



บทที่ 5

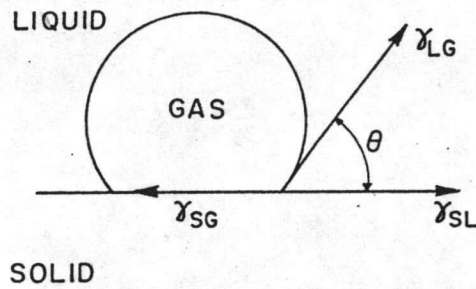
การลอยแร่เฟลด์สปาร์

5.1 พื้นฐานและกลไกการลอยแร่ (146-163)

พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการลอยแร่ คือ ความแตกต่างทางคุณสมบัติพื้นผิวด้านเคมี-กายภาพของแต่ละชนิดแร่ ซึ่งได้แปรเปลี่ยนหลังจากการทำปฏิกิริยากับสารเคมี และจะทำให้แร่บางชนิดไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) การลอยแร่เกิดขึ้นได้เมื่อมีฟองอากาศเกาะติดกับเม็ดแร่ไม่เปียกน้ำนี้ แล้วนำขึ้นสู่ผิวเซลล์ลอยแร่ กลไกของการทำให้ผิวแร่ไม่เปียกน้ำนั้นสามารถสร้างขึ้นได้โดยสารเคลือบผิว (Collector), สารกระตุ้น (Activator), สารกด (Depressant) และสารปรับสภาพกรด-ด่าง (pH Regulator) ซึ่งจะช่วยให้กลไกดังกล่าวสัมฤทธิ์ผล และเมื่อทำให้ฟองอากาศเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายในเซลล์ลอยแร่ ฟองอากาศก็จะมีโอกาสยึดติดกับเม็ดแร่ และมีความคงตัวพอเพียงต่อแรงต่อต้านต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ลอยแร่ นำเม็ดแร่ลอยขึ้นสู่ผิวเซลล์ลอยแร่ได้

5.1.1 เคมีการลอยแร่ (Chemistry of Flotation) (166)

การลอยแร่เกี่ยวข้องกับกลุ่มฟองอากาศ และเม็ดแร่ในตัวกลางสารละลาย โดยมีการยกตัวของกลุ่มฟองซึ่งยึดติดกับผิวแร่และนำเม็ดแร่สู่พื้นผิว ผิวเม็ดแร่มีระดับ (Degree) ของการเปียกน้ำแตกต่างกัน เนื่องจากความมีขั้ว (Polarity) ซึ่งเกิดจากพันธะเคมี (Bond) ของแร่แต่ละชนิดดังแสดงตามตารางที่ 5.1 การเกาะติด (Attachment) ของฟองอากาศกับผิวแร่ จะแสดงถึงความคงตัวได้ในลักษณะมุมสัมผัส (Contact Angle) ซึ่งเป็น 3 สถานะ คือ อากาศ (Gas), ของแข็ง (Solid) หรือผิวเม็ดแร่ และของเหลว (Liquid) ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สมดุลย์ของมุมสัมผัสระหว่างฟองอากาศ และผิวของแข็ง
ในของเหลว⁽¹⁶⁶⁾

ตารางที่ 5.1

ลำดับความมีขั้ว (Polarity) ของแร่ชนิดต่าง ๆ⁽¹⁶⁷⁾

<i>Group 1</i>	<i>Group 2</i>	<i>Group 3(a)</i>	<i>Group 4</i>	<i>Group 5</i>
Galena	Barite	Cerrusite	Hematite	Zircon
Covellite	Anhydrite	Malachite	Magnetite	Willemite
Bornite	Gypsum	Azurite	Goethite	Hemimorphite
Chalcocite	Anglesite	Wulfenite	Chromite	Beryl
Chalcopyrite			Ilmenite	Feldspar
Stibnite		<i>Group 3(b)</i>	Corundum	Sillimanite
Argentite		Fluorite	Pyrolusite	Garnet
Bismuthinite		Calcite	Limonite	Quartz
Millerite		Witherite	Borax	
Cobaltite		Magnesite	Wolframite	
Arsenopyrite		Dolomite	Columbite	
Pyrite		Apatite	Tantalite	
Sphalerite		Scheelite	Rutile	
Orpiment		Smithsonite	Cassiterite	
Pentlandite		Rhodochrosite		
Realgar		Siderite		
Native Au, Pt, Ag,		Monazite		
Cu				

หมายเหตุ :- แร่แต่กลุ่มจะมีระดับของความมีขั้วเพิ่มขึ้นจากกลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ 5 และระดับความมีขั้วจะเพิ่มขึ้นจากบนลงล่างในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งหมายถึงความง่ายในการเปียกน้ำ และยากในการลอยแร่เพิ่มขึ้นด้วย ตามลำดับ

เมื่อฟองอากาศเกาะไม่ติดกับผิวแร่ มุมสัมผัสจะเป็นศูนย์และหากมีการเกาะติดอย่างดีก็จะมีมุมสัมผัส 180° (องศา) (ซึ่งไม่มีในแร่ที่เกิดตามธรรมชาติ) ค่าของมุมสัมผัสเป็นดัชนีบ่งชี้ว่าผิวแร่เปียกน้ำ (Hydrophillic) มากน้อยเพียงใด หรืออีกนัยหนึ่งแสดงลักษณะการไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) ของผิวแร่นั่นเอง

โดยธรรมชาติมีมุมสัมผัสของแร่จะค่อนข้างน้อย นั่นคือ แร่ทั่ว ๆ ไปมักจะเปียกน้ำ ซึ่งจะต้องใช้สารเคมีทำการดูดซับ (Adsorption) ที่ผิวแร่ ซึ่งมีการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) และ/หรือการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) ซึ่งจะทำให้ผิวแร่แสดงลักษณะไม่เปียกน้ำ สารเคมีที่ใช้นี้เรียกทั่วไปว่า สารเคลือบผิว (Collector) จากลักษณะ 3 สถานะดังรูปที่ 5.1 สามารถอธิบายโดยสมการของยัง (Young's Equation) ดังนี้คือ

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad \dots(5.1)$$

$$\gamma_{SG} = \text{แรงตึงผิวระหว่างผิวของของแข็งและอากาศ}$$

$$\gamma_{SL} = \text{แรงตึงผิวระหว่างผิวของของแข็งและของเหลว}$$

$$\gamma_{LG} = \text{แรงตึงผิวระหว่างผิวของของเหลวและอากาศ}$$

$$\theta = \text{มุมสัมผัส}$$

พลังงานอิสระ (Free Energy) ที่เปลี่ยนแปลงต่อพื้นที่ (ΔG) สอดคล้องกับการเกาะติด (Attachment) ลักษณะเช่นนี้ หรือการแทนที่ของเหลวโดยฟองอากาศ แสดงโดยสมการของดูปรี (Dupre's Equation) คือ

$$\Delta G = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad \dots(5.2)$$

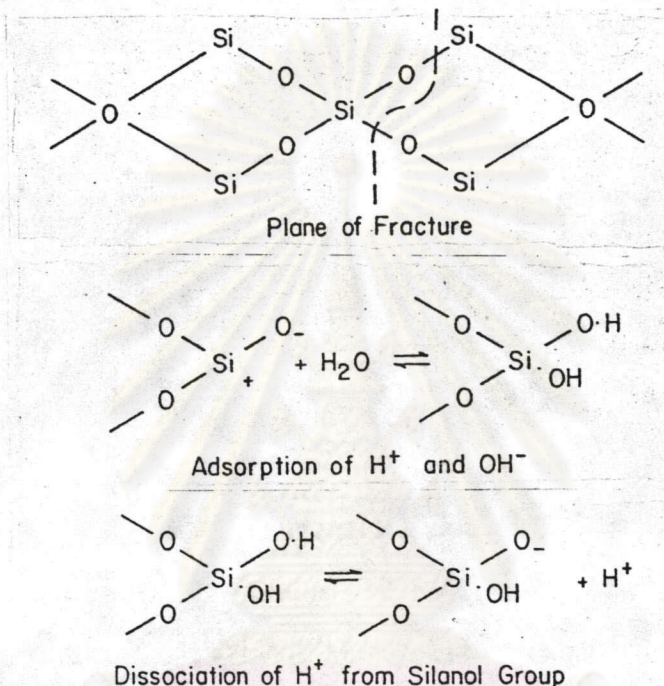
$$\text{และ } \Delta G = \gamma_{LG} (\cos \theta - 1) \quad \dots(5.3)$$

จากสมการที่ (5.3) แสดงให้เห็นว่าหากค่ามุมสัมผัสมาก ก็จะทำให้พลังงานอิสระ (ΔG) มีค่าติดลบมาก หรือเกิดการแทนที่ของเหลวโดยฟองอากาศได้ดี

เมื่อของแข็ง หรือแร่ อยู่ในสารละลาย (หรือของเหลว) ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแร่ซิลิกาอยู่ในน้ำจะเกิดแรงจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซิลิโหนด (Silanol, SiO.H) ซึ่งก่อตัวเป็นลักษณะผิวเปียกน้ำ (Hydrophillic) โดยเกิดประจุซึ่งก่อให้เกิดการแยก (Charge Separation) ระหว่างผิวของของแข็งและสารละลาย ทำให้ของแข็งแสดงประจุพื้นผิว (Surface Charge) กับสารละลาย อาจมีการเคลื่อนย้ายประจุพื้นผิวไปมาและกระจายตัวรอบ ๆ พื้นผิวภายในสารละลาย และประจุพื้นผิวเป็นประจุไฟฟ้าที่สามารถเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ

ของแข็งได้หลายกลไก ดังนี้ :-

i) อันตรกิริยาเจาะจงทางเคมี (Specific Chemical Interaction) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เป็นอันตรกิริยาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีของของแข็งกับสารละลาย ซึ่งก่อให้เกิดพื้นผิวของแข็งที่มีคุณสมบัติต่างไปจากเดิม มักเกิดขึ้นกับแร่ออกไซด์, ซิลิเกต และเกลือกึ่งละลายได้ (Semi-soluble Salt) เมื่ออยู่ในน้ำ รูปที่ 5.2 แสดงกลไกในลักษณะนี้ที่เกิดขึ้นกับแร่ควออตซ์



รูปที่ 5.2 ประจุพื้นผิวที่เกิดขึ้นบนผิวแร่ควออตซ์เมื่ออยู่ในน้ำ (168-169)

รูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวแร่ควออตซ์เกิดการดิสโซซิเอต (Silicic Acid) หรือซิลินอล (Silanol, $SiO.H$) ซึ่งแตกตัวให้ไฮดรอกซิลไอออน (H^+) ในสารละลาย ทำให้พื้นผิวของแร่ควออตซ์เกิดกลุ่มประจุลบ และถ้าไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาจะย้อนกลับ นั่นคือ พื้นผิวจะกลับไปเป็นประจุบวก จึงกล่าวได้ว่า ไฮดรอกซิลไอออน เป็นไอออนกำหนดศักดาพื้นผิว (Potential Determining Ion) ของแร่กลุ่มนี้ อีกนัยหนึ่งคือ ประจุพื้นผิวและความต่างศักดาพื้นผิว (Surface Potential) ถูกกำหนดโดยแอกติวิตี (Activity) ของสารละลาย กรณีที่ไฮดรอกซิลไอออนมีแอกติวิตีปานกลาง จะทำให้เกิดลักษณะพื้นผิวแร่ไม่มีประจุหรือที่เรียกกันว่าจุดประจุเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, PZC) ซึ่งมีผลต่อการลอยแร่ และได้แสดงค่าจุดประจุเป็นศูนย์ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2

