

ภาคผนวก ๒



วารสาร

สงขลานครินทร์

วารสารวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 0125-3395

เรื่องตีพิมพ์จากวารสารสงขลานครินทร์
Reprint from Songklanakarin J. Sci. Technol.

กองบรรณาธิการวารสารสงขลานครินทร์ สำนักงานอธิการบดี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จ.สงขลา 90110.
โทร. 235800-9 ต่อ 2983, 2181 Telex: 62168 UNISONG TH Fax: 2467834

การแยกแอมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากแร่ คาร์แนลไลต์โดยวิธีอิเล็กโทรไลต์

บุญเสริม อยู่ประเสริฐ¹ ผดุง บุญสิน² และสัมพันธ์ วงศ์นาวา³

บทคัดย่อ. บุญเสริม อยู่ประเสริฐ, ผดุง บุญสิน และสัมพันธ์ วงศ์นาวา. 2533. การแยกแอมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากแร่คาร์แนลไลต์โดยวิธีอิเล็กโทรไลต์. ว.สงขลานครินทร์ 12(2): 125 - 137

ใช้กรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกแอมกนีเซียมคลอไรด์ออกจากแร่คาร์แนลไลต์ในรูปของแอมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในช่วงการทดลองอนุภาค OH^- ที่เกิดขึ้นในสารละลายจะรวมตัวกับอนุภาค Mg^{2+} เป็นแอมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก (0.004 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 100°C .) จึงตกตะกอนแยกออกมาได้ง่ายจากส่วนอื่น วิธีนี้สามารถแยกแอมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ออกมาได้ประมาณ 91 % ของปริมาณที่มีอยู่ทั้งหมดในแร่และมีความบริสุทธิ์ประมาณ 95 % ส่วน KCl และ NaCl (เกลือหิน) นั้นยังไม่สามารถแยกออกจากกันได้โดยวิธีนี้

แร่คาร์แนลไลต์เป็นแร่ที่มีปริมาณมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยและปัจจุบันยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ แร่นี้เป็นของผสมระหว่าง KCl และ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ แต่เนื่องจากในบริเวณเดียวกันนี้มีเกลือหิน (NaCl) อยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก ดังนั้นแร่คาร์แนลไลต์จากแหล่งนี้จึงมี NaCl ปนอยู่ด้วย⁽¹⁾ การจะนำแร่มาใช้ประโยชน์ให้มีคุณค่าทางเศรษฐกิจจึงควรหาทางพัฒนาแร่ดิบซึ่งเป็นของผสมนี้ให้แยกออกมาได้ในรูปขององค์ประกอบแต่ละส่วนซึ่งจะทำให้การใช้ประโยชน์เป็นไปได้ตรงตามประโยชน์ที่พึงมีขององค์ประกอบแต่ละชนิดและเป็นการเพิ่มคุณค่าของแร่นี้ด้วยเทียบกับถ้าปล่อยให้มีการขุดขึ้นมาใช้หรือขายในลักษณะเป็นของผสมซึ่งมีราคาต่ำ ในกลุ่มวิจัยของผู้เขียนนี้จึงได้ศึกษาโดยใช้วิธีทางเคมีเพื่อหาวิธีที่จะแยกองค์ประกอบเหล่านี้ออกจากกันโดยหวังว่าวิธีเหล่านี้จะมีประโยชน์ในการพัฒนาแร่นี้ให้มีคุณค่าขึ้นในทางเศรษฐกิจและได้เคยรายงานวิธีการแยกแร่นี้โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ไปแล้ว⁽¹⁾ ในบทความนี้จะรายงานผลการทดลองเป็นวิธีที่สอง ซึ่งเป็นแนวคิดต่างจากวิธีแรกที่ใช้แอลกอฮอล์ กล่าวคือในบทความนี้จะรายงานผลจากการแยกแอมกนี-

¹โรงเรียนมัธยมสุโขทัย อําเภอสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย 61140

²วท.บ.(เคมี) ³Ph.D. (Inorganic Chemistry), อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

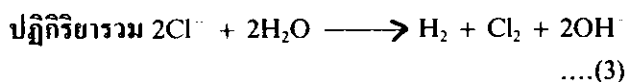
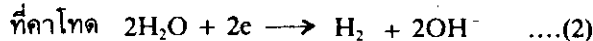
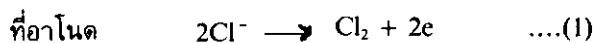
รับลงพิมพ์ พฤษภาคม 2533

เชื่อมในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากแร่โดยใช้กรรมวิธีทางไฟฟ้าหรือทางอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic process)

แนวคิดที่นำไปสู่การใช้วิธีทางไฟฟ้านั้นเกิดจากการพิจารณาคุณสมบัติในการละลายน้ำของสารประกอบของโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) ดังตารางที่ 1

จากข้อมูลการละลายในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า NaCl, KCl และ MgCl₂ · 6H₂O ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและ CaCl₂ ซึ่งเป็นมลพิษปริมาณเพียงเล็กน้อยที่พบในแร่คาร์นัลไลต์นั้น ต่างก็ละลายน้ำได้ดีทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันบ้างในการละลายซึ่งบางแห่งได้ใช้การละลายที่แตกต่างกันเล็กน้อยนี้มาเป็นประโยชน์ในการแยกองค์ประกอบเหล่านี้ออกจากกันได้โดยแยก KCl ออกมาได้ มีความบริสุทธิ์ถึง 99.4 % แต่ไม่ได้กล่าวถึงส่วนอื่น ๆ ที่แยกออกมาด้วยว่ามีความบริสุทธิ์มากน้อยเพียงใด⁽³⁾ แต่ถ้าพิจารณาการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์จะเห็นได้ว่า Mg(OH)₂ และ Ca(OH)₂ ละลายได้น้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Mg(OH)₂ ละลายได้น้อยมาก ดังนั้นจึงได้แนวความคิดว่าถ้าสามารถเปลี่ยน MgCl₂ · 6H₂O ในแร่ให้เป็น Mg(OH)₂ ได้ก็จะสามารถแยกแมกนีเซียมออกมาได้ในรูปของ Mg(OH)₂ เพราะ Mg(OH)₂ จะตกตะกอนออกมาเกือบหมดสิ้น ปัญหาที่ต้องคิดก็คือจะใช้วิธีใดจึงจะเปลี่ยน MgCl₂ · 6H₂O ให้เป็น Mg(OH)₂ ได้ วิธีหนึ่งก็คือเติมสารประกอบไฮดรอกไซด์ลงไป สารประกอบไฮดรอกไซด์ที่หาง่ายและราคาถูกก็คือ NaOH หรือ KOH หรือ Ca(OH)₂ แต่วิธีนี้จะก่อให้เกิดปัญหาใหม่คือ

สิ่งที่เติมลงไปจะทำให้ปริมาณ Na หรือ K หรือ Ca ในแร่เพิ่มขึ้น อีกวิธีหนึ่งคือใช้วิธีทางไฟฟ้าโดยใช้หลักเทียบเคียงจากวิธีการผลิตโซดาไฟหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จาก NaCl (รูปที่ 1) นั่นคือ ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลาย NaCl จะได้ NaOH ดังปฏิกิริยา

