุณหภูมิ 190°ซ และเนื่องจากอุณหภูมิจึงจะมีการแปรเปลี่ยน ได้บ้าง ฉะนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิในการย่อยไม่ต่ำกว่า 200°ซ จะเหมาะสมที่สุด

จ. เวลา ดังผลในตาราง 6.7 และรูป 6.6 จะเห็นว่ายูเรเนียมจะถูกสกัด ออกจากแร่ได้อย่างรวดเร็วมาก เพียงย่อยแร่แค่ 15 นาทีก็จะสกัดยูเรเนียมออกมาได้ถึง 49.33% และที่เงื่อนไขอื่นหลังจะมีการสกัดยูเรเนียมได้มากที่สุด 68.28% แต่จะสกัดยูเรเนียมออกมาได้สูง สุดเมื่อย่อยแร่เป็น เวลาประมาณ 1.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นแล้วปริมาณยูเรเนียมที่จะถูกสกัดออกจะ มากกว่าเดิม เพียงเล็กน้อย แสดงว่ายูเรเนียมที่รวมตัว เป็นองค์ประกอบของแร่โมนาไซต์นั้น จะรวม ตัวกันอยู่ค่อนข้างหลวมไม่เหนียวแน่นมาก จึงถูกย่อยแตกสลายออกมาได้หมดภายใน เวลาไม่นาน นึก แต่การที่สกัดยูเรเนียมออกมาได้ไม่สมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสภาวะการย่อยอื่น ๆ ดัง กล่าวข้างต้นด้วย

การแยกตะกอนของกากแร่และตะกอนเจือปนอื่น ๆ ออกจากสารละลายชะล้างนั้น ตะกอน เหล่านี้อาจจะพายุเรเนียมติดออกไปด้วย จึงควรจะต้องล้างตะกอน เหล่านี้ด้วยสารละลายกรดซัล-ฟูริกเจือจาง เพื่อชะล้างให้ยูเรเนียมที่ติดไปนั้นหลุดละลายออกมา จากผลในตาราง 6.8 จะเห็น

ว่าภายหลังจากการแยกตะกอนออกไปครั้งแรกนั้นแล้ว จะมียูเรเนียมคิดไปเพียง 1.83% และเมื่อทำการล้างเพียงครั้งเดียวก็จะได้กลับมาหมด

สรุปสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการสกัดยูเรเนียมออกจากแร่โมนาไซต์ในประเทศไทยด้วยการใช้กรดซัลฟูริกได้ดีที่สุด คือใช้เม็ดแร่ขนาด -200 เมช ทำการย่อยด้วยกรดซัลฟูริก เข้มข้น 90% ในอัตราส่วนกรดต่อแร่เป็น 1.5:1 ย่อยที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 200°ซ. เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1.5 ชั่วโมง แล้วละลายชะล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจาง

จากการหาอีลด์ (Yield) ของการสกัดยูเรเนียมจากแร่โมนาไซต์ ดังผลในตาราง 6.9 ด้วยการใช้แร่ขนาด -200 เมช ประมาณ 30 กรัม ย่อยด้วยกรด เข้มข้น 90% ในอัตราส่วน 1.5:1 เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200°ซ. และละลายชะล้างด้วยน้ำ จะสามารถให้อีลด์เฉลี่ยเป็น 96.307

7.1.2 ขั้นตอนการตกตะกอนแร่เอิร์ทและทอ เรียม

แร่เอิร์ทจะตกตะกอน เป็นออกซา เลดได้หมด เมื่อ เดิมกรดออกซาลิกลงไป ดังผลในตาราง 6.10 จะเห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณแร่เอิร์ทต่อกรดออกซาลิกเป็น 1:6.505 จะสามารถตกตะกอนแร่เอิร์ทออกมาได้ถึง 97.999% แต่หลังจากนี้แม้จะ เดิมกรดออกซาลิกลงไป ในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ก็จะสามารถตกตะกอนแร่เอิร์ทได้เพิ่มขึ้น เพียง เล็กน้อย เท่านั้น อาจจะเป็น เพราะตะกอนออกซา เลดของแร่เอิร์ทบางส่วนสามารถจะละลายในสารละลายที่มีกรดออกซาลิกได้ ฉะนั้น เพื่อให้คุ้มค่าในทาง เศรษฐกิจจึงไม่ควร เดิมกรดออกซาลิกลงไป เกิน 6.5 เท่าของแร่เอิร์ทในแร่ (โดยน้ำหนัก) เพราะจะสิ้น เปลืองโดยใช่เหตุ

ส่วนผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อการตกตะกอนแร่เอิร์ทด้วยกรดออกซาลิกนั้น จากผลในตาราง 6.11 จะเห็นว่าจะไม่ค่อยมีผลต่อการตกตะกอนเท่าใดนัก เพราะการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง (30°ซ.) มาเป็น 55°ซ. จะสามารถตกตะกอนแร่เอิร์ทเพิ่มขึ้นได้เพียง 0.129% และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้การตกตะกอนก็จะลดลง เพียง เล็กน้อย เช่นกัน ฉะนั้นจึง ควรจะทำการตกตะกอน ณ อุณหภูมิห้องจะเหมาะสมและคุ้มค่ามากกว่า