จุดประจุเป็นศูนย์ของแร่ออกไซด์และซิลิเกตบางชนิด*

ชนิดแร่	จุดประจุเป็นศูนย์ (PZC)	เอกสารอ้างอิง
ออบไซด์ (Augite)	2.7	170
เบนโทไนต์ (Bentonite)	< 3.0	171
เบอริล (Beryl)	3.1, 3.3, 4.4	172-174
ไบโอไทต์ (Biotite)	0.4	173
แคสซิเทอไรต์ (Cassiterite)	4.5	175
โครไมต์ (Chromite)	5.6, 7.0, 7.2	176-177
คริสโซคอลลา (Chrysocolla)	2.0	178
คอร์รันดัม (Corundum)	9.0, 9.4	179-180
คัมมิงโทไนต์ (Cunningtonite)	5.2	181
คิวไพรต์ (Cuprite)	9.5	182
ไดออปไซด์ (Diopside)	2.8	170
การ์เนต (Garnet)	4.4	174
เกอธิต (Goethite)	6.7	181
ฮีมาไทต์ (Haematite)	5.0, 6.0, 6.7	183, 202
เกาลินไนต์ (Koalinite)	3.4	171
แมกนีไทต์ (Magnetite)	6.5	181
ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite)	5.6, 7.4	173
ควอตซ์ (Quartz)	1.8	179
โรโดไนต์ (Rhodonite)	2.8	178
รูไทล์ (Rutile)	6.7	185
ทัวร์มาลีน (Tourmaline)	4.0	188
เซอร์คอน (Zircon)	5.8	174

* ค่าเหล่านี้เป็นค่าโดยทั่วไป ค่าอาจแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับที่มาของแร่และสิ่งเจือปน

ii) การละลายได้มากกว่าของพื้นผิว (Preferential Dissolution of Surface) เป็นกลไกของแร่ชนิดพันธะไอออนิกที่มีหนึ่งค่าวาเลนซี (Uni - univalent Ionic) ซึ่งให้ประจุบวกและลบเท่ากัน เครื่องหมายศักดาพื้นผิวที่เกิดในสารละลายอิมิตัว จะถูกกำหนดโดย ปริมาณสัมพัทธ์ของพลังงานอิสระของไฮเดรชันของไอออน (Free Energy of Hydration of Ion) ภายในแลตทิซของผลึก (Crystal Lattice) โดยไอออนซึ่งมีพลังงานไฮเดรชันเป็นลบมีแนวโน้มที่จะหลุดออกจากแลตทิซของผลึกดังกล่าว ซึ่งทำให้เกิดประจุตรงข้ามบนพื้นผิว กลไกนี้สามารถอธิบายได้ดีต่อสารประกอบที่มีหนึ่งค่าวาเลนซี (Uni-univalent Compound) ⁽¹⁸⁴⁾ ดังแสดงตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3

ประจุพื้นผิวของกลไกการละลายได้มากกว่าของพื้นผิว ⁽¹⁸⁵⁾

(Surface Charge of Preferential Dissolution of Surface)

Sign of surface charge for silver halides predicted from the hydration free energy of gaseous ions*						
Salt	K _{sp}	pzc pAg	-ΔG _h ⁻ (kcal/mole)	-ΔG _h ⁺ (kcal/mole)	Sign of Surface Potential	
					Predicted	Experimental
AgCl	1.7 x 10 ⁻¹⁰	4.0	83.0	105.4	Negative	Negative
AgBr	5.0 x 10 ⁻¹³	5.4	76.0	105.4	Negative	Negative
AgI	8.5 x 10 ⁻¹⁷	5.5	66.7	105.4	Negative	Negative

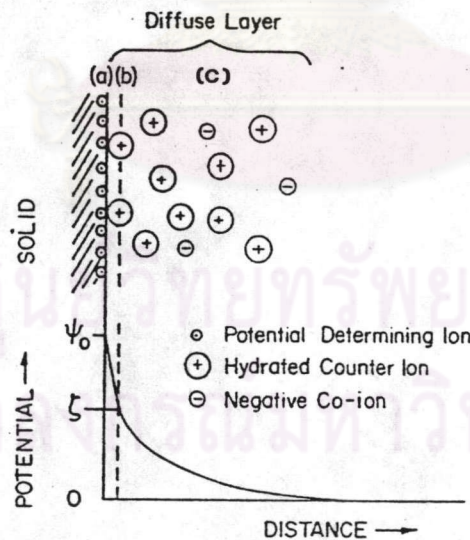
*Free energies of gaseous ions are used in this analysis because for simple uni-univalent ionic solids with equivalent distribution of cations and anions on the surface, the lattice energy contribution to the hydration of a surface ion is equivalent for both cations and anions.

iii) การแทนที่แลตทิซ (Lattice Substitution) กลไกประเภทนี้เกิดจากการแทนที่ของธาตุในแลตทิซของผลึก ดังเช่น การแทนที่ธาตุซิลิกอน (Silicon) โดยธาตุอลูมินา (Alumina) ของแร่ดินขาว ซึ่งการแทนที่ดังกล่าวมีผลต่อการนำไฟฟ้าของไอออน (Ionic Conductivity), การแพร่กระจาย (Diffusion) และคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic Property) เนื่องจากเกิดแลตทิซของผลึกที่ไม่สมบูรณ์ (Defect) ซึ่งมีผลต่อจลนศาสตร์ทางไฟฟ้า (Electrokinetic) และการลอยแร่ (Flotation) ⁽¹⁸⁶⁻¹⁸⁹⁾

5.1.2 ชั้นคู่ทางไฟฟ้า (Electrical Double Layer, EDL)

การเกิดประจุพื้นผิวแรงแจก 3 กลไกที่กล่าวมาแล้วนั้น พื้นผิวของของแข็ง (หรือแร่) จะเกิดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในของเหลวหรือสารละลาย และประจุพื้นผิวถูกดึงดูดโดยประจุตรงข้ามจำนวนเท่ากันซึ่งกระจายตัวอยู่ในสารละลายนั้น และลักษณะที่ประจุในสารละลายที่อยู่ร่วมกับประจุพื้นผิวของของแข็งนั้น เรียกลักษณะดังกล่าวนี้ว่า ชั้นคู่ทางไฟฟ้า ดังแสดงตามรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงถึงไอออนกำหนดศักย์ (Potential Determining Ion) ที่ชั้นพื้นผิว (Surface Layer) มีการดูดซับ (Adsorp) กับคอน์เตอร์ไอออน (Counter Ion) บริเวณชั้นสเตอร์น (Stern Layer) และแพร่กระจายภายในสารละลายรอบ ๆ พื้นผิวของของแข็ง บริเวณชั้นแพร่กระจาย (Diffuse Layer)

- ไอออนกำหนดศักย์ เป็นไอออนที่กำหนดประจุพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งไอออนเหล่านี้ประกอบด้วย ไอออนของของแข็ง, ไอออนของไฮโดรเจน, ไอออนของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Ion) และไอออนของสารเคลือบผิวซึ่งก่อตัวเป็นเกลือโลหะไม่ละลายน้ำกับไอออนของพื้นผิวของแข็งหรือแร่ ซึ่งไอออนดังกล่าวจะทำให้เกิดไอออนเชิงซ้อน (Complex Ion) บริเวณพื้นผิว



รูปที่ 5.3 ลักษณะชั้นคู่ทางไฟฟ้า (190)

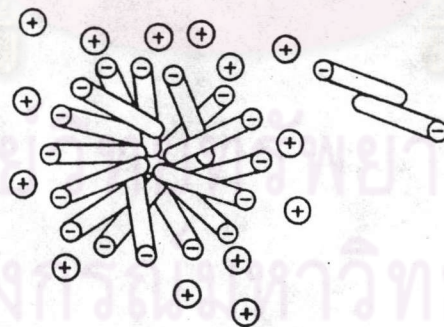
- a) ชั้นพื้นผิว (Surface Layer),
- b) ชั้นสเตอร์น (Stern Layer)
- c) ชั้นแพร่กระจาย (Diffuse Layer)

- แคน์เตอร์ไอออนเป็นกลุ่มไอออนซึ่งไม่ทำให้เกิดประจุพื้นผิวโดยจะถูกดึงดูดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) เพื่อความสมดุลย์ทางไฟฟ้าภายในสารละลาย

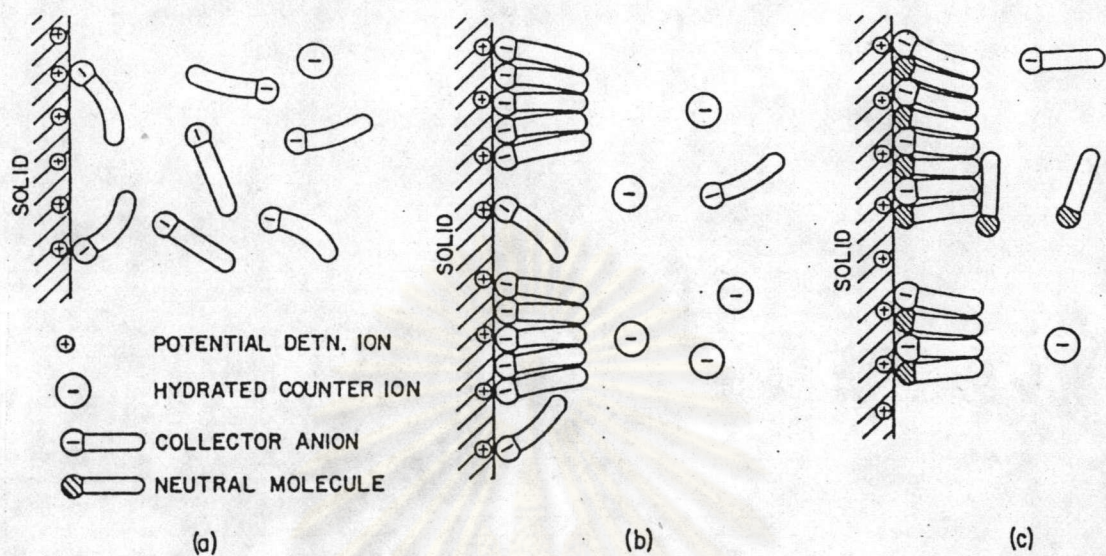
การที่ไอออนยึดเหนี่ยวบริเวณพื้นผิวของของแข็งที่มีโซ่เกิดจากกลไกการดูดซับทางเคมี แต่เป็นลักษณะการถูกดูดซับเฉพาะไอออน (Specifically Adsorbed Ion) เช่น ไอออนของโลหะที่มีค่าวาเลนซ์หลายค่าในช่วง pH ต่าง ๆ กัน ซึ่งไอออนของโลหะนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydrolyze) เกิดเป็นสารเชิงซ้อนไฮดรอกซี (Hydroxy Complex) และการเกิดสารเชิงซ้อนนี้ยังมีปัจจัยจาก ความยาวของโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain Length) ของสารเคลือบผิวที่มีค่าความเข้มข้นปานกลางถึงค่าสูงอีกด้วย

ณ ที่ค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของ สารเคลือบผิวที่มีความยาวโซ่ไฮโดรคาร์บอนค่าหนึ่ง ๆ จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มอยู่ร่วมกันของไอออน และ/หรือโมเลกุล ซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวว่า การเกิดไมเซลล์ (Micellization) แสดงตามรูปที่ 5.4 ค่าความเข้มข้นที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (Critical Micelle Concentration, CMC) และหากเกิดปรากฏการณ์นี้บริเวณพื้นผิวแล้ว สภาพที่เกิดมวลผสม (Aggregate) ลักษณะนี้เรียกว่า เฮมิไมเซลล์ (Hemi-micell)⁽¹⁹¹⁾ ดังแสดงตามรูปที่