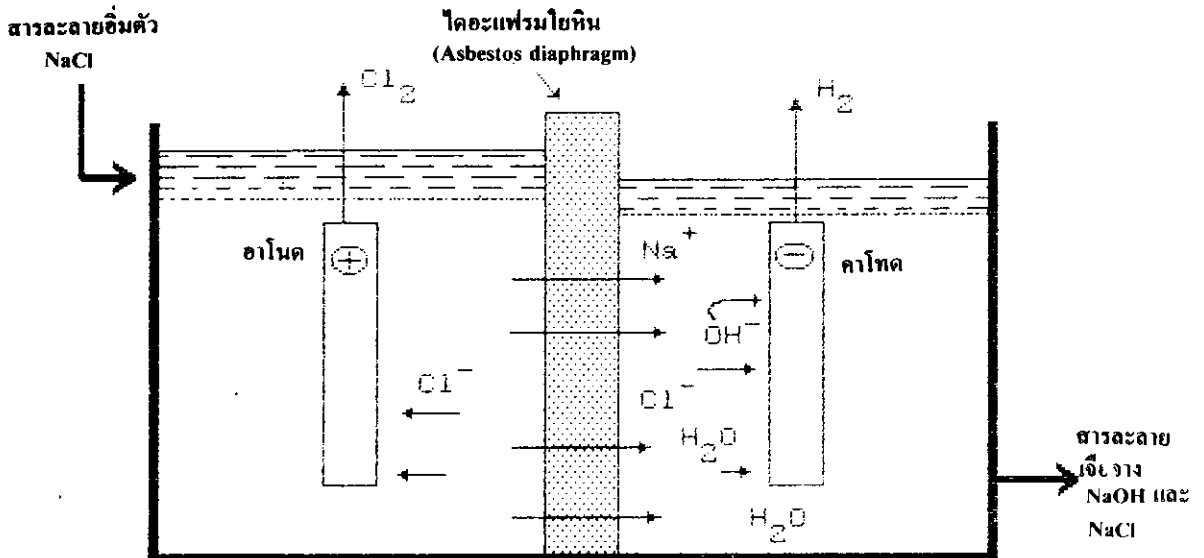


จะเห็นได้ว่าในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อนุมูล Cl⁻ จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจนและอนุมูล OH⁻ ขึ้นในสารละลาย ซึ่งถ้าเป็นสารละลายที่มี NaCl อย่างเดียวก็จะได้ NaOH และก็เป็นวิธีที่ใช้ผลิต NaOH จาก NaCl ในทางอุตสาหกรรมนั่นเอง (ก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนจะถูกแยกออกไปใช้ทำประโยชน์ด้านอื่น เช่น ทำกรดเกลือ⁽⁴⁾) เคยมีการนำวิธีนี้มาทดลองใช้ผลิต NaOH จากน้ำทะเลด้วย⁽⁵⁾ โดยหลักการเดียวกันนี้ถ้าใช้สารละลายแร่คาร์นัลไลต์ปฏิกิริยาน่าจะเกิดในทำนองเดียวกันและอนุมูล OH⁻ ที่เกิดขึ้นในสารละลายก็จะรวมตัวกับอนุมูล Mg²⁺ เป็น Mg(OH)₂ ตกตะกอนแยกออกมา นั่นคือแนวทางที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ นั่นเอง ความจริงในเรื่องของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนี้ยังมีรายละเอียดอื่น ๆ อีก เช่น ค่าความต่างศักย์ ปัญหาการสึกกร่อนที่อิเล็กโทรดและปฏิกิริยาข้างเคียง แต่ได้มีการพูดถึงปัญหา

ตารางที่ 1 การละลายน้ำของสารประกอบของ Na, K, Mg และ Ca⁽²⁾

สารประกอบ	การละลาย (g / น้ำ 100 g)	
	น้ำเย็น	น้ำร้อน (100° C)
NaCl	35.7 (0° C)	39.12
KCl	34.7 (20° C)	56.7
MgCl ₂	54.25 (20° C)	72.7
MgCl ₂ · 6H ₂ O	167	367
CaCl ₂	74.5 (20° C)	159
NaOH	42 (0° C)	347
KOH	107 (15° C)	178
Mg(OH) ₂	0.0009(18° C)	0.004
Ca(OH) ₂	0.185 (0° C)	0.077

• ไม่ได้ระบุอุณหภูมิ



รูปที่ 1 เซลล์ชนิดไดอะแฟรมในการผลิตโซดาไฟ⁽⁵⁾

เหล่านี้แล้วในท้องถิ่น⁽⁵⁻⁶⁾ จึงไม่ขอกล่าวซ้ำอีกในที่นี้

สารเคมี เครื่องมืออุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

สารเคมี

- CaCO_3 , KCl , NaCl , โลหะแมกนีเซียม, HCl ใช้เหมือนกับที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾
- NaOH (AR, EKA Kemi, Sweden) ใช้เตรียมสารละลาย 5 % สำหรับทดสอบเชิงคุณภาพเพื่อตรวจหา Mg^{2+} ในสารละลายหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแต่ละครั้งเพื่อกำหนดจุดยุติของปฏิกิริยา

เครื่องมือและอุปกรณ์

- Atomic absorption spectrophotometer และ Emission spectroscopie ใช้เหมือนกับที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾
- เครื่องเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับ/ตรง (AC to DC power supply) ความต่างศักย์ปรับได้ 1 - 12 โวลต์ ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด L.C. Commercial ประเทศไทยใช้เป็นส่วนประกอบของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในการทดลอง
- หม้อแปลงไฟฟ้าศักย์ต่ำ (High to low voltage transformer) ผลิตโดยบริษัทรุ่งเรืองศุกกิจ จำกัด ประเทศไทย ใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี
- มาตรวัดความต่างศักย์ (Voltmeter) รุ่น MA-18 ผลิตโดยบริษัท Tokyo Meakawa ประเทศญี่ปุ่น ใช้วัดความต่างศักย์ระหว่างการทดลอง
- มาตรวัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter) รุ่น MA-20 ผลิตโดยบริษัท Tokyo Meakawa ประเทศญี่ปุ่น ใช้วัดกระแสไฟฟ้าระหว่างการทดลอง

- ตะแกรงร่อนขนาด 10 เมช (mesh) ทำด้วยทองเหลือง ผลิตโดยบริษัท Endecotts ประเทศอังกฤษ
- เซลล์ไฟฟ้าเคมีหรือเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ทำขึ้นเองดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีแผ่นกรอง (sintered glass plate) เบอร์ 3 ซึ่งมีรูพรุนขนาด 10 - 15 ไมครอน กั้นตรงกลางแบ่งเซลล์ออกเป็น 2 ช่องเพื่อกันไม่ให้ตะกอนที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยาฟุ้งกระจายไปทั่วในสารละลาย