การใช้กรดออกซาลิกนั้น แม้ว่าจะสามารถตกตะกอนห่อเตรียมได้ แต่จะต้องใช้เวลาในการเกิดตะกอนออกซาเลตนานกว่าและเกิดยากกว่าการเกิดตะกอนออกซาเลตของแรรีเออร์มาก และมักจะตกตะกอนได้ไม่สมบูรณ์ฉะนั้นจึงต้องเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงไปปรับ pH เป็น 1.10 จึงจะสามารถตกตะกอนห่อเตรียมออกมาได้สมบูรณ์

7.1.3 ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน

เนื่องจาก เหล็ก เป็นไอออนสำคัญ อันเป็นอุปสรรคต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของยูเรเนียมกับเรซิน เพราะเหล็กในรูปของ Fe^{+3} นั้น สามารถจะเกิดเป็นไอออนลบเชิงซ้อนกับเรซินได้เป็นอย่างดี และมักจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการเกิดไอออนลบเชิงซ้อนของยูเรเนียม เป็นเหตุให้ไปแย่งที่การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับยูเรเนียมได้ ถ้า pH ของสารละลายยิ่งสูงขึ้นก็จะยิ่งทำให้เกิดไอออนลบเชิงซ้อนของ Fe^{+3} ได้เร็วมากขึ้น ทำให้ไปแย่งที่การแลกเปลี่ยนไอออนของยูเรเนียมได้มากขึ้น ยูเรเนียมจึงถูกดูดซับได้น้อยลง แต่ในขณะเดียวกันยูเรเนียมจะถูกดูดซับได้ดีเมื่อ pH ของสารละลายสูงขึ้น⁽⁹²⁾ ฉะนั้นจะต้องใช้สารละลายที่มี pH อยู่ในช่วงที่ Fe^{+3} ถูกดูดซับได้น้อยที่สุดและไม่ต่ำจนเกินไป จากผลในตาราง 6.12 และรูป 6.8 จะเห็นว่าเหล็กจะถูกดูดซับได้น้อยที่สุดที่ pH 1.45

ในการหาประสิทธิภาพของอีลูแอนต์ 3 ชนิด ดังผลในตาราง 6.14, 6.15, 6.16 และรูป 6.10 นั้น จะเห็นว่าไนเตรตมีประสิทธิภาพดีที่สุด เพราะสามารถจะอีลูต (Elute) เอายูเรเนียมออกมาได้สูงสุดที่ปริมาตรของเบด (Bed Volume) ที่ 3 ถึง 55.14% และสามารถอีลูตเอายูเรเนียมออกได้หมดโดยการใช้อีลูแอนต์ 11 ปริมาตรของเบดเท่านั้น ในขณะที่คลอไรด์สามารถจะอีลูตเอายูเรเนียมออกมาได้สูงสุดเพียง 29.80% และกว่าจะอีลูตเอายูเรเนียมออกจนหมด จะต้องใช้อีลูแอนต์ถึงประมาณ 15 ปริมาตรของเบด ส่วนซัลเฟตนั้นจะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด สามารถอีลูตเอายูเรเนียมออกมาได้สูงสุดเพียง 16.36% และกว่าจะอีลูตเอายูเรเนียมออกได้หมด ก็อาจจะต้องใช้อีลูแอนต์ถึงประมาณ 22 ปริมาตรของเบด

อัตราการไหลของสารละลายที่จะผ่านให้เรซินดูดซับนั้น เป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง ซึ่งยูเรเนียมจะถูกดูดซับได้ดียิ่งขึ้น เมื่ออัตราการไหลของสารละลายที่ผ่านเรซินยิ่งช้ามากขึ้น เพราะยูเรเนียมในสารละลายจะมีระยะเวลาสัมผัสกับเม็ดเรซินได้มากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยน

เปลี่ยนอออนได้สมบูรณ์มากขึ้น แต่ในทางปฏิบัตินั้นการใช้อัตราการไหลที่ช้ามากเกินไป ก็จะไม่คุ้มค่า ควรจะใช้อัตราการไหลที่เร็วพอสมควรและมีการดูดซับยูเรเนียมได้ดีด้วย ซึ่งจากผลในตาราง 6.17 และรูป 6.12 นั้น จะเห็นว่าที่อัตราการไหล 9.67 ซม.³/ซม.²/นาที จะสามารถดูดซับยูเรเนียมได้สูงถึง 99.04% และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 65.04 ซม.³/ซม.²/นาที ก็ยังคงดูดซับยูเรเนียมได้สูงถึง 94.77% ฉะนั้นจึงควรจะผ่านสารละลายด้วยอัตราการไหลไม่เร็วไปกว่า 65 ซม.³/ซม.²/นาที ก็เพียงพอ และควรจะนำสารละลายที่ผ่านออกมานั้นกลับไปผ่านเรซินในคอลัมน์ต่อไปใหม่อีกครั้งหนึ่ง จะเป็นการเหมาะสมที่สุด