5.5



รูปที่ 5.4 การเกิดไมเซลล์ (Micellization)⁽¹⁹⁰⁾



รูปที่ 5.5 ลักษณะการดูดซับพื้นผิวแร่เกิดเป็นเฮมิไมเซลล์โดยสารเคลือบผิว⁽¹⁶⁶⁾

- การดูดซับด้วย ไอออนเดี่ยวที่ความเข้มข้นสารเคลือบผิวต่ำ
- การเกิดเฮมิไมเซลล์ที่ความเข้มข้นสารเคลือบผิวสูง
- การดูดซับร่วม (Co-adsorption) ด้วยไอออนสารเคลือบผิว (Collector Ion) และโมเลกุลเป็นกลาง (Neutral Molecule)

ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของแข็งหรือผิวแร่ กับสารละลาย ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ชั้นคู่รวม (Total Double Layer Potential, ψ_0) ส่วนความต่างศักย์ระหว่างชั้นสเตอร์น (Stern Layer) กับสารละลาย เรียกว่า ความต่างศักย์ซีตา (Zeta Potential, ζ) ซึ่งความต่างศักย์ซีตานั้นมักจะใช้แทนความต่างศักย์พื้นผิว โดยมีการวัดค่าความต่างศักย์ซีตาต่างกล่าว ด้วยเทคนิควิธี Electrophoresis และ Streaming Potential⁽¹⁹²⁻¹⁹³⁾ ซึ่งค่าที่วัดได้จะบ่งบอกถึงลักษณะของประจุพื้นผิวของของแข็งหรือผิวแร่ในสารละลายนั้น ๆ ที่ทำให้สามารถปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) เพื่อการควบคุมประจุพื้นผิวและการเลือกใช้ประเภทของสารเคลือบผิวที่เหมาะสมต่อการทำให้เกิดการดูดซับ และเกิดการไม่เปียกน้ำของผิวแร่ที่ต้องการได้

5.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ (146-157)

สารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้ คือ

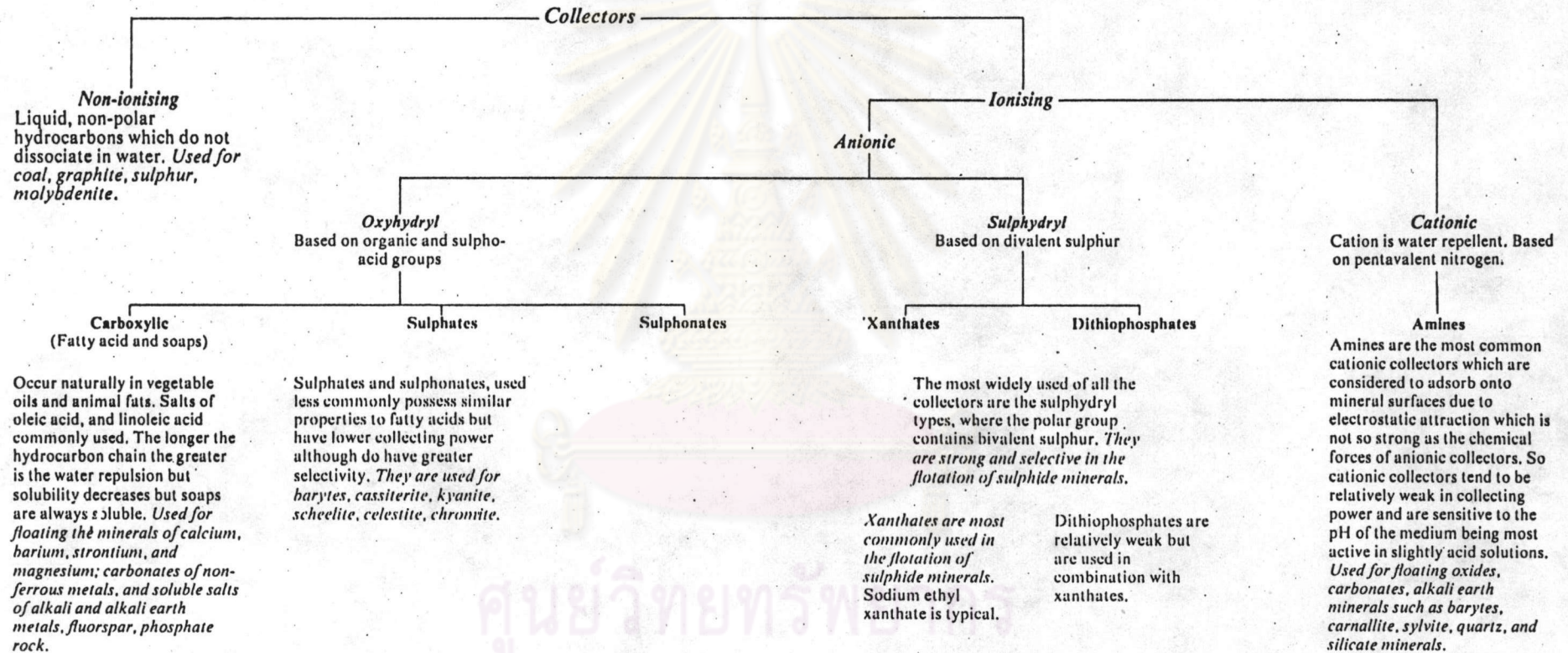
i) สารเคลือบผิว (Collector) เป็นสารประกอบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Compound) ซึ่งมีกลุ่มสารอินทรีย์ร่วมกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยที่กลุ่มสารอินทรีย์ ซึ่งมีประจุ (Ion) จะทำหน้าที่ดูดซับต่อประจุพื้นผิวของแร่ ในขณะที่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain) ซึ่งไม่มีประจุ (Non-ionic) ก็จะทำให้เกิดการไม่เปียกพื้นผิวแร่ สารเคลือบผิวสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สารเคลือบผิวไม่มีการแตกตัวเป็นไอออน (Non-ionizing Collector) และแตกตัวมีไอออน (Ionizing Collector) ซึ่งสารเคลือบผิวแตกตัวมีไอออนยังแบ่งย่อยเป็น 2 ชนิด คือ สารเคลือบผิวประจุบวก (Cationic Collector) และสารเคลือบผิวประจุลบ (Anionic Collector) เมื่ออยู่ในสภาวะสารละลาย ดังแสดงการแยกประเภท ตามรูปที่ 5.6

ii) สารปรับสภาพ (Regulator or Modifier) เป็นสารเคมีที่ช่วยกระตุ้น (Activate) การเคลือบผิวของแร่ที่ต้องการ และ/หรือทำการป้องกันการเคลือบผิว โดยทำหน้าที่กด (Depress) แร่ชนิดอื่น ๆ รวมทั้งอาจใช้เป็นสารปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH Regulator) เพื่อให้เหมาะกับการเคลือบผิวแร่อีกด้วย

iii) สารเคลือบฟอง (Frother) เป็นสารเคมีละลายน้ำได้ทำการดูดซับระหว่างผิวน้ำกับฟองอากาศ (Liquid/Gas Interface) โดยช่วยทำให้ฟองอากาศที่ได้มีความคงตัวที่พอเหมาะต่อแรงต่อต้านต่าง ๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของเม็ดแร่ และแรงออกจลน์ ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ลอยแร่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Classification of collectors



รูปที่ 5.6 การแยกประเภททั่วไปของสารเคลือบผิวแร่ (156, 163)

5.2 การลอยแร่ซัลไฟด์ด้วยสารเคลือบผิวประจุบวก ^(156-163, 195)

การลอยแร่ซัลไฟด์ด้วยสารเคลือบผิวประจุบวกต่างกับ การลอยแร่ซัลไฟด์ที่ใช้สารเคลือบผิวประจุลบชนิดซัลไฟด์รีล (Sulfydryl Collector) มีดังนี้คือ

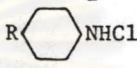
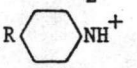
- i) อันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interaction) ระหว่างผิวแร่กับสารเคลือบผิว มีความสำคัญมากกว่าการดูดซับทางเคมี
- ii) สารเคลือบผิวที่ใช้ต้องการโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain) ที่ยาวกว่า, อย่างน้อยต้องมี จำนวน 10 คาร์บอนขึ้นไป
- iii) ความเข้มข้นสารเคลือบผิวประจุบวกที่ใช้ จะมีค่าปานกลาง (Moderate Concentration)
- iv) การเกาะติด (Attachment) ระหว่างสารเคลือบผิวประจุบวกกับผิวแร่มีความแข็งแรงน้อยกว่าที่ใช้สารเคลือบผิวประจุลบชนิดซัลไฟด์รีล ทั้งๆ ที่มุมสัมผัสดี
- v) เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพผิวแร่ก่อนการลอย (Conditioning Time) ค่อนข้างเร็ว
- vi) มีความไวต่อฝุ่นละเอียด (Sensitivity to Slime)
- vii) สารเคลือบผิวประจุบวกมักมีส่วนทำให้เกิดฟอง
- viii) การเจาะจง (Selectivity) ของการเคลือบผิวแร่ด้วยสารเคลือบผิวประจุบวกนี้ต่อเฉพาะแร่มีกต่ำ

5.2.1 ชนิดของสารเคลือบผิวประจุบวก

สารเคลือบผิวประจุบวกที่ถูกใช้ในการลอยแร่ซัลไฟด์ ดังแสดงตามตารางที่ 5.4 ของสารเคลือบผิวอะมีน (Amine) โดยเฉพาะอะมีนปฐมภูมิ (Primary Amine) ถูกใช้อย่างกว้างขวาง คุณสมบัติของสารเคลือบผิวประจุบวกชนิดอะมีนที่มีต่อการลอยแร่ ขึ้นกับ ค่าคงที่การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Constant), การละลายได้ (Solubility), ขนาดหัวไอออน (Ionic Head Size), ความยาวของโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain Length), ชนิดของโซ่กิ่งไฮโดรคาร์บอน (Branching of Hydrocarbon Chain) และค่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (Critical Micelle Concentration, CMC) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวแสดงตามตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4

สารเคลือบผิวประจุบวกชนิดอะมีน (195)

Collector	Formula*	Ion
Primary Amine Salt	RNH_3Cl	RNH_3^+
Secondary Amine Salt	$\text{RR}'\text{NH}_2\text{Cl}$	$\text{RR}'\text{NH}_2^+$
Tertiary Amine Salt	$\text{R}(\text{R}')_2\text{NHC1}$	$\text{R}(\text{R}')_2\text{NH}^+$
Quaternary Ammonium Salt	$\text{R}(\text{R}')_3\text{NCl}$	$\text{R}(\text{R}')_3\text{N}^+$
Sulfonium Salt**	$\text{RS}(\text{R}')_2\text{Cl}$	$\text{RS}(\text{R}')_2^+$
Alkyl Pyridinium Salt	 NHC1	 NH^+

* R represents a hydrocarbon chain, usually 10 carbon atoms or greater.

R' is a short alkyl chain, usually a methyl group.