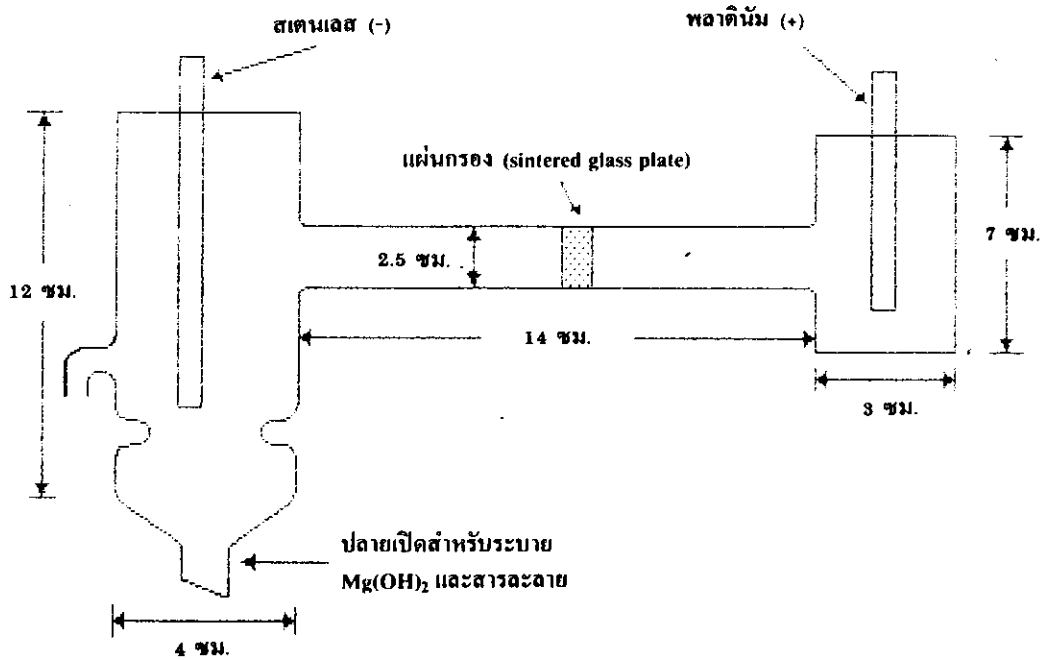
วิธีการทดลอง

1. ตัวอย่างแร่ที่ใช้

เป็นแร่จากแหล่งเดียวกับที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾ นำมาบดให้เป็นเม็ดเล็ก เนื่องจากความแข็งของแร่ไม่สม่ำเสมอเท่ากันจึงมีทั้งส่วนที่เป็นผงละเอียดร่วมกับส่วนที่เป็นเม็ดเล็ก (ขนาดเม็ดทราย) มีลักษณะเป็นผลึกใสปนกันอยู่ ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณก่อนนำแร่ไปทดลองแยกจึงได้แยกทำการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วนเปรียบเทียบกับ คือ แยกเม็ดผลึกใสออก (ข้อ 1.1) และไม่แยก (ข้อ 1.2) ดังนี้

- 1.1 ใช้ตะแกรงขนาด 10 เมช ร่อนแยกส่วนที่เป็นเม็ดและผงร่วนออกจากกัน ส่วนที่เป็นผงร่วนละเอียดกว่า เรียกว่า หิวแร่ ส่วนที่เป็นเม็ดติดค้างอยู่บนตะแกรง เรียกว่า หางแร่ นำแต่ละส่วนไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกัน (ตารางที่ 2)
- 1.2 นำแร่ไปวิเคราะห์โดยตรง โดยไม่ผ่านการร่อน (ตารางที่ 3)

แร่ที่แยกชั้นต้นก่อนโดยการร่อน (ข้อ 1.1) นั้น จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณก่อนการทดลองให้ข้อมูลที่น่าสนใจ กล่าวคือ ส่วนที่เป็นหางแร่ (เม็ดหยาบติดค้างบนตะแกรง) ส่วนใหญ่ (ประมาณ 70 - 80 %) เป็นโซเดียมคลอไรด์ ส่วนหิวแร่ (ผงละเอียด ที่ผ่านตะแกรง) ยังเป็นของผสม



รูปที่ 2 เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลองนี้

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในส่วนหัวและหางแร่จากแร่คาร์นัลไลต์

ส่วนของแร่	การวิเคราะห์ ครั้งที่	KCl (%)	NaCl (%)	MgCl ₂ (%)	CaCl ₂ (%)
หัวแร่	1	27.00	17.36	34.86	0.57
	2	29.00	22.10	37.81	0.26
	3	28.72	19.48	40.21	0.29
	4	31.97	21.29	37.84	0.48
	5	30.59	19.46	43.03	0.52
	X ±SD	29.46±1.90	19.94±1.84	38.75±3.05	0.42±0.14
หางแร่	1	9.14	81.90	6.27	0.54
	2	12.56	78.86	5.25	0.42
	3	11.14	73.86	7.57	0.46
	4	7.54	-	7.45	-
	5	9.21	72.40	-	0.52
	X ±SD	9.92±1.95	76.76±4.41	6.64±1.09	0.48±0.06

- ตัดออกด้วยเกณฑ์ 2.5 d⁽⁹⁾

คล้ายแร่คาร์นัลไลต์อยู่ (ตารางที่ 2) ส่วนแร่ที่ไม่ได้รอน (ข้อ 1.2) มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3

2. การสุ่มตัวอย่างแร่

ใช้วิธีรูปกรวยแบ่งสี่ (Cone and Quatering) ดังที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในแร่คาร์แนลไลต์ (ไม่มีการร่อน)

การวิเคราะห์ครั้งที่	KCl (%)	NaCl (%)	MgCl ₂ (%)	CaCl ₂ (%)
1	20.21	23.71	31.30	0.43
2	22.68	31.89	29.76	0.47
3	24.16	30.61	28.22	0.32
4	21.96	33.06	31.19	0.39
5	23.45	24.48	28.39	0.43
X ± SD	22.49±1.52	28.75±4.35	29.77±1.47	0.41±0.06

8. วิธีการวิเคราะห์

- 8.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพแร่ดิบก่อนนำไปทดลอง เหมือนกับที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾
- 8.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เหมือนกับที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾
- 8.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณแร่ดิบก่อนนำไปทดลอง ดังได้อธิบายมาข้างบนแล้วว่า แร่ที่นำมาทดลองมีลักษณะหยาบจึงนำมาผ่านการแยกชั้นต้นก่อนโดยการร่อนทำให้สามารถแยกแร่ดิบออกเป็นหัวแร่และหางแร่ (ข้อ 1.1) และในขณะเดียวกันได้ทำการวิเคราะห์ควบคู่กันไปโดยใช้แร่ดิบทำการวิเคราะห์โดยตรงโดยไม่มีการร่อน(ข้อ 1.2) ดังนั้นการเตรียมสารละลายแร่เพื่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณจึงมี 3 ชนิด คือ สารละลายจากหัวแร่ สารละลายจากหางแร่ และสารละลายแร่ที่ไม่ร่อน
- ก. การเตรียมสารละลายจากหัวแร่ บดตัวอย่างหัวแร่ที่สุ่มมาแล้วให้ละเอียดโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (เพื่อลดโอกาสที่แร่จะดูดความชื้นจากอากาศ) แล้วชั่งมา 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 0.4 g (ซึ่งอย่างละเอียด) ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml โดยใช้ขวดปริมาตร ทำสารละลายที่ได้ให้มีความเข้มข้น 0.4 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมนั้นใช้สารละลายตั้งต้นโดยตรงซึ่งมีความเข้มข้น 4,000 mg/l
- ข. การเตรียมสารละลายจากหางแร่ บดหางแร่ที่สุ่มมาให้ละเอียดเช่นเดียวกับข้างบน ชั่งมา 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 0.2 g (ซึ่งอย่างละเอียด) ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 50 ml โดยใช้ขวดวัดปริมาตร ทำสารละลายที่ได้ให้เจือจางลง มีความเข้มข้น 0.2mg/l เพื่อหาปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียมและทำให้มีความเข้มข้น 40.0 mg/l เพื่อหาปริมาณแมกนีเซียมส่วนการหาปริมาณแคลเซียมใช้สาร

ละลายตั้งต้นโดยตรงซึ่งมีความเข้มข้น 4,000 mg/l

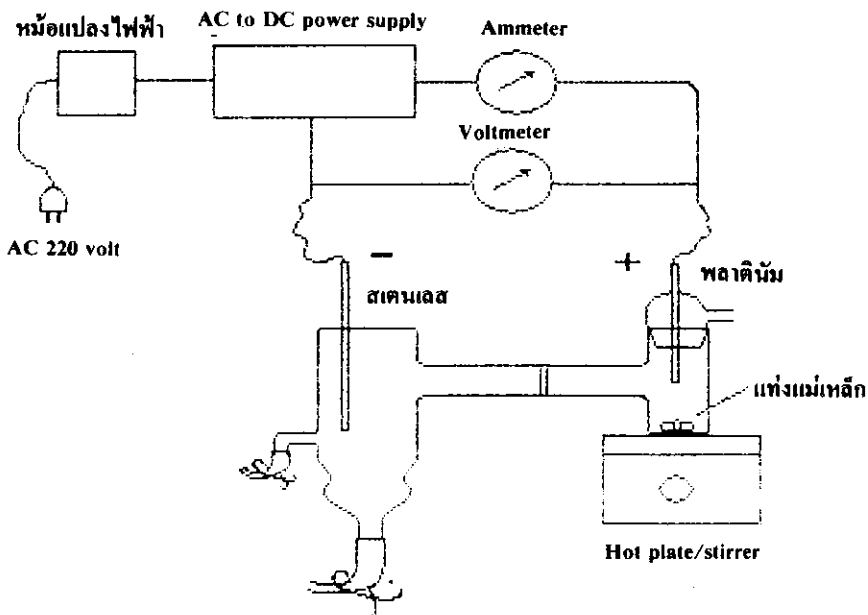
- ค. การเตรียมสารละลายแร่ที่ไม่ร่อน บดแร่ตัวอย่างที่สุ่มมาให้ละเอียดแล้วชั่งมา 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 0.4 g (ซึ่งอย่างละเอียด) ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml โดยใช้ขวดปริมาตร ทำสารละลายที่ได้ให้เจือจางลงมีความเข้มข้น 0.4 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียม โซเดียมและโพแทสเซียม ส่วนการหาปริมาณแมกนีเซียมใช้สารละลายตั้งต้นโดยตรงซึ่งมีความเข้มข้น 4,000 mg/l