อุณหภูมิของสารละลายที่จะให้ไหลผ่านเรซินนั้น ก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน เพราะสารละลายที่มีอุณหภูมียิ่งสูง จะยิ่งเพิ่มอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion) ของสารละลายผ่านเรซินได้ดีและเร็วยิ่งขึ้น ดังผลในตาราง 6.18 และรูป 6.12

7.1.4 ขั้นตอนการตกตะกอนแอมโมเนียม ไดยูเรเนต

ยูเรเนียมจะเกิดการตกตะกอนถาวรครั้งแรกที่ pH ประมาณ 4.30 ซึ่งมีลักษณะคล้ายเจลาติน (Gelatin) อันเป็นตะกอนของยูเรนิล ไฮเดรต ออกไซด์ ($UO_3 \cdot xH_2O$) และจะเกิดได้รวดเร็วมากจนเมื่อ pH ถึงประมาณ 5.80 จึงเริ่มจะเกิดตะกอนได้ช้าลง อันเป็นตะกอนของต่างยูเรนิล ซัลเฟต $[(UO_2)_2SO_4(OH)_2 \cdot 4H_2O]$ มีลักษณะเป็นผลึก จนถึง pH ประมาณ 6.80 จึงจะเริ่มเกิดตะกอนได้เร็วขึ้นอีกครั้งหนึ่ง อันเป็นตะกอนของแอมโมเนียม ไดยูเรเนต $[(NH_4)_2U_2O_7]$ จนถึง pH ประมาณ 8.10 จะทำให้การเกิดตะกอนเริ่มช้าลง เพราะแอมโมเนียม ไดยูเรเนตบางส่วนจะเริ่มเกิดปฏิกิริยากับยูเรนิลอออนในสารละลายนั้น กลับกลายเป็นยูเรนิล ไฮเดรต ออกไซด์ได้ใหม่อีก และในที่สุดจะตกตะกอนยูเรเนียมได้สมบูรณ์ที่ pH 9.25 ดังผลในตาราง 6.19 และรูป 6.13

7.1.5 ความบริสุทธิ์ของเค้ก เหลือง

เมื่อนำเค้ก เหลืองไปวิเคราะห์ความบริสุทธิ์จะได้ U_3O_8 เข้มข้นสูงถึง 75.209% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานกำหนดของ USAEC ส่วนสิ่งเจือปนอื่น ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.20 แสดงถึงว่าสิ่งเจือปนมีค่าต่ำกว่ากำหนดของ USAEC เช่นกัน

7.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยในระดับห้องทดลอง (Lab-scale) จึงควรจะมีการปรับปรุงวิธีการหรือทำการวิจัยเพิ่มเติมดังต่อไปนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อแนวทางในการขยายการผลิตในขั้นอุตสาหกรรมต่อไป

ก. หัวแร่โมนาไซต์นั้น ควรจะทำการแต่งแร่เสียก่อน โดยใช้เครื่องแยกแร่ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของธาตุดแรร์เอิร์ท ทอเรียม และยูเรเนียม อันจะทำให้ประสิทธิภาพของการย่อยและการสกัดแร่ เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น เป็นผลให้ได้ยิลด์เพิ่มมากขึ้น

ข. ในขั้นตอนการสกัดยูเรเนียมจากแร่โมนาไซต์นั้น ควรจะกระทำให้ทุกขั้นตอนย่อยมีการต่อเนื่องกัน โดยเฉพาะการย่อยแร่และการละลายชะล้าง ตลอดจนการตกตะกอนแรร์เอิร์ทและทอเรียม เพื่อเป็นการประหยัด เวลาและค่าใช้จ่าย

ค. กรดซัลฟูริกอิสระที่เหลืออยู่ภายหลังการย่อยแร่นั้น ควรจะนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการประหยัดสารเคมี

ง. ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ควรจะออกแบบให้คอลัมน์ที่บรรจุเรซินนั้นสามารถจะแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างต่อเนื่องกัน และสามารถนำอีลูเอต (Eluate) กลับออกไปดูดซับได้ใหม่อีก เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนไอออน ตลอดจนสามารถจะลดค่าใช้จ่ายและไม่สิ้นเปลืองเวลาไปโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นจึงควรใช้ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนชนิดหลายคอลัมน์ เช่นระบบสามคอลัมน์

จ. ควรจะมีการศึกษาเปรียบเทียบอย่างชัด เจนถึงข้อได้เปรียบ เสียเปรียบในด้านเทคนิค ต้นทุนการผลิต รวมทั้งผลิตผลพลอยได้จากกระบวนการ การแปรสภาพโมนาไซต์โดยวิธีใช้กรดและใช้ด่างในระดับโรงงาน ที่มีกำลังการผลิตขนาดต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางที่จะนำไปพิจารณาในการจัดตั้งโรงงานแปรสภาพโมนาไซต์ในประเทศในอนาคต.