** Phosponium, iodonium and arsonium compounds are also known.

ตารางที่ 5.5

ค่าคงที่ทางกายภาพของสารเคลือบผิวประจุบวกชนิดอะมีนที่มีจำนวน 12 คาร์บอน (197)

Physical Constants of Selected 12 - Carbon Primary, Secondary, Tertiary and Quaternary Amines

Amine	Ionization Constant	Solubility of Molecular Species (M)	Diameter of Charged Head (Å)	CMC (M)
n-Dodecylamine	4.3×10^{-4} @ 25°C	2×10^{-5} @ 25°C	3.7	0.014 @ 30°C (chloride salt)
N-methyldodecylamine	10.2×10^{-4}	1.2×10^{-5}	Intermediate	
Dimethyldodecylamine	5.5×10^{-5}	7.2×10^{-6}	Intermediate	
Trimethyldodecyl-ammonium hydroxide	1 (the hydroxide is a very strong base)	Not applicable,	5.9	0.0160-0.020 @ 30°C (chloride salt)

ตารางที่ 5.6

ค่าการละลายได้และค่า CMC ของอะมีนปฐมภูมิ (190, 198)

Chain Length	Solubility of Molecular Species (M)	CMC (M)
10 C	5×10^{-4}	3.2×10^{-2}
12 C	2×10^{-5}	1.3×10^{-2}
14 C	1×10^{-6}	4.1×10^{-3}
16 C	—	8.3×10^{-4}
18 C	—	4.0×10^{-4}

5.2.2 กลไกการดูดซับของสารเคลือบผิวประจุบวก (Mechanism of Adsorption of Cationic Surfactant)

ลำดับต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงความสัมพันธ์ของกลไกการดูดซับของสารเคลือบผิวประจุบวกบนผิวแร่ ดังนี้คือ

i) หากเป็นไปตามนิยามของการเกิดสภาพเฮมิไมเซลล์ (Hemi-micelle) ตามอธิบายในหัวข้อที่ 5.1.1.1 มาแล้วนั้น ตักตานั้นผิวของแร่จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นค่าความเข้มข้นเฮมิไมเซลล์วิกฤต (Critical Hemi-micelle Concentration) ก็จะมีค่าต่ำกว่าการเกิดไมเซลล์ (Micellization) ของสารเคลือบผิวประจุบวกในสารละลาย

ii) ผลของความยาวโซ่ไฮโดรคาร์บอน ต่อการดูดซับสัมพันธ์กับการลดลงของพลังงานอิสระของพื้นผิวแร่ เนื่องจากการผลักกัน (Exclusion) ซึ่งกันและกันของแต่ละกลุ่มไฮโดรคาร์บอน (CH_2) ที่อยู่ในสถานะสารละลายที่รวมตัวกันโดยโซ่ไฮโดรคาร์บอน และหากใช้สารเคลือบผิวที่มีโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่าย่อมมีความเข้มข้นเฮมิไมเซลล์วิกฤตน้อยกว่า และปริมาณสารเคลือบผิวที่ใช้ย้อมต่ำกว่าสารเคลือบผิวประจุบวกที่มีโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้นหรือจำนวนคาร์บอนต่ำนั่นเอง

iii) ความเข้มข้นที่ทำให้เกิดสภาพเฮมิไมเซลล์ ขึ้นกับอัตราส่วนของชนิดประจุต่อชนิดของโมเลกุลที่เป็นกลาง (Charge to Neutral Specie) ในชั้นคู่ทางไฟฟ้า อีกนัยหนึ่งขึ้นกับศักดาไฟฟ้าพื้นผิว (Surface Electrical Potential) และความเข้มข้นของประจุแต่ละชนิด และชนิดของโมเลกุลที่เป็นกลาง (Concentration of Charged and Neutral Specie) ในสารละลาย

iv) ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการดูดซับมี 2 ลักษณะ

คือ

a) เกิดไอออนของไฮโดรเจน (H^+) และไอออนของไฮดรอกซิล (OH^-) ซึ่งมีผลต่อศักดาไฟฟ้าพื้นผิว (Surface Electrical Potential)

b) ความเข้มข้นของไอออนของไฮดรอกซิล (OH^-) มีผลจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydrolysis) ของสารเคลือบผิวประจุบวกซึ่งเป็นด่างอ่อน (Weak-base Collector)

v) ผลของโมเลกุลที่เป็นกลาง (Neutral Molecule) มี 2

ลักษณะเช่นกัน คือ

a) โมเลกุลที่เป็นกลางนี้ จะมีความเข้มข้นต่ำกว่าความเข้มข้นการเกิดไมเซลล์ และการเกิดสภาพเอมิไมเซลล์

b) โมเลกุลที่เป็นกลางนี้ จะไปเพิ่มศักดาไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากขึ้นของชั้นคู่ทางไฟฟ้า และหากโมเลกุลที่เป็นกลางมีความยาวของโซ่ยาว (Long Chain Neutral Molecule) จะสามารถย้ายจุดของค่า pH ที่ให้การลอยสูงสุดให้ต่ำลง

vi) ในชั้นคู่ทางไฟฟ้าหากมีการดูดซับประจุบวกอินทรีย์ (Inorganic Cation) ที่นอกเหนือจากประจุบวกของสารเคลือบผิว (Cationic Collector) แล้ว จะทำให้การดูดซับต่อสารเคลือบผิวประจุบวกบนผิวแร้ลดลง

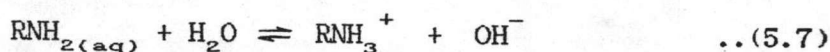
vii) ไอออนที่มีประจุลบที่มีค่าวาเลนซ์หลายค่า (Multivalent Anion) เช่น SO_4^{2-} และ SiF_6^{2-} มีแนวโน้มอย่างมากที่ถูกดูดซับบนผิวแร้ด้านที่มีประจุบวก (Positive Site) ซึ่งจะเป็นการช่วยกระตุ้นการดูดซับของสารเคลือบผิวประจุบวกบนผิวแร้ของแร้ซิลิกาเกิดด้วย

5.2.3 มอดูเลชันบางประการของการลอยแร้ด้วยสารเคลือบผิวประจุบวก (Some Modulation of Cationic Flotation)

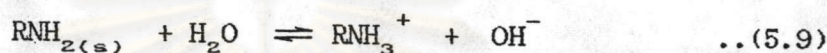
5.2.3.1 ผลของการเป็นด่าง (Effect of Basicity) ในกรณีของอะมีน ชนิดปฐมภูมิ (Primary), ทติยภูมิ (Secondary), ตติยภูมิ (Tertiary) ซึ่งเป็นด่างอ่อน (Weak Base) นั้น ค่าคงที่การแตกตัว (Dissociation Constant) หาได้จากสัดส่วนของไอออนแต่ละชนิด (Ionic Specie) ต่อโมเลกุลที่เป็นกลาง (Neutral Molecule) ของระบบ

ดั่งแสดงสมการสมดุลของสารเคลือบผิวโดเดซิลอะมีนที่อุณหภูมิ

25 องศาเซลเซียส⁽¹⁹⁷⁾



$$K_b = \frac{[\text{RNH}_3^+][\text{OH}^-]}{[\text{RNH}_{2(\text{aq})}]} = 4.3 \times 10^{-4} \quad \dots(5.8)$$



$$K_{s0} = [\text{RNH}_3^+][\text{OH}^-] = 8.6 \times 10^{-4} \quad \dots(5.10)$$

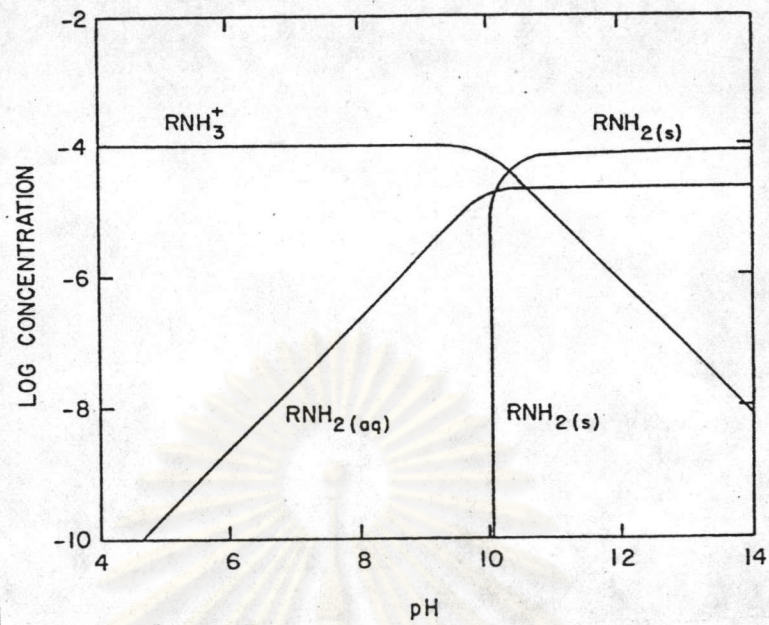


$$K_{s1} = [\text{RNH}_{2(\text{aq})}] = 2 \times 10^{-5} \quad \dots(5.12)$$

เส้นโค้งสมดุลตามสมการข้างต้นแสดงดังรูปที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่า pH ต่ำกว่า pH 7 ทำให้โดเดซิลอะมีน (Dodecylamine) เป็นไอออนชนิด RNH_3^+ ในสารละลาย โดยที่ทั้งไอออนชนิด RNH_3^+ และ โมเลกุลที่เป็นกลางชนิด $\text{RNH}_{2(\text{aq})}$ มีความเข้มข้นเท่ากันที่ค่า pH ประมาณ 10.65 และที่ค่า pH มากกว่าค่าดังกล่าว ปริมาณไอออนชนิด RNH_3^+ ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอยู่ภายใต้ช่วง pH ของการตกตะกอนเป็น $\text{RNH}_{2(\text{s})}$

การแตกตัวเป็นไอออนของอะมีนและการละลายได้ของโมเลกุลอะมีนมีผลต่อพฤติกรรมการลอย ซึ่งพิจารณาได้จากตารางที่ 5.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH ต่อการตกตะกอนของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ต่อการลอยแร่

ความยาวของโซ่ไฮโดรคาร์บอน ของสารเคลือบผิวอะมีนมีผลต่อการลอยได้ของแร่ (Floatability) ซึ่งทดสอบโดย Somasundaran⁽¹⁹⁹⁾ และ Schubert⁽²⁰³⁾ ดังกราฟรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่มีความยาวโซ่ไฮโดรคาร์บอนของสารเคลือบผิวอะมีนแตกต่างกันมีผลต่อการลอยแร่ เช่นการเพิ่มความเข้มข้นจาก 10^{-6} โมล/ลิตร ของสารเคลือบผิวออกตาเดซิลอะมีน (Octadecylamine) เป็น 0.5 โมล/ลิตร ของสารเคลือบผิวบิวทิลอะมีน (Butylamine) จะให้ผลการลอยต่างกัน



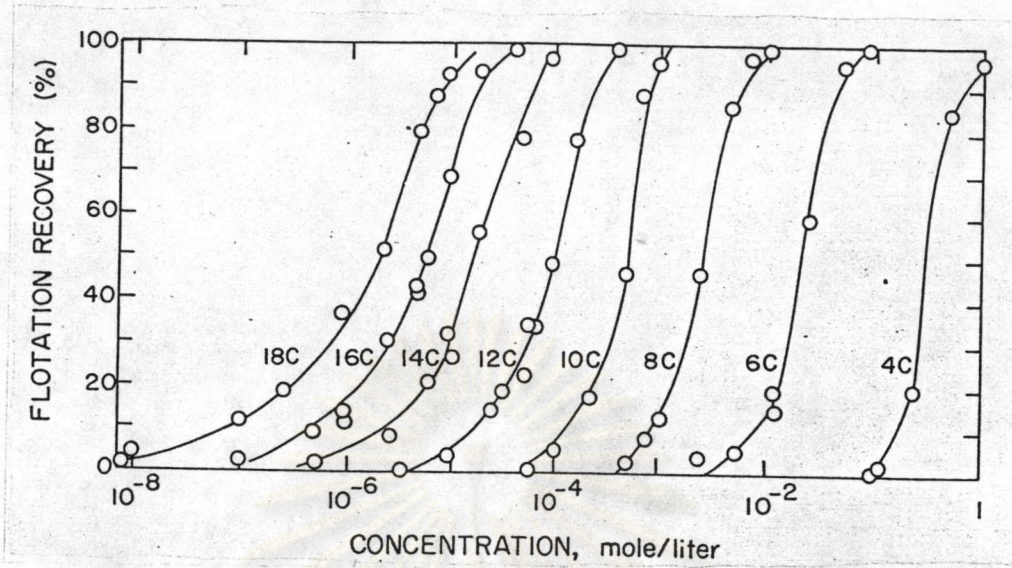
รูปที่ 5.7 ไดอะแกรมล็อกของความเข้มข้น (Log Concentration) สำหรับเคลื่อนผิวโดเดซิลอะมีน ที่ 1×10^{-4} โมลาร์ (M) ⁽¹⁹⁷⁾