4. การแยกแร่โดยวิธีทางไฟฟ้า

อุปกรณ์ต่าง ๆ เมื่อนำมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3 สารละลายที่บรรจุในเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นสารละลายอิมิตัวของแร่คาร์แนลไลต์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์

อิเล็กโทรดทางด้านคาโทดเป็นลวดสเตนเลส ส่วนทางด้านอโนดเป็นลวดโลหะพลาทินัม ก่อนที่จะนำอุปกรณ์นี้ไปใช้งานก็ต้องทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่อุปกรณ์นี้ใช้งานได้ดีที่สุด ตัวแปรที่สำคัญในที่นี้คือค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันตามความต่างศักย์โดยอัตโนมัติและควบคุมไม่ได้ ทำให้มีตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ ค่าความต่างศักย์

- 4.1 การทดลองเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม ในการทดลองเพื่อหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมนี้ ใช้หัวแร่ (จากข้อ 1.1) ประมาณ 90 g ทำให้เป็นสารละลายอิมิตัวด้วยน้ำกลั่นกรองส่วนที่ไม่ละลายน้ำออกนำสารละลายไปใส่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีและเริ่มทำการทดลองตามวิธีกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป การทดลองครั้งแรกเริ่มที่ค่าความต่างศักย์ต่ำสุด คือ 2 โวลต์ แต่ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นจึงเพิ่มความต่างศักย์เป็น 5 โวลต์ ซึ่งจะเริ่มมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยาจะมี ตะกอนขาวของ Mg(OH)₂ เกิดขึ้นทางด้านคาโทด ปลอ่ยให้ ปฏิกิริยาค่าเนินต่อไปจนถึงจุดสิ้น



รูปที่ 3 แสดงการเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

สุดใช้เวลา 2,500 นาที (ประมาณ 41 ชั่วโมง) บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าทุกชั่วโมง เก็บผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาไว้เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป ทำการทดลองซ้ำด้วยสารละลายใหม่แต่ใช้ค่าความต่างศักย์ที่ 10 และ 15 โวลต์ ซึ่งใช้เวลาจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาลิ้นสุด 1,590 และ 1,300 นาที (ประมาณ 27 และ 21 ชั่วโมง) ตาม ลำดับข้อมูลแสดงในตารางที่ 4

4.2 การแยกแร่ แร่ที่นำมาทดลองแยกนั้นเป็นแร่ที่ผ่านการร่อนแล้วและนำมาเฉพาะส่วนที่เป็นหัวแร่ เพราะเป็นส่วนที่มีแมกนีเซียมคลอไรด์มากที่สุด (ดูตารางที่ 2 และเปรียบเทียบ กับตารางที่ 3 ด้วย) มีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ดังนี้
ก. ชั่งหัวแร่ (จากข้อ 1.1) ประมาณ 90 g แล้วทำให้เป็นสารละลายอิ่มตัวโดยใช้น้ำกลั่น

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม

การทดลองที่	ความแตกต่างศักย์ (โวลต์)	น้ำหนักแร่ (g)	ช่วงกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเฉลี่ย (นาที)
1	5.0	90.34	130 - 150	2510	2500
2	5.0	90.35	130 - 150	2490	
3	10.0	90.39	220 - 250	1600	1590
4	10.0	90.39	220 - 250	1590	
5	15.0	90.38	320 - 350	1290	1300
6	15.0	90.41	310 - 360	1300	

- ข. กรองอนุภาคเล็ก ๆ ซึ่งมีเพียงเล็กน้อยและไม่ละลายน้ำออกแล้ว นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการทดลองโดยผ่านกระดาษไฟฟ้า ใช้ความต่างศักย์ 15 โวลต์ ปลดปล่อยปฏิกิริยาดำเนินไปจนถึงจุดสิ้นสุด บันทึกกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าในขณะที่เกิดปฏิกิริยาทุกชั่วโมง ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีควบคุมอุณหภูมิของสารละลายด้านแอโนดให้อยู่ระหว่าง 95 - 98°C พร้อมทั้งคนสารละลายตลอดเวลา เพื่อให้ก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นละลายได้น้อยลง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังสมการ (4)-(7)
- ค. ทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยหลังจากปฏิกิริยาลิ้นสุดในแต่ละครั้ง ถ่ายสารละลายและตะกอนด้านคาโทดออก แล้วเติมสารละลายแอมโมเนียมที่ได้จากการละลายหิวแร่ (จากข้อ 1.1) 70 g ลงแทนที่ด้านคาโทด ส่วนสารละลายด้านแอโนดให้คงเดิมปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ ข. และทำการทดลองซ้ำในลักษณะเดียวกันนี้ รวมทั้งหมด 9 ครั้ง สารละลายและตะกอนที่ได้จากแต่ละครั้งนำไปกรองแยกออกจากกันในข้อ ง.
- ง. กรองตะกอนออกจากสารละลาย นำตะกอนและสารละลายที่ได้จากการกรองไปทำให้แห้ง ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากส่วนที่เป็นตะกอน คือ $Mg(OH)_2$ และผลึกภัณฑ์ที่ได้จากส่วนที่เป็นสารละลายคือ ของผสม $KCl + NaCl$ วิธีการทดลองทั้งหมดนี้สามารถสรุปแสดงเป็นแผนภาพที่ 1