ตารางที่ 5.7

ความสัมพันธ์ของ pH ที่มีต่อการลอยได้, มุมสัมผัสและการตกตะกอนของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ

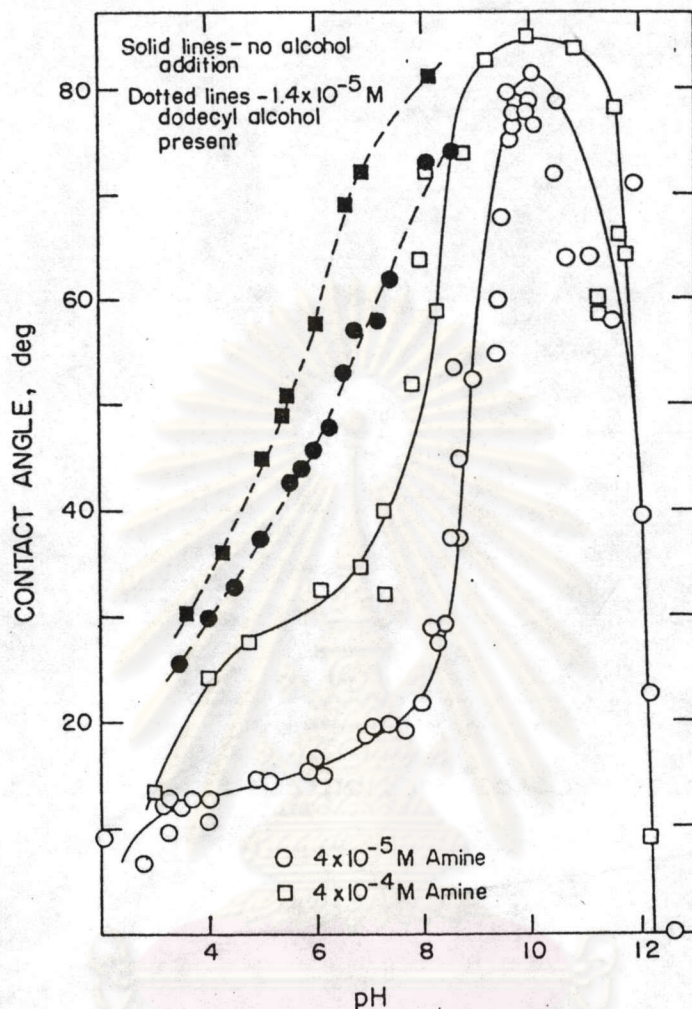
สำหรับสารเคลื่อนผิวประจุบวก 12 คาร์บอน ⁽¹⁹⁹⁾

Amine	pH of ppt. of Mol. Species	pH of Max. Flotation	pH of Max. Contact Angle
4×10^{-4} M Total Amine			
Primary	9.4	9.0	9.6
Secondary	9.5	8.8	9.1
Tertiary	8.0	8.0	8.0
Quaternary	~12.0	11.3	10.6
4×10^{-5} M Total Amine			
Primary	10.6	9.7	10.1
Secondary	10.6	—	10.2
Tertiary	9.1	—	9.0
Quaternary	~13.0	—	11.2



รูปที่ 5.8 การเก็บแร่ลอยได้ (Flotation Recovery) ของแร่ควอร์ตซ์ ที่เป็นฟังก์ชันต่อความเข้มข้นของอะมีนที่มีความยาวโซ่ไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ กัน ณ ค่า pH 6 ถึง 7 (199)

5.2.3.2 ผลของความยาวโซ่ของโมเลกุลที่เป็นกลาง (Effect of Long-chained Neutral Molecule) โดย Smith⁽²⁰⁴⁾ ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้สารเคมีซึ่งมีโมเลกุลที่เป็นกลางมีความยาวโซ่มาก เช่น โดเดซิลแอลกอฮอล์ (Dodecylalcohol) ในการลอยแร่ควอร์ตซ์ด้วยสารเคลือบผิวโตนีลอะมีนที่ความเข้มข้นสารเคลือบผิวต่างกัน จะช่วยเพิ่มมุมสัมผัส หรือการดูดซับที่ดีกว่าไม่มีการใช้โดเดซิลแอลกอฮอล์ พิจารณาตามรูปที่ 5.9 ซึ่งอธิบายได้ว่า โมเลกุลที่เป็นกลางนี้ทำให้พลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Energy) ของการผลักกันระหว่างประจุที่อยู่ข้างเคียงของไอออนสารเคลือบผิวซึ่งเป็นไอออนมีขั้ว (Ionic Polar) ลดน้อยลง เป็นผลให้การก่อตัวสภาพเยมิไมเซลล์บนผิวแร่เพิ่มขึ้น หรือการดูดซับที่ดีขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ที่แสดงถึงมุมสัมผัสเป็นฟังก์ชันของ pH ในการลดแรงตึงผิวด้วยโดเดซิลอะลกอฮอล์ ในสภาวะที่มี และไม่มีแอลกอฮอล์⁽²⁰⁴⁾

5.2.3.3 การกระตุ้นด้วยฟลูออไรด์ต่อซิลิเกต (Fluoride Activation of Silicate) แร่ซิลิเกตโดยส่วนใหญ่อาจถูกกลายด้วยสารเคลือบผิวประจุบวก แต่อย่างไรก็ตาม การตอบสนองต่อการกลายด้วยสารเคลือบผิวประจุบวกนี้ ต่อการกระตุ้นด้วยไอออนของฟลูออไรด์แปรเปลี่ยนตามแต่ละชนิดแร่ ซึ่งจะพิจารณาตามโครงสร้างของแร่ตามลำดับ ดังต่อไปนี้ คือ

- ออร์โธซิลิเกต (Orthosilicate) เช่น แร่แอนดาลูไซต์ (Andalusite) , เบอริล (Beryl) , ทัวร์มาลีน (Tourmaline)
- ไพโรซีน (Pyroxene) เช่น แร่ออไจต์ (Augite) , ไดออปไซด์ (Diopside) , สปอดูมีน (Spodumene)
- แอมฟิโบล (Amphibole) เช่น แร่ฮอร์นเบลนด์

(Hornblende), ทรีโมไลต์ (Tremolite), แอกติโนไลต์ (Actinolite)

d) ชีตซิลิเกต (Sheet Silicate) เช่น แรมัสโคไวต์ (Muscovite), ไบโอไทต์ (Biotite), คลอไรต์ (Chlorite)

e) เฟรมเวิร์คซิลิเกต (Framework Silicate) เช่น แควออตซ์ (Quartz), เฟลด์สปาร์ (Feldspar), เนเฟลิน์ (Nepheline)

Manser⁽¹⁵⁰⁾ ได้ทำการวิจัยลอยแร่ซิลิเกต ด้วยการลอยแร่ด้วยเซลล์ลอยแร่ชนิดสูญญากาศ (Vacuum Flotation) ของแร่ข้างต้น โดยใช้สารเคลือบผิวประจุบวกชนิดโดเดซิลอะมีน (Dodecylamine) ในสภาวะทั้งที่มี และไม่มีไอออนของฟลูออไรด์ (Fluoride Ion, F^-) พบว่า

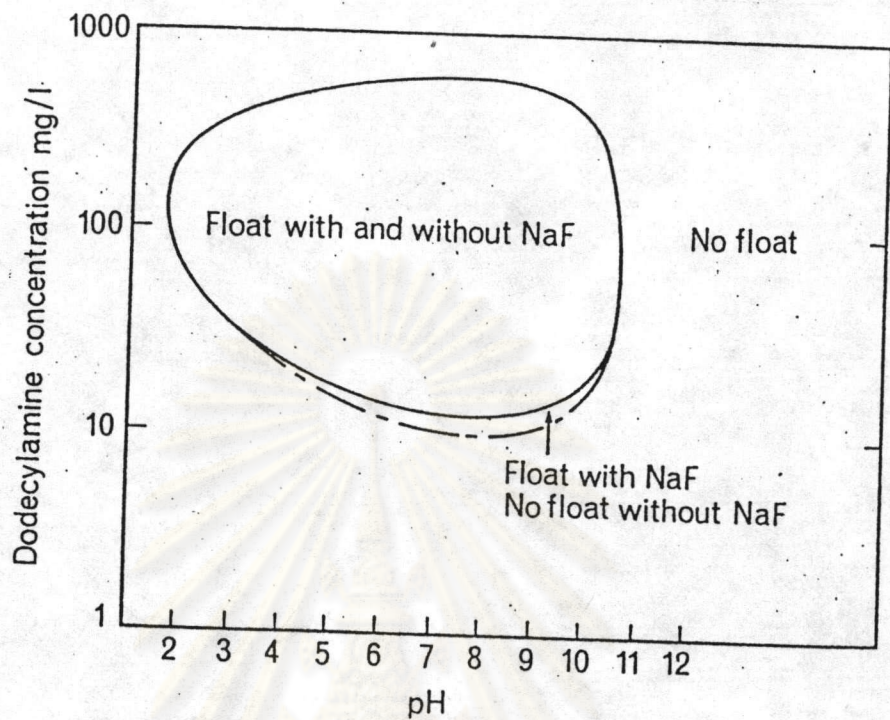
- แร่ทุกชนิดที่มีโครงสร้างออร์โธซิลิเกต ซึ่งประกอบด้วยเตตระฮีดรอน (SiO_4)⁴⁻ เดี่ยว ๆ จะลอยได้ปานกลาง และแร่ในโครงสร้างชนิดที่มีความไวต่อการเติมไอออนของฟลูออไรด์ และการปรับ pH

- แร่โครงสร้างไพรอกซีน แสดงการลอยด้วยสารเคลือบผิวประจุบวกชนิดเดียวกันคล้ายคลึงกับออร์โธซิลิเกต แต่มีผลการลอยโดยการเติมฟลูออไรด์ไอออนน้อยกว่า

- แร่โครงสร้างแอมไฟโบล มีการลอยที่ดีกว่า ณ ช่วง pH และความเข้มข้นสารเคลือบผิวที่กว้างกว่า (เมื่อเทียบกับ ออร์โธซิลิเกตและไพรอกซีน) รวมทั้งมีความไวต่อการเปลี่ยน pH แต่ต่อการเติมไอออนของฟลูออไรด์มีน้อย

- แร่ชีตซิลิเกต มีการลอยที่ช่วง pH กว้าง โดยมีความสัมพันธ์ต่อการดูดซับสารเคลือบผิวบนแผ่นหรือชีต (Sheet) ที่มีประจุลบอย่างแรง ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างรอยแตก (Fracture) ของแผ่นแร่ ดังนั้นแผ่นแร่จะดูดซับสารเคลือบผิวประจุบวกได้ดี โดยที่ไอออนของฟลูออไรด์มีส่วนกระตุ้นในการลอยแร่

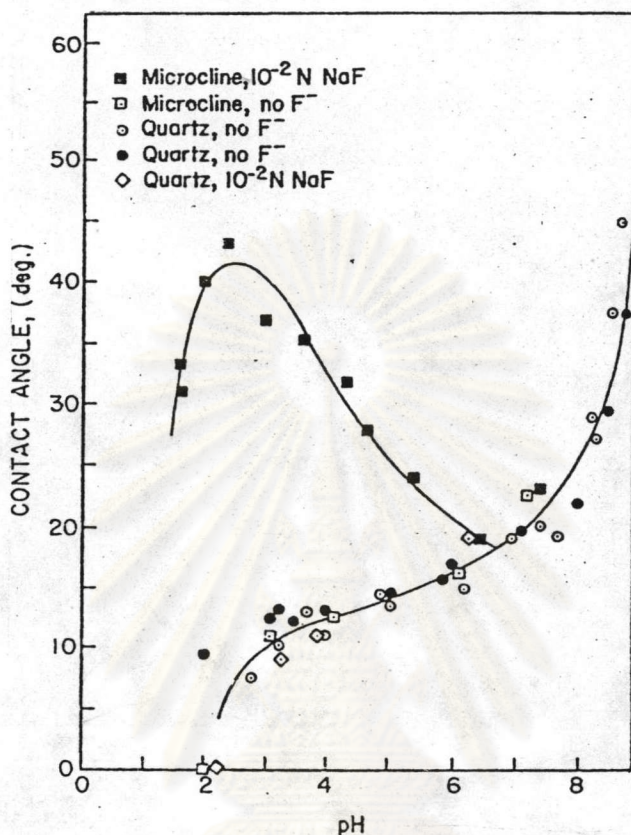
- สำหรับแร่โครงสร้างเฟรมเวิร์คซิลิเกต การลอยด้วยสารเคลือบผิวประจุบวกโดเดซิลอะมีนนั้น ภายใต้วง pH กว้างให้ผลการลอยดีถึงดีมาก โดยที่ไอออนของฟลูออไรด์จะทำตัวเป็นสารกระตุ้นอย่างอ่อน (Mild Activator) ยกเว้นต่อ แควออตซ์ ซึ่งไอออนของฟลูออไรด์เป็นสารกดอย่างอ่อน (Mild Depressant) และรูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ของ pH และความเข้มข้นสารเคลือบผิวโดเดซิลอะมีน ที่มีต่อการลอยแร่เฟลด์สปาร์ (ออร์โทเคลส) ในสภาวะทั้งที่มี และไม่มีไอออนของฟลูออไรด์



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของ pH และความเข้มข้นของสารเคลือบผิวโพลีเอทิลีนที่มีต่อการลอยแร่เฟลด์สปาร์ (ออร์โทเคลส) ในสถานะทั้งมี และ ไม่มีไอออนของฟลูออไรด์ (150)

กลไกการลอยแร่โดยใช้ไอออนของฟลูออไรด์เป็นสารกระตุ้นแร่ซิลิเกตได้มีการศึกษาจากหลายคณะ (205-209) ซึ่งทฤษฎีต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาเปลี่ยนแปลงมาจนปัจจุบัน

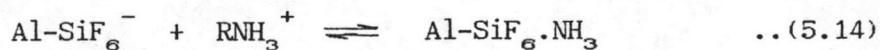
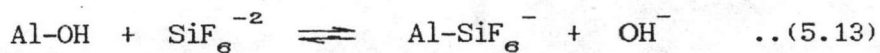
- ดังเช่นกรณีการศึกษาโดย Smith (205) ได้วิจัยการลอยแร่เฟลด์สปาร์ชนิดไมโครไคลน์และแร่วอร์ตซ์ โดยแสดงให้เห็นว่า มุมสัมผัสในการลอยแร่ดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของ pH ดังแสดงตามรูปที่ 5.11



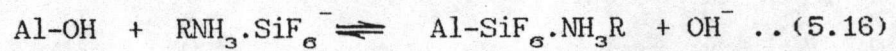
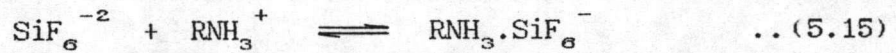
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ที่แสดงถึงมุมสัมผัสของแร่ไมโครไคลน์และแร่ควอร์ตซ์เป็นฟังก์ชันของ pH ที่ความเข้มข้นสารเคลือบผิวไฮโดรซิลอะซีน 4×10^{-5} โมลาร์ (M) ในสภาวะที่มี และไม่มีไอออนของฟลูออไรด์⁽²⁰⁵⁾

ศูนย์วิทยทรัพยากร

- Smith⁽²⁰⁵⁻²⁰⁸⁾ ได้เสนอแนะว่า ที่ pH เป็นกรดนั้น เมื่อใช้กรดกัดแก้ว (HF) ในการล่อยแร่เบอริลด้วยสารเคลือบผิวชนิดอะซีน กรด HF จะกัดผิวแร่ทำให้เกิดกรดซิลิซิก (Silicic Acid) บนผิวแร่ ซึ่งทำให้พันธะอะลูมินาและพันธะเบอริล (Alumina and Beryl Site) ที่เกิดขึ้นทำการดูดซับกับไอออนของฟลูออซิลิเกต (SiF_6^{-2}) ดังแสดงตามสมการดังต่อไปนี้



สมการที่ (5.13) และ (5.14) อาจเป็นอีกลักษณะ คือ



ผลของสมการข้างต้นทั้งสองลักษณะดังกล่าว จะให้ผลสุดท้าย เช่นเดียวกัน และส่งผลให้ pH ของระบบการลอยเพิ่มขึ้น (เนื่องจาก OH^- เพิ่ม)

ในกรณีของแอลคาไลเฟลด์สปาร์ อาจแสดงสมการที่คล้ายคลึงกัน แต่ที่มีเพิ่มเติมก็คือ เกิดไอออนของโปแตสเซียม และ/หรือ โซเดียมฟลูโอซิลิเกต (Potassium and/or Sodium Fluosilicate) เหนือแล้ว โดยที่สารประกอบนี้สามารถละลายได้ปานกลาง ตั้งชื่อไอออนของโลหะแอลคาไลฟลูโอซิลิเกต (Alkali Metal Fluosilicate Ion) อาจยึดติดกับพื้นผิวดินและ ไอออนของอะมีนสามารถแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะแอลคาไลนี้ได้

เชื่อได้ว่าสมการข้างต้นมีความคงตัว รวมทั้งการแลกเปลี่ยนไอออนของอะมีนกับไอออนของโลหะแอลคาไลเหนือแล้ว ที่ทำให้เกิดสารเชิงซ้อนฟลูโอซิลิเกต (Fluosilicate Complex) โดยพิจารณาจากสารเชิงซ้อนของโดเดซิลแอมโมเนียมฟลูโอซิลิเกต (Dodecylammonium Fluosilicate, $\text{RNH}_3\text{SiF}_6^-$) มีการละลายได้ต่ำ (4.1×10^{-4} โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 23-25°C)

- สำหรับ Warren และ Kitchener⁽²⁰⁹⁾ ได้ศึกษาการดูดซับ (Adsorption) โดยวิธีจลศาสตร์ทางไฟฟ้า (Electrokinetic) ซึ่งทำให้เชื่อได้ว่า ปริมาณไอออนของฟลูโอซิลิเกตที่มีอยู่ไม่เพียงพอที่กระทำตัว เป็นสารกระตุ้นการลอยแร่เฟลด์สปาร์ได้ การกระตุ้นควรเกิดจากฟลูออไรด์ทั้งที่เป็นไอออน หรือ โมเลกุลทำการดูดซับเหนือแร่ (โปแตสเซียมเฟลด์สปาร์) และทำให้ที่เหนือแร่มีประจุเป็นลบมากขึ้น แล้วไอออนของอะมีน (ประจุบวก) ก็สามารถดูดซับได้

5.3 การทดสอบการลอยแร่ขั้นต้น⁽¹⁵⁶⁾

ในการพัฒนาการออกแบบวงจรลอยแร่ชนิดใดชนิดหนึ่งนั้น การทดสอบการลอยในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) จะต้องทำก่อนเสมอเพื่อเลือกหาข้อมูลทางเทคนิค เช่น ชนิดและปริมาณการใช้สารเคมี (Type of Reagent and Reagent Consumption), ชนิดและขนาดเซลล์ลอยแร่ (Type and Size of Flotation Cell), ความสามารถในการทำงาน (Capacity) เพื่อทำการจัดวงจรการลอยแร่ (Flotation Circuit) ที่เหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการทดสอบการลอยแร่ยังคงกระทำอย่างต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาเทคนิควิธีการทำงาน และการเลือกใช้สารเคมีใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า⁽²¹⁰⁾

การใช้ตัวอย่างแร่ในการทดสอบนั้นต้องผ่านการชักตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของแร่ที่จะทำการลอยอย่างแท้จริงซึ่งนำไปสู่ขบวนการแต่งแร่ที่ผลิตออกสู่ตลาดการซื้อขาย ตัวอย่างแร่ที่ใช้ไม่ได้ไม่เพียงเป็นตัวแทนขององค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว ยังรวมถึงสัดส่วนแร่ที่อยู่รวมกันและรวมถึงการแปรเปลี่ยนของแร่ในขั้นที่หน้าเหมืองอีกด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถทราบถึงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของแร่แต่ละชนิด และความเบี่ยงเบนของการแปรปรวนของแหล่งแร่

ตัวอย่างแร่ที่เป็นตัวแทนของแหล่งแร่จำเป็นต้องทำการบดลดขนาด เพื่อให้ได้ขนาดแร่ที่เหมาะสม โดยทำการบดหยาบขั้นต้น (Primary Crushing) จะใช้ Jaw Crusher และบดย่อยครั้งที่สองจะใช้ Cone Crusher ส่วนการตัดขนาดจะใช้ตะแกรง ข้อควรระวังของชนิดแร่ที่ผ่านการบดแล้วนั้น อาจเกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน หรือออกซิเดชัน (Oxidation) บนผิวแร่โดยเฉพาะแร่ซัลไฟด์ เป็นต้น

การบดละเอียด (Grinding) มักกระทำการบดเปียก (Wet Grinding) แล้วต่อเนื่องด้วยการลอยแร่ เพื่อป้องกันเกิดการเกิดออกซิเดชันของผิวแร่ที่เป็นอิสระ (Liberated) การบดละเอียดในห้องปฏิบัติการ (Batch Laboratory Grinding) หากใช้บอลมิลล์ (Ball Mill) ซึ่งมักให้แร่ป้อนในการลอยมีขนาดการกระจายตัวที่กว้าง ดังนั้นจึงมักบดแร่ที่ละเอียดด้วยรูดมิลล์ (Batch Rod Mill) ซึ่งให้การกระจายตัวขนาดเม็ดแร่ค่อนข้างแคบ ผลการบดมักพิจารณาถึงขนาดของแร่ (Mineral Size) มากกว่าขนาดรวมของเม็ดแร่ (Overall Product Size) ขนาดแร่ที่เหมาะสมสามารถหาได้ และมักเรียกว่าเป็นขนาดของการบดที่เหมาะสม (Optimum Mesh of Grind)⁽²¹¹⁾