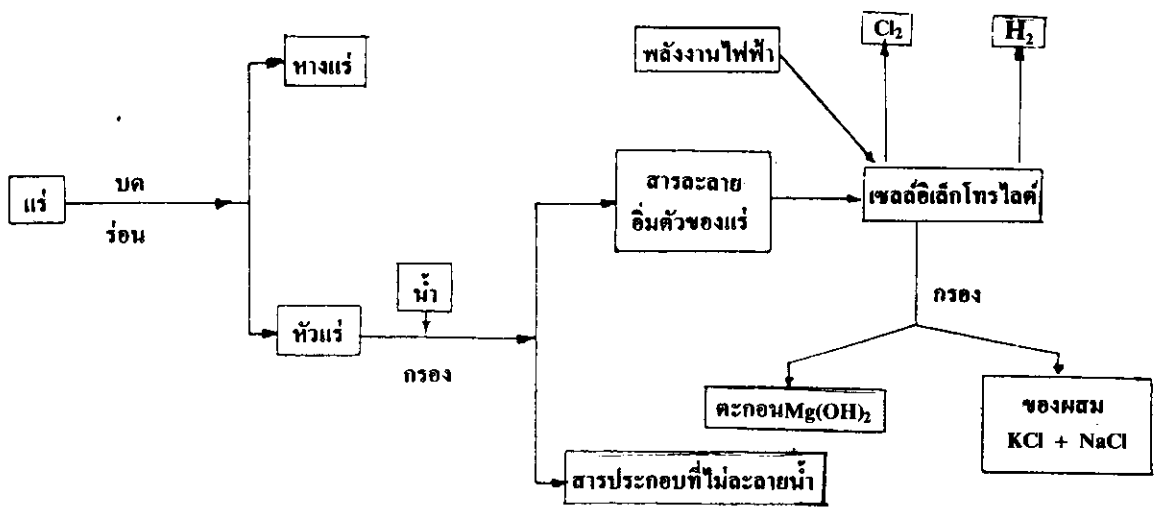
- ที่สุดเติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรเป็น 50 ml โดยใช้ขวดปริมาตรสารละลายตั้งต้นนี้มีความเข้มข้น 2,000 mg/l ทำสารละลายนี้ให้เจือจางลงมีความเข้มข้น 2.0 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียม 12.0 mg/l เพื่อหาปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียม และ 20.0 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาแคลเซียม
- 5.2 ของผสม $KCl + NaCl$ ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของผสม $KCl + NaCl$ ที่อบแห้งแล้วประมาณ 0.3 g (ซึ่งละเอียด) โดยชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากทั้ง 9 การทดลอง การทดลองละ 3 ตัวอย่าง ละลายด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml ทำสารละลายนี้ให้เจือจางลงมีความเข้มข้น 3.0 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียม 150 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาแมกนีเซียม และ 300 mg/l เพื่อวิเคราะห์หาแคลเซียม

- 6. การวิเคราะห์เชิงปริมาณสารละลายด้านแอโนดเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง นำสารละลายด้านแอโนดหลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแล้วมาปรับให้มีปริมาตรเป็น 100 ml ทำสารละลายนี้ให้เจือจางลง โดยแบ่งสารละลายนี้มา 0.1 ml แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียม แบ่งสารละลายที่ได้จากการทำเจือจางมา 2.0 ml ปรับปริมาตรให้เป็น 10 ml เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียม และแบ่งสารละลายตั้งต้นมา 1.0 ml ปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียม

- 5. การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของผลึกภัณฑ์
 - ผลึกภัณฑ์ 2 ชนิดที่ได้ในข้อ ง. นำมาวิเคราะห์ดังนี้
 - 5.1 แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็น $Mg(OH)_2$ ที่อบแห้งแล้วประมาณ 0.1 g (ซึ่งละเอียด) โดยชั่งตัวอย่างของผลิตภัณฑ์จากทั้ง 9 การทดลอง การทดลองละ 3 ตัวอย่าง ละลายด้วยกรดเกลือ (1 : 1 โดยปริมาตร) ในปริมาณที่น้อย

ผลการทดลองและวิจารณ์

- ก. องค์ประกอบของแร่
 - แร่คาร์เนลไลต์ ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ที่บริสุทธิ์ประกอบด้วย KCl และ $MgCl_2$ แต่ความจริงแล้วแร่คาร์เนลไลต์ที่นำมา



แผนภาพที่ 1 แสดงกระบวนการแยกองค์ประกอบของแร่คาร์เนลไลต์

ทดลองมีเกลือหิน (NaCl) ปนอยู่ด้วยในปริมาณค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแร่ดังกล่าวนี้เกิดจากการระเหยของน้ำทะเลในสมัยดึกดำบรรพ์ ซึ่งในน้ำทะเลมีสารประกอบของธาตุต่าง ๆ อยู่มากมายรวมทั้งอินทรีย์สารด้วย

แร่คาร์เนลไลต์ที่นำมาทดลองมีสีชมพูอมแสดและเป็นตัวอย่างเดียวกันกับแร่แหล่งที่ 1 ที่เคยรายงานไว้แล้ว⁽¹⁾ รวมทั้งการทดสอบเชิงคุณภาพก็ได้ผลเช่นเดียวกัน ส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ทดลอง 2 วิธีเปรียบเทียบกัน กล่าวคือ

- วิธีแรกได้แยกแร่โดยการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 10 เมชก่อน สามารถแยกส่วนที่เป็นผลึกขนาดใหญ่ออกจากส่วนที่เป็นผงละเอียด ส่วนที่เป็นผลึกใหญ่นี้เรียกว่า "หางแร่" และส่วนที่เป็นผงละเอียดเรียกว่า "หัวแร่" (การเรียกชื่อนี้ใช้เป็นการเฉพาะในการวิจัยเท่านั้น ส่วนที่เป็น หางแร่ นั้นมี NaCl มาก ถ้าจะพิจารณาว่าแร่คาร์เนลไลต์นั้นมีสูตรเป็น $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ก็อาจถือได้ว่า NaCl เป็นส่วนที่เป็นมลทินปนเข้ามา จึงเรียกส่วนที่มีมลทินมากกว่า หางแร่)

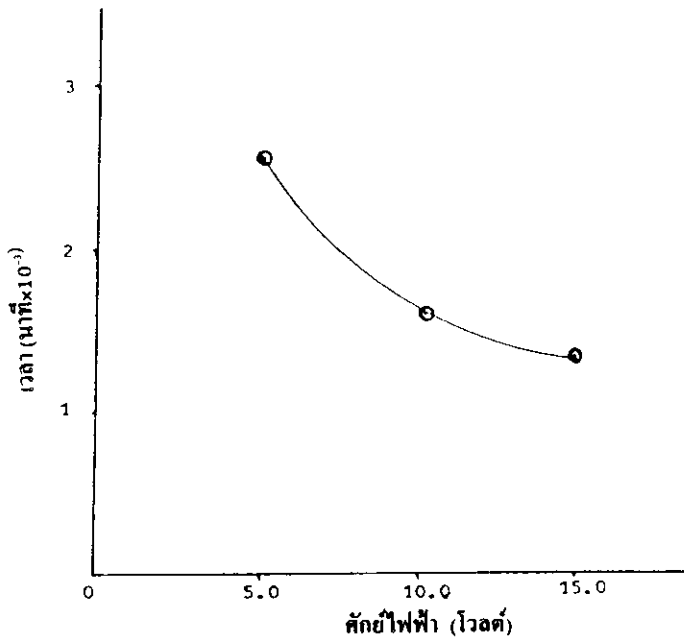
- วิธีที่สองนั้นนำแร่ไปวิเคราะห์ในสภาพเดิมโดยไม่มีการปรับแต่งใด ๆ ทั้งสิ้น ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวิธีแรก (ตารางที่ 2) ส่วนที่เป็นหัวแร่ ซึ่งเป็นผงละเอียดผ่านตะแกรงร่อนลงมานั้นมีแมกนีเซียมคลอไรด์สูงสุด และยังคงมี KCl และ NaCl ปนอยู่ในปริมาณที่มากพอสมควร ส่วนที่เป็นหางแร่ ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกใสและขนาดใหญ่ที่ติดค้างบนตะแกรง มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเกลือหิน (NaCl) และมี KCl กับ $MgCl_2$ ปนอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนในตารางที่ 3 นั้น แสดงองค์ประกอบที่มีอยู่เดิมทั้งหมดในแร่สำหรับใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบ

ข. การทดลองหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม

เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถปรับความต่างศักย์จาก 220 โวลต์เป็น 2, 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ ซึ่งแต่ละค่าสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้แตกต่างกัน (อ่านได้จากเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าที่ต่อไว้ในวงจร) ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ ในการทดลองหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมนี้ ทำการทดลองหลายครั้งและจัดเงื่อนไขการทดลองทุกครั้งเหมือนกันโดยเปลี่ยนเฉพาะศักย์