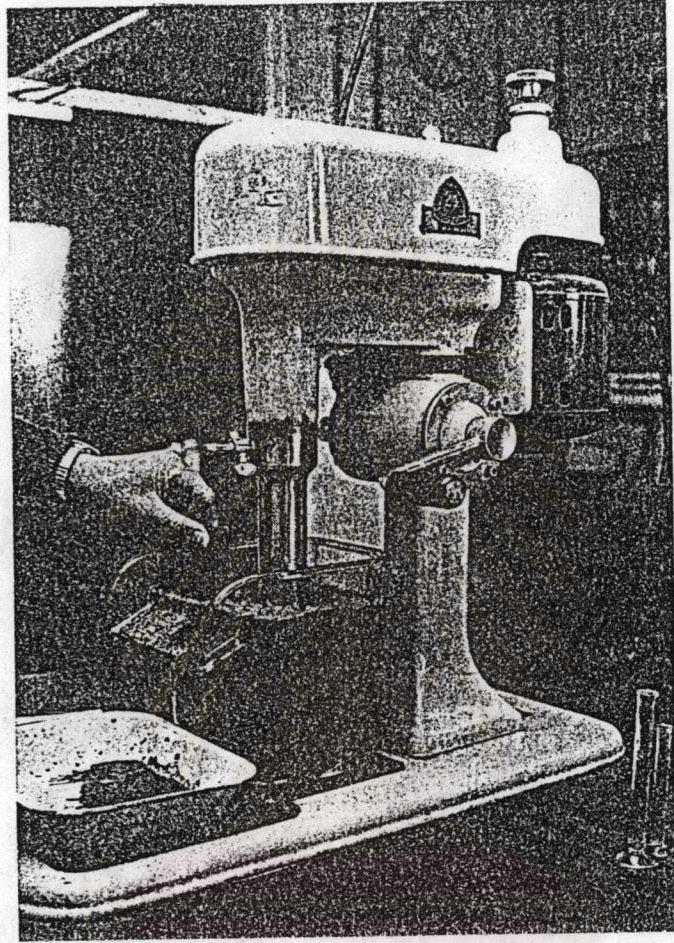
ขนาดของการบดที่เหมาะสมของเม็ดแร่นั้น ต้องคำนึงถึงขนาดของเม็ดแร่ที่สามารถลอยได้ (Floatability Size) อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น กรณีขนาดแร่ลอยได้มีขนาดโตกว่าขนาด

แร่ที่เป็นอิสระ ก็สามารถทำการลอยแร่ที่ขนาดโตก่อน แล้วค่อยทำการบดแร่ที่ลอยได้นั้น ให้เป็นอิสระเพื่อนำไปลอยอีกครั้งก็จะ ได้หัวแร่ที่มีคุณภาพสูงขึ้น หากขนาดแร่ลอย ได้มีขนาดเล็กกว่าขนาดอิสระ ก็จำเป็นต้องสูญเสียแร่ไปบางส่วนเนื่องจากการบดละเอียดเกินไป (Overgrinding)

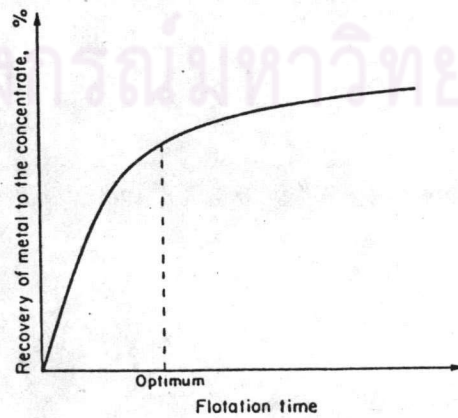
การทดสอบการลอยแร่ขั้นต้นมักใช้ตัวอย่างแร่ซึ่งมีเม็ดแร่หลุดออกเป็นอิสระ โดยมีการใช้ปริมาณสารเคลือบผิวที่แปรเปลี่ยนตามความเหมาะสม วิธีที่ใช้วิจัยในห้องปฏิบัติการมีหลายวิธี เช่น การวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Measurement)⁽²¹²⁾ ซึ่งมุมสัมผัสเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสามารถการลอยได้ (Floatability), Bubble Pick-up⁽²¹³⁻²¹⁴⁾, หลอดแฮลลิมอน (Hallimond Tube)⁽¹⁵⁶⁾, การลอยแร่ด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ (Bulk of Laboratory) และการทดลองลอยแร่ในโรงประลองแยกแร่ (Pilot Plant) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเน้นเพียงวิธีการทดสอบการลอยแร่ด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการเท่านั้น

5.3.1 การทดสอบการลอยด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ (Bulk of Laboratory or Bulk Froth Test)⁽¹⁵⁶⁾

ทำการลอยแบบทีละครั้ง (Batch) เซลล์ลอยแร่ชนิดนี้แสดงให้เห็นตามรูปที่ 5.12 ซึ่งปกติมักใช้ตัวอย่างแร่ประมาณ 500 กรัม ถึง 1 หรือ 2 กิโลกรัม ตามขนาดของเซลล์ และชนิดแร่ที่ทดสอบ เซลล์ลอยแร่มีการกวนโดยเครื่องกวนทางกล (Mechanical Agitator) ซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนความเร็วใบพัด (Impeller) ได้ และเลียนแบบการลอยขนาดเชิงพาณิชย์ได้ การให้ฟองอากาศแก่เซลล์ลอยแร่ผ่านทางรูกลวงของแกนหมุนใบพัด ปริมาณอากาศถูกควบคุมด้วยความเร็วใบพัด และวาล์ว (Valve) ปิด-เปิด กระแสอากาศที่ป้อนจะถูกแรงเฉื่อยจากใบพัดทำให้เป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ฟองอากาศนี้ขณะพุ่งผ่านในของผสม (Pulp) สู่พื้นผิวเซลล์ลอยแร่ก็จะมีโอกาสเกิดการชนกัน (Collision), การยึดติด (Adhesion) และการเกาะติด (Attachment) กับเม็ดแร่ที่ผ่านการเคลือบผิวโดยสารเคลือบผิว และลอยขึ้นมา⁽²¹⁵⁻²¹⁸⁾ การเก็บแร่ได้ (Recovery) จะทำในแต่ละช่วงเวลาเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเก็บแร่ได้ต่อเวลาการลอย ดังแสดงตามรูปที่ 5.13 และผลการทดสอบสามารถใช้ในการหาขนาดเซลล์ลอยแร่ที่ต้องการได้



รูปที่ 5.12 เซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ (156)



รูปที่ 5.13 การเก็บแร่ได้ (Recovery) ที่เวลาลอยแร่ต่าง ๆ กัน (156)

การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถได้ข้อมูลอย่างพอเพียง แต่ข้อสำคัญที่ควรคำนึง
มีดังนี้คือ (210)

ก) ความเร็วในการกวนของผสม ที่ต้องพอเพียงในการทำให้เม็ดแร่เกิดการแขวนตัว (Suspension) และไม่ให้หยุดชะงักการลอยแร่ได้

ข) การปรับสภาพของผสมหรือต่อผิวเม็ดแร่ที่อยู่ในของผสมนั้นด้วยสารเคมี มักต้องกระทำก่อนการลอย หรือก่อนเปิดฟองอากาศเข้าไป เวลาในการปรับสภาพ (Conditioning Time) อาจใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที จนถึง 30 นาที ซึ่งเป็นการทำให้สารเคมีเคลือบผิวเม็ดแร่พอเพียงต่อการลอยได้

ค) การใช้ปริมาณสารเคลือบฟองเพียงเล็กน้อย จะมีผลกระทบต่อการลอยอย่างเห็นได้ชัด และลำดับการเติมสารเคลือบฟองก็มีผลต่อการลอยได้เช่นกัน ซึ่งมักต้องควบคุมปริมาณสารเคลือบฟอง และความหนาของฟอง (Froth Depth) มักอยู่ในช่วง 2-5 ซม. หากฟองดังกล่าวหนาเกินไปก็จะทำให้มีโอกาสเสี่ยงต่อการสูญเสียจากการเก็บกวาดแร่ก็เป็นได้ การลดปริมาณอากาศในบางครั้งก็เพื่อควบคุมปริมาณฟองอากาศซึ่งมักจะมีผลต่อการลอยได้ การทดสอบจึงควรมีการทำงานที่เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบตัวแปรอื่น ๆ

ง) การแยกแร่โม่แต่งทางเศรษฐศาสตร์แล้ว ควรทำการลอยแร่ที่ความหนาแน่นของของผสมมีความสม่ำเสมอเท่าที่ควบคุมได้, ควรมีการเจาะจงการลอยได้ที่ดี (Good Selectivity) และหากได้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมแล้วสามารถทำให้ของผสมมีความหนาแน่นสูงก็จะทำให้ใช้ปริมาตรเซลล์ลอยร่น้อยลง รวมถึงการใช้ปริมาณสารเคมีน้อยลงด้วย ซึ่งปริมาณสารเคมีจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นในสารละลาย ส่วนความหนาแน่นที่เหมาะสมของของผสม (Optimum Pulp Density) ก็เป็นสิ่งสำคัญมากเช่นกัน โดยส่วนใหญ่ค่าความหนาแน่นที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มักลอยที่ 25-40% ของแข็งโดยน้ำหนัก แต่ความหนาแน่นขณะการทดสอบขนาดห้องปฏิบัติการนั้นแปรเปลี่ยนตลอดเวลาจากเริ่มต้นจนท้ายสุด ซึ่งเกิดจากการลอยแร่ออกไป และมีการเติมน้ำเพื่อรักษาระดับของผสมในเซลล์ลอยแร่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและมีผลต่อความเข้มข้นของสารเคมี ทำให้มีผลต่อการลอยแร่ด้วย

จ) น้ำที่ใช้ในการทดสอบการลอย ควรใช้น้ำที่จะใช้กระทำการลอยจริง ๆ มากกว่าใช้น้ำกลั่น

ฉ) ปกติการทดสอบการลอยขนาดห้องปฏิบัติการ จะใช้สารเคมีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเพื่อควบคุมปริมาณการใช้และการป้อนที่ถูกต้องแม่นยำ จึงมักเจือจางสารเคมีที่ละลายน้ำได้แล้วป้อนด้วยปิเปตต์ (Pipette) ส่วนสารเคมีที่เป็นของเหลวมักใช้ Graduate

Dropper หรือ Hyperdemic Needle และที่เป็นของแข็งก็จะทำให้ละลายเสียก่อนด้วยสารทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) ที่ไม่มีผลรบกวนต่อการลอย

ข) การลอยแร่ในเชิงพาณิชย์มักมีการลอยสะอาด (Cleaning) อย่างน้อยหนึ่งครั้งขึ้นไป ซึ่งการลอยขั้นนี้ก็เพื่อเพิ่มคุณภาพ (Grade) ของหัวแร่ให้สูงขึ้น ส่วนการทำ ความสะอาดหางแร่ (Cleaner Tailing) บางครั้งก็มีการลอยซ้ำด้วย สำหรับการทดสอบ การลอยขนาดห้องปฏิบัติการของวิธีการลอยแบบทีละครั้ง หรือการลอยแบบ Batch นั้น มักไม่ ได้ กระทำการลอยซ้ำ หรือลอยสะอาดหางแร่ แต่หากการลอยสะอาดหางแร่เป็นสิ่งจำเป็น ก็จะใช้ การทดสอบการลอยเป็นลำดับหลายลำดับ (Multiple Step Flotation Test) หรือการทดสอบ ลอยแบบวงจร (Cycle Test) ซึ่งการลอยชนิดนี้เป็นการวัดผลกระทบจากการหมุนเวียน ของผสม ซึ่งเลียนแบบวงจรการลอยในเชิงพาณิชย์จริง ๆ ซึ่งจุดประสงค์หลักของการทดสอบการ ลอยแบบวงจร (Cycle Test) นี้ เพื่อต้องการหา

i) การเก็บแร่ได้ (Recovery) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการลอยซ้ำหรือลอย สะอาดหางแร่

ii) ปริมาณสารเคมีที่ใช้ ซึ่งลดลงเนื่องจากสารเคมีที่ยังเหลืออยู่ใน ของผสมที่นำมาหมุนเวียนลอยซ้ำ

iii) ผลกระทบจากฟองละเอียด (Slime) หรือตัวแปรอื่น ๆ ที่อาจ กระทบกระเทือนการลอย

iv) ปัญหาการส่งผ่านแร่ลอย (Froth Handling Problem)