ไฟฟ้าเท่านั้น และเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ จึงใช้เครื่องเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า (rectifier) เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจึงผ่านเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่สร้างขึ้น ซึ่งมีลวดพลาทินัมและแท่งโลหะสแตนเลสเป็นอิเล็กโทรด และมีสารละลายอิมิตัวของแร่คาร์เนลไลต์เป็นอิเล็กโทรไลต์กระบวนการไฟฟ้าเคมีดังกล่าวนี้มีเครื่องปฏิริยาดังสมการ (1) และ (2) หมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจะรวมกับแมกนีเซียมไอออนในสารละลายแร่เป็น $Mg(OH)_2$ ตกตะกอนลงมา ปลอยให้ปฏิริยาค่าเนินไปจนถึงสิ้นสุด (จุดที่ปฏิริยาลิ้นสุด คือ เมื่อนาสารละลายด้านคาโทดมาทดสอบเชิงคุณภาพด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 5 % (โดยน้ำหนัก) แล้วไม่มีตะกอนขาวของ $Mg(OH)_2$ เกิดขึ้น) จากการทดลองพบว่าที่ค่าความต่างศักย์ 2 โวลต์ ไม่มีปฏิริยาเกิดขึ้น แต่ถ้าเพิ่มค่าความต่างศักย์ให้สูงขึ้นจะเริ่มมีปฏิริยาประสิทธิภาพในการเกิดปฏิริยาค่าเนินเมื่อความต่างศักย์สูงขึ้น ผลการทดลองสรุปแสดงในตารางที่ 4 และแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าภายใต้สภาวะการทดลองนี้ ถ้าใช้ค่าความต่างศักย์สูงสุด คือ 15 โวลต์ จะใช้เวลาในการทำปฏิริยาน้อยที่สุด สภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่ใช้ในการทดลองครั้งต่อ ๆ ไป เมื่อใช้กับแร่คาร์เนลไลต์ด้วย ซึ่งข้อมูลจากการทดลองกับแร่ได้สรุปแสดงไว้ในตารางที่ 5

ในทางทฤษฎีนั้นค่าความต่างศักย์สำหรับครึ่งปฏิริยา (1) และ (2) รวมกันแล้วจะมีค่าเพียง 2.2 โวลต์ เท่านั้น⁽⁵⁾ แต่ในขณะที่เกิดปฏิริยาจะมีผลข้างเคียงอื่น ๆ เกิดขึ้นอีก เช่น ความต้านทานภายในของเซลล์และความต่างศักย์เกิน (over voltage) ที่ขั้วไฟฟ้าเป็นต้น ทำให้ค่าความต่างศักย์สำหรับใช้งานจะสูงกว่า 2.2 โวลต์ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างบนพร้อมทั้งข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 4 จะเห็นว่าที่ค่าความต่างศักย์ 5 โวลต์ ความจริงก็มีปฏิริยาเกิดขึ้นแล้ว แต่ที่สรุปว่าจะใช้ค่าความต่างศักย์ 15 โวลต์นั้น เป็นเพราะใช้เวลาน้อยกว่าที่ค่าความต่างศักย์ 5 และ 10 โวลต์ นั่นเอง อนึ่ง จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์ชุดนี้มีค่าน้อยมาก และแปรผันตามค่าความต่างศักย์ที่ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้านี้จะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิริยา การใช้ค่าความต่างศักย์สูง 15 โวลต์ จะได้ปริมาณกระแสมากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิริยาเร็วขึ้น และจะเห็นว่าสัดส่วนที่กระแสเพิ่มขึ้นกับความเร็วในการเกิดปฏิริยาค่อนข้างจะสอดคล้องกันมากที่สุด สำหรับในอุตสาหกรรมผลิต NaOH



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้า และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจนถึงสิ้นสุด ในการทดลองหาความต่างศักย์ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 5 ข้อมูลจากการทดลองแยกแร่

	การทดลองที่								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
น้ำหนักแร่(g)	90.28	70.11	70.75	70.21	70.02	70.44	70.12	70.07	70.08
เวลาที่ใช้(นาที)	1320	1300	1280	1270	1260	1250	1310	1360	1370
ช่วงกระแส(มิลลิแอมแปร์)	330-350	320-360	330-350	330-340	330-370	340-380	330-350	320-340	320-340
Mg(OH) ₂ (g)	18.35	17.00	16.85	15.84	15.26	14.36	14.24	14.25	13.95
(% น.น.)	20.32	24.25	23.82	22.56	21.79	20.39	20.31	20.34	19.91
ของผสม KCl + NaCl (g)	35.49	35.49	33.89	33.26	30.31	30.49	30.55	30.83	30.10
(% น.น.)	39.31	50.62	47.90	47.37	43.29	43.28	43.57	44.00	42.95
สารไม่ละลายน้ำ (g)	1.35	1.88	1.21	1.25	1.25	1.27	1.34	1.34	1.18
(% น.น.)	1.49	2.88	1.71	1.78	1.78	1.80	1.91	1.91	1.68

(% น.น. เทียบจากแร่ดิบที่ใช้แต่ละครั้ง)

นั้นจะใช้อุปกรณ์ที่ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพียง 4.2 โวลต์ แต่สามารถให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าได้สูงมากประมาณ 42,000 - 50,000 แอมแปร์⁽⁴⁾ ในขณะที่ในการทดลองนี้กระแสไฟฟ้าสูงสุด (จากตารางที่ 4) ที่เกิดขึ้นมีค่าเพียง 360 มิลลิแอมแปร์เท่านั้น

ค. การแยกแร่

ในการแยกแร่โดยกระบวนการทางไฟฟ้า ระหว่างเกิด

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดอนุมูล OH⁻ ในสารละลาย เนื่องจากในสารละลายมีแมกนีเซียมคลอไรด์ละลายอยู่ แมกนีเซียมจะอยู่ในรูปของอนุมูล Mg²⁺ จะรวมกับอนุมูล OH⁻ กลายเป็น Mg(OH)₂ ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก (ตารางที่ 1) ดังนั้น Mg(OH)₂ จะตกตะกอนออกมาเป็นตะกอนละเอียดสีขาวบริสุทธิ์ทางด้านคาโทดและสามารถแยกออกมาได้โดย

การกรอง สารละลายจากการกรองจะยังคงมีโพแทสเซียมและโซเดียมซึ่งอยู่ในรูปของอนุมูล K^+ และ Na^+ ตามลำดับ เนื่องจากการประกอบของโพแทสเซียมและโซเดียมไม่ว่าจะเป็น KOH, KCl, NaOH หรือ NaCl ล้วนละลายน้ำได้ดีทั้งสิ้น ดังนั้น ในขั้นนี้จะไม่สามารถแยกโพแทสเซียมและโซเดียมได้อีกต่อไป ในสารละลายส่วนนี้จึงเป็นของผสมระหว่างสาร

ประกอบของโพแทสเซียมและโซเดียม เมื่อนำสารละลายมาระเหยให้แห้งจะได้ของแข็งสีขาวออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งก็คือของผสมระหว่างสารประกอบของโพแทสเซียมและโซเดียม นั่นเอง จากการตั้งต้นด้วยแร่คาร์นิไลต์ ประมาณ 90 g จะได้ $Mg(OH)_2$ ประมาณ 18 g ของผสมของสารประกอบโพแทสเซียมกับโซเดียมประมาณ 35 g และสารเจือ

ตารางที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ $Mg(OH)_2$

การทดลองที่	Mg (OH) ₂ (%)	สิ่งเจือปน		
		Na (%)	K (%)	Ca (%)
1	93.49	0.12	2.57	0.57
2	93.42	0.77	1.84	0.51
3	95.56	0.45	1.31	0.33
4	93.42	0.92	1.71	0.44
5	97.40	0.76	0.20	0.38
6	96.55	0.55	0.64	0.39
7	97.25	0.68	0.04	0.59
8	94.82	0.43	0.05	0.64
9	98.69	0.24	0.02	0.34
X ± SD	95.62±1.97	0.55±0.26	†	0.46±0.12

† การล้างตะกอนในการทดลองครั้งแรก ๆ ทำได้ไม่ดี (ดูค่าอธิบายในย่อหน้าแรกของหน้า 135)

ตารางที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์ของผสม KCl + NaCl

การทดลองที่	KCl (%)	NaCl (%)	สิ่งเจือปน	
			Mg (%)	Ca (%)
1	59.76	41.77	0.49	0.47
2	60.15	39.66	1.05	0.62
3	60.68	38.40	1.12	0.63
4	59.42	39.18	0.83	0.64
5	60.62	38.68	0.78	0.62
6	61.87	38.49	1.51	0.58
7	61.34	38.76	1.27	0.09
8	60.43	37.90	1.62	0.24
9	60.71	38.18	1.85	0.31
X ± SD	60.55±0.75	39.00±1.16	1.17±0.44	0.47±0.20

ปน (มลทิน) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำประมาณ 1 g (ปริมาณสารที่ได้นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของแหล่งแร่) เวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้า ประมาณ 21 - 22 ชั่วโมง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขณะเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 320 - 360 มิลลิแอมแปร์ ดังข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 5

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง มี 2 ชนิด คือ ส่วนที่เป็นตะกอนขาวละเอียด ซึ่งก็คือ $Mg(OH)_2$ และส่วนที่เป็นสารละลายซึ่งเมื่อทำให้แห้งจะได้ของผสมระหว่าง $KCl + NaCl$ ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของ 2 ส่วนนี้แสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 จะเห็นว่าการทดลองครั้งแรก ๆ ปริมาณ K^+ ที่ปนอยู่ใน $Mg(OH)_2$ มีค่าค่อนข้างสูงที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากการทดลองครั้งแรก ๆ นั้นการล้างตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร ทำให้มี K^+ หลงเหลืออยู่มาก (ล้าง 3 ครั้ง) ส่วนในการทดลองครั้งหลัง ๆ การล้างตะกอนล้างซ้ำหลาย ๆ ครั้งมากขึ้น

ประสิทธิภาพในการแยกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในการทดลองนี้อาจพิจารณาได้จากปฏิกิริยา



ซึ่งจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าหัวแร่ที่นำมาทดลองนั้นมี $MgCl_2$

38.75 % โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้านำมาคิดรวมในเชิงปริมาณสัมพันธ์กับปฏิกิริยาที่ (4) จะได้ว่า ถ้าตั้งต้นด้วยแร่ 100 g ซึ่งมี $MgCl_2$ 38.75 g จะได้ $Mg(OH)_2$ 23.66 g และผนวกกับข้อมูลบางส่วนจากตารางที่ 5 จะทำให้สามารถคำนวณประสิทธิภาพในการผลิตหรือผลได้ (yield) เท่ากับ 91.03 % ดังแสดงในตารางที่ 7

จากตารางที่ 7 อาจกล่าวได้กว้าง ๆ ว่าการทดลองในแนวทางนี้ ในทางปฏิบัติจะสามารถแยกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ออกมาจากแร่ได้ประมาณ 91 % ของปริมาณที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีและเมื่อผนวกกับข้อมูลในตารางที่ 6.1 ก็จะทราบว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่แยกออกมานี้มีความบริสุทธิ์ 95.62 %

ง. ผลการวิเคราะห์สารละลายค้ำานไอโคหลังจากปฏิกิริยาลิ้นสุด

การแยกแร่โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีนี้ได้ทำเป็นกระบวนการต่อเนื่อง กล่าวคือเมื่อปฏิกิริยาในการทดลองแต่ละครั้งสิ้นสุดลงก็ทำการถ่ายสารละลายและตะกอน $Mg(OH)_2$ ด้านคาโทดออกไป (เพื่อนำไปกรองและทำให้แห้งต่อไป)

ตารางที่ 7 แสดงประสิทธิภาพในการผลิต $Mg(OH)_2$

	การทดลองที่								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(1)น.น. แร่ (g)	90.28	70.11	70.75	70.21	70.02	70.44	70.12	70.07	70.08
(2) $MgCl_2$ ในแร่ (g) (calc.)	34.98	27.17	27.42	27.21	27.13	27.29	27.17	27.15	27.16
(3) $Mg(OH)_2$ (g) (calc.)	21.36	16.57	16.73	16.60	16.55	16.65	16.57	16.56	16.57
(4) $Mg(OH)_2$ (g) (exp.)	18.35	17.00	16.85	15.84	15.26	14.36	14.24	14.25	13.95
(5) % ผลได้ †	85.91	102.60	100.72	95.42	92.20	86.25	85.94	86.05	84.19
(6) % ผลได้เฉลี่ย จาก (5)	91.03 ± 7.03								

† % ผลได้ คำนวณจาก $\{(4)/(3)\} \times 100$

ตารางที่ 8 ปริมาณมวลสารตกค้างค้ำานไอโค (คิดในรูปสารประกอบคลอไรด์)

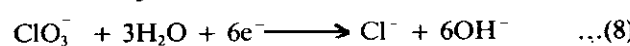
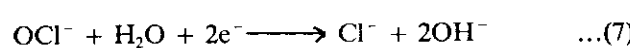
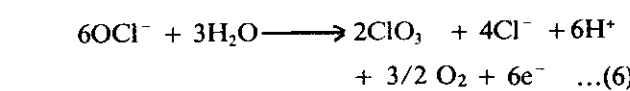
น้ำหนักแร่ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (g)	KCl (%)	NaCl (%)	$MgCl_2$ (%)	$CaCl_2$ (%)
652.12	0.09	0.14	0.06	0.01

ริบเติมสารละลายแอมโมเนียมตัวชุดใหม่ลงแทนที่ด้านคาโทดทันที
ปล่อยให้กระแสไหลผ่านเป็นการเริ่มปฏิกิริยาใหม่อีกชุดหนึ่ง
โดยที่เก็บสารละลายด้านแอนโอดให้คงที่ไว้ ทำการทดลองใน
ลักษณะเช่นนี้เรื่อยไป จนได้การทดลองครบตามต้องการ
ในครั้งสุดท้ายนี้จึงได้นำสารละลายที่ด้านแอนโอดนี้ไปวิเคราะห์
ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่าสารละลาย
ทางด้านแอนโอดนี้มีมวลสารตกค้างอยู่น้อยมากจนถึงได้ว่าไม่มี
ความสำคัญ

จ. วิจารณ์

ในปฏิกิริยารวม (3) นั้นจะเห็นได้ว่ามีก๊าซคลอรีนและ
ก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย แต่เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มุ่ง
ศึกษาเฉพาะ $Mg(OH)_2$ และของผสม $KCl + NaCl$ จึงมิได้
หาทางใช้ประโยชน์ก๊าซทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้น ในความเป็นจริง
ถ้าเป็นระดับอุตสาหกรรม ก๊าซทั้งสองชนิดนี้ยังสามารถนำไป
ใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้อีกมากมาย หนึ่งใน การทดลองนี้
ถ้าจะเก็บก๊าซทั้งสองชนิดนี้ด้วย ปัญหาที่จะตามมาคือ จะต้อง
มีการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองใหม่เพื่อให้แยกก๊าซ
ออกมาเก็บไว้ต่างหากได้ อย่างไรก็ตามแม้จะมีได้นำมาใช้
ประโยชน์ แต่ก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นนี้ก็ส่งผลต่อการออกแบบ
อุปกรณ์การทดลองและเงื่อนไขในการทดลองในงานนี้อย่าง
เห็นได้ชัด กล่าวคือ ก๊าซคลอรีนละลายน้ำได้บ้าง เช่น ที่ $0^{\circ}C$
จะละลายได้ 1.46 g/น้ำ 100 g และที่ $30^{\circ}C$ ละลายได้ 0.57 g/น้ำ
100 g⁽⁷⁾ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงก๊าซคลอรีนจะละลายน้ำได้
น้อยลง ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงใช้อุณหภูมิประมาณ $95 - 98^{\circ}C$
(ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิต $NaOH$ ก็ใช้อุณหภูมิ $95^{\circ}C$
เช่นกัน⁽⁸⁾) เพื่อให้ก๊าซคลอรีนระเหยออกไปจากสารละลายใน
เซลล์ไฟฟ้าให้มากที่สุด มิฉะนั้น จะทำให้ประสิทธิภาพของการ
เกิดปฏิกิริยาลดลง

ประสิทธิภาพที่ลดลงนี้เกิดจากปฏิกิริยาของก๊าซคลอรีน
กับอนุมูล OH^- หรืออนุมูลอื่น ๆ ในสารละลายเดียวกัน ดังนี้
 $Cl_2 + OH^- \longrightarrow HClO + Cl^- \dots(5)$
กรดไฮโปคลอริก ($HClO$) จากปฏิกิริยานี้ อาจเกิดปฏิกิริยาได้
ต่อไป ดังนี้



เป็นต้น ปฏิกิริยา (5) และ (6) เกิดที่ด้านแอนโอด ส่วนปฏิกิริยา
(7) และ (8) เกิดที่ด้านคาโทด สองปฏิกิริยาแรก ((5) และ
(6)) จะทำให้ปริมาณ OH^- ในสารละลายลดลงถ้าไม่ป้องกัน
ในส่วนนี้จะมีผลทำให้การเกิดตะกอน $Mg(OH)_2$ น้อยลงไปด้วย

ด้วยปัญหาที่กล่าวมานี้ในขณะที่ทำการทดลองจึงควบคุม
อุณหภูมิสารละลายด้านแอนโอดให้สูงประมาณ $95 - 98^{\circ}C$ เพื่อ
ไล่ก๊าซคลอรีนออกจากระบบให้มากที่สุด นอกจากนี้ได้ออก
แบบเซลล์ให้สารละลายที่ด้านแอนโอดและคาโทดแยกจากกัน
(ถ้าป้อนอยู่ในภาชนะเดียวกัน โอกาสที่สูญเสียอนุมูล OH^-
จะมีมากขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยา (5) และต่อ ๆ ไป) และมีแผ่น
กรองที่เป็นรูพรุน (sintered glass plate) กั้นไว้ แผ่นกรองนี้
เป็นการป้องกันการผสมปนกันทางกายภาพเท่านั้น แต่อนุมูล
หรือไอออนที่อยู่ในสารละลายยังคงสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุน
นี้ได้ตามปกติ เวลาเกิดตะกอน $Mg(OH)_2$ ขึ้นจะเป็นผงละเอียด
ขาวไหลลงไปทั่วเซลล์ที่ด้านคาโทด ถ้าไม่มีแผ่นกรองนี้กั้นไว้
ตะกอนจะแผ่กระจายไปทั่ว รวมทั้งไป ที่ด้านแอนโอดด้วย การมี
แผ่นกรองนี้กั้นไว้ทำให้ตะกอนถูกจำกัดไว้เฉพาะที่ด้านคาโทด
เท่านั้นและทำให้สะดวกต่อการแยก เฉพาะตะกอน $Mg(OH)_2$
ออกมาในภายหลังเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด โดยไม่ต้องเคลื่อนย้าย
หรือถอดอุปกรณ์ส่วนอื่น ๆ เลย การทำปฏิกิริยาติดต่อกหลาย ๆ
ครั้งเชิงสะสมจึงเป็นไปได้โดยสะดวก และโอกาสผิดพลาดก็
มีน้อยลง

ตะกอน $Mg(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นนี้จะละเอียดมาก การกรอง
ควรใช้วิธีการกรองแบบอาศัยความโน้มถ่วง (gravitational
filtration) แม้จะช้า แต่ก็ให้ผลดีกว่าเพราะถ้าจะกรองแบบลด
ความดันตะกอนละเอียดจะอุดตันกระดาษกรอง

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้จ่าย
กระแสไฟฟ้าได้ต่ำมาก ทำให้การทดลองแต่ละครั้งต้องใช้เวลา
นาน ถ้าสามารถปรับปรุงอุปกรณ์ให้สามารถจ่ายกระแสได้
มากที่ค่าความต่างศักย์ต่ำกว่านี้ คาดว่าประสิทธิภาพในการ
แยก $Mg(OH)_2$ น่าจะดีขึ้นกล่าวคือ ใช้เวลาน้อยลงและการสูญเสีย
เปล่าทางด้านพลังงานน่าจะลดลงด้วย

สรุป

แร่คาร์เนลไลต์จากแหล่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ
ประเทศไทยเป็นของผสมซึ่งประกอบด้วย $KCl, MgCl_2 \cdot 6H_2O$
และ $NaCl$ จากการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าสามารถแยก
แมกนีเซียมออกมาได้ในรูปของ $Mg(OH)_2$ ซึ่งละลายน้ำได้น้อย

มาก จึงตกตะกอนและทำให้แยกออกมาจากส่วนอื่น ๆ ได้ ประสิทธิภาพในการแยก $Mg(OH)_2$ โดยวิธีนี้ประมาณ 91 % และ $Mg(OH)_2$ ที่ผลิตได้นี้มีความบริสุทธิ์ประมาณ 95 % ส่วน KCl และ NaCl นั้นยังปนกันอยู่โดยมี KCl ประมาณ 60 % และ NaCl ประมาณ 39 % และยังไม่สามารถแยกออกจากกันได้ในทางทดลองนี้

เอกสารอ้างอิง

1. มาฆะ ทิพย์ศิริ และสัมพันธ์ วงศ์นาวา, "การแยกโซเดียมคลอไรด์ โพลทสเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์จากแร่คาร์เนลไลต์ โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์", ว.สงขลานครินทร์, 10:23 - 32 (2531).
2. R.C.Weast, "Handbook of Chemistry and Physics", 49th Edn., The Chemical Rubber Co., Ohio, 1968, pp. B186 - 246.
3. S.F.Estefan, "Controlled Phase Equilibria for the Chemical Utilization of Sea-bittern", Hydrometallurgy, 10:39 - 45 (1983).
4. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, "การผลิตโซดาไฟ", เอกสารอ่านประกอบวิชาเคมี, ฉบับร่างครั้งที่ 1, 2517, หน้า 1 - 11.
5. S.Venkatesh and B.V.Tilak, "Chlor-Alkali Technology", J.Chem. Educ., 60:276 - 8 (1983).
6. อนันต์เศวต เทวซึ่งเจริญ, "การผลิตโซดาไฟและคลอรีนโดยขบวนการไฟฟ้าเคมี", เอกสารอัดสำเนา, 2524, หน้า 6 - 10.

7. Ref. 2, p. B192.

8. D.A.Skoog and D.M.West, "Fundamentals of Analytical Chemistry", Holt, Rinehart and Winston, New York, 1963, pp. 51,57 - 60.

Abstract. Yooprasert, B¹., Boonsin, P².and Wongnawa, S³: 1990 Separation of magnesium hydroxide from carnallite by electrolytics method. Songklanakarín J. Sci. Technol. 12(2): 125 - 137

The electrolytic process was used to separate magnesium chloride from carnallite ore in the form of magnesium hydroxide. During the experiment OH^- ion was produced in the solution and combined with Mg^{2+} ion to form magnesium hydroxide. Due to its very low solubility (0.004 g/H₂O 100 g at 100°C) magnesium hydroxide could be separated quite readily by precipitation from other components. The yield of magnesium hydroxide was about 91 % with 95 % purity. KCl and NaCl in ore, however, were not separated and still remained as mixture at the end of the experiment.

Key words: Magnesium hydroxide, Magnesium chloride, Carnallite, Electrolytic,

¹Sungai Padi High School, Sungai Padi, Narathiwat 96140, ^{2,3}Department of Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkhla University, Hat Yai Campus, Songkla 90110, THAILAND.

*Author to whom correspondence should be addressed.