ปกติแล้วการทดสอบการลอยแบบวงจรมี 6 ครั้งขึ้นไป ก่อนที่จะทำให้มวลสมดุล (Mass Balance) ของแต่ละวงจร และเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ เวลา และแรงงานมากที่ายสุดการทดสอบมักจะล้มเหลวก่อนที่จะถึงจุดสมดุล จึงได้มีการพัฒนา ใช้การเลียนแบบ (Simulation) การลอยแบบวงจรมี โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์⁽²¹⁹⁾ โดยใช้ผลของการทดสอบการลอยแบบ Batch ก็สามารถกระทำได้

5.3.2 ข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการออกแบบการลอยแร่

การทดสอบจากการลอยแร่ด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ โดยทำการ แปรเปลี่ยนตัวแปร เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของการลอย ซึ่งให้ข้อมูลของการทำงาน ที่มีผลต่อการออกแบบการลอยแร่มีดังนี้คือ (220-221)

ก) การบดลิ้นแร่ให้มีขนาดที่เหมาะสม โดยที่ขนาดเม็ดแร่ที่บดได้นั้นเป็น ขนาดซึ่งสามารถเก็บแร่ได้เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งแสดงถึงขนาดที่สามารถบดลดขนาดได้

(Grindability) และลอยได้ (Floatability) ซึ่งแร่บางชนิดลอยได้ที่ขนาดโตกว่าขนาดที่เป็นอิสระ ขนาดโตนี้มีขีดจำกัดเนื่องจากฟองอากาศไม่สามารถยกเม็ดแร่ให้ลอยสู่พื้นผิวเซลล์ลอยแร่ได้ ขนาดจำกัดของเม็ดแร่ไม่ควรโตกว่า 300 ไมครอน ส่วนขนาดเล็กอาจเกิดปัญหาเนื่องจากเกิดออกซิเดชันบนผิวแร่ จึงมีขนาดเม็ดแร่ไม่ควรเล็กกว่า 5 ไมครอน

ข) ความสม่ำเสมอของสินแร่ป้อน, การแปรเปลี่ยนของความแข็งซึ่งมีผลต่อการบดลดขนาดได้, สัดส่วนของแร่ที่อยู่ร่วมกัน และการลอยได้ ซึ่งขณะทำการทดลองสามารถสังเกตได้ หากมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ

ค) ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการลอยแร่ และลำดับการเติมสารเคมี

ง) ความหนาแน่นของของผสมที่มีความสำคัญต่อปริมาตร และจำนวนเซลล์ลอยแร่

จ) เวลาในการปรับสภาพ (Conditioning Time) ผิวเม็ดแร่ที่พอเพียงและเหมาะสมก่อนการลอย

ฉ) เวลาในการลอย (Flotation Time) ซึ่งได้จากการทดสอบแสดงถึงเวลาที่ใช้ในการแยกหัวแร่ (Concentrate) และหางแร่ (Tailing) ซึ่งขึ้นกับขนาดเม็ดแร่และสารเคมีที่ใช้^(148, 156, 222) โดยที่เวลาในการลอยนี้มีผลต่อการจัดแผนผังวงจรการลอยแร่ (Flowsheet Flotation Circuit) และรวมไปถึงความสามารถในการทำงาน (Capacity) ของโรงลอยแร่ในเชิงพาณิชย์ด้วย

ช) อุณหภูมิของของผสม (Pulp) ซึ่งมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสารเคมีที่ใช้ โดยทั่วไปมักใช้อุณหภูมิห้องในการทดสอบ

ซ) การกัดกร่อน และผุกร่อน (Corrosion and Erosion) ของเซลล์ลอยแร่จากของผสม (Pulp) ในการลอย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมหาวัสดุป้องกัน

ฌ) ชนิดของวงจร (Circuit Type) ซึ่งวงจรลอยแร่จะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดแร่ และความต้องการผลผลิตของคุณภาพหัวแร่ ซึ่งการทดสอบขนาดห้องปฏิบัติการ และโยงไปถึงการทดสอบในโรงประลองแยกแร่ จะสามารถให้ข้อมูลในการออกแบบวงจรที่เหมาะสม

ฎ) ข้อมูลบางประการที่เป็นดัชนีไจเนติกส์ของการลอยแร่ (Flotation Kinetic Index) เช่น

i) ดัชนีเจาะจงการลอย (Flotation Selectivity Index, FSI)⁽¹⁴⁸⁾ คือ อัตราส่วนของการเก็บแร่ได้ของแร่ชนิด A_R ต่อแร่ชนิด B_R ในแร่ลอย R และการเก็บแร่ได้ของแร่ชนิด B_J ต่อแร่ชนิด A_J ในแร่รวม J ซึ่งเป็นดัชนีที่บ่งบอกว่าแร่ชนิดที่ลอยได้ดีกว่าชนิดหนึ่งเล็กน้อยเพียงใดที่สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ ดังแสดงค่าตามสมการ (5.17)

$$\text{ดัชนีเลือกการลอย} = \left[\frac{A_R \times B_J}{B_R \times A_J} \right]^{1/2} \quad \dots (5.17)$$

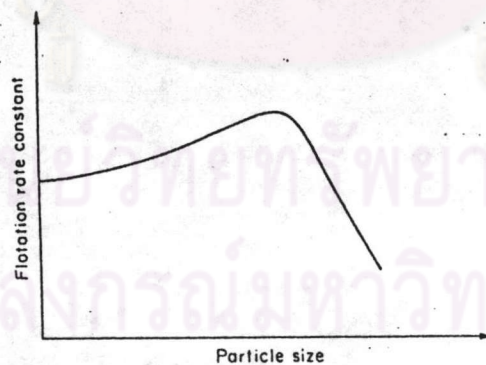
(Flotation Selectivity Index)

ii) ค่าคงที่ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K)⁽¹⁴⁸⁾ จากรูปที่ 5.13 นี้แสดงถึงเวลาที่เหมาะสมในการลอย (Optimum Flotation Time) สำหรับการเก็บแร่ได้ในเชิงพาณิชย์ และอีกลักษณะหนึ่งซึ่งเป็นดัชนีจลศาสตร์การลอย คือ ค่าคงที่ของอัตราการลอย ตามสมการ (5.18)

$$\text{ค่าคงที่ของอัตราการลอย} = \frac{1}{\text{เวลาการลอยแร่}} \times \ln \left[\frac{100}{100 - \text{การเก็บแร่ได้}} \right] \quad \dots (5.18)$$

(Flotation Rate Constant)

โดยที่ค่าคงที่ของอัตราการลอย (K) นี้ขึ้นกับขนาดเม็ดแร่ และระดับของการเป็นอิสระของแร่ (Degree of Mineral Liberation) ตามรูปที่ 5.13 แสดงเส้นโค้งที่เป็นผลรวมของอัตราการลอย (Flotation Rate) ของขนาดเม็ดแร่โดยรวม (Overall Product Size) แต่รูปที่ 5.14 แสดงถึงการแปรเปลี่ยนของค่าคงที่ของอัตราการลอย ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดเม็ดแร่ (Mineral Size)⁽¹⁵⁶⁾



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดเม็ดแร่ (Mineral Size)⁽¹⁵⁶⁾

5.4 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการลอยแร่เฟลด์สปาร์โดยใช้กรดกัดแก้ว

ตัวแปรในการลอยแร่สามารถแบ่งกลุ่มได้ตามตารางที่ 5.8 ซึ่งกล่าวไว้โดยย่อ ๆ ดังนี้

i) ลักษณะของสินแร่ เช่น ชนิดแร่และลักษณะที่อยู่ร่วมกัน, สัดส่วนของชนิดแร่ที่อยู่ร่วมกัน, ขนาดแร่ รวมทั้งส่วนประกอบทางเคมีของแร่ที่จะทำการลอยและแร่มลทิน เป็นต้น

ii) ปัจจัยจากการบดลดขนาด เช่น การกระจายตัวของแร่ที่ผ่านการบด, ความหนาแน่นของของผสมขณะทำการบด, ชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการบด และการเติมสารเคมีขณะทำการบด เป็นต้น

iii) การปรับสภาพ ได้แก่ ชนิดและสารเคมีที่ใช้ เช่น สารเคลือบผิว (Collector), สารปรับสภาพความเป็นกรด - ด่าง (pH Regulator), สารกระตุ้น (Activator), สารกด (Depressant), เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ตลอดจนอุณหภูมิของการทำงาน เป็นต้น

iv) ปัจจัยจากการลอยแร่ เช่น ชนิดของเซลล์ลอยแร่, ลักษณะการทำงานของเซลล์ลอยแร่, การเกิดฟองอากาศและปริมาตรฟอง, ความเร็วในการกวน, ความหนาแน่นของของผสมขณะทำการลอย และเวลาที่ใช้ในการลอย เป็นต้น

v) ปัจจัยอื่น ๆ เช่น การลดฝุ่น (Deslime), การจัดวงจรลอยแร่, น้ำหนักหมุนเวียน (Circulating Load) ในการบดและการลอย และการหมุนเวียนของน้ำ (Circulation of Water) ที่ใช้ในการลอย เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8
ตัวแปรในการลอยแร่ (223-224)

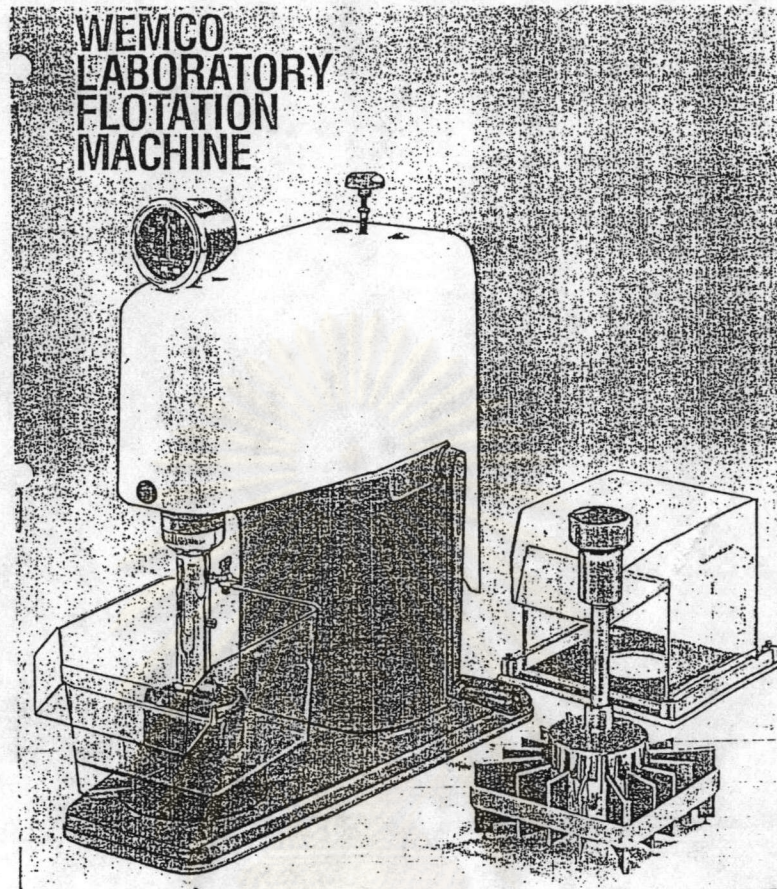
วัตถุดิบ และ/หรือ สินแร่ป้อน	การบดและการคัดขนาด	การกวนของผสม	การลอย
1. ลักษณะของแร่มีค่า และเพื่อนแร่ที่มีค่า	ความละเอียดของเม็ดย่อย และลักษณะการอยู่ร่วมกัน ของเม็ดย่อย	ความเข้มข้นของ ผสม	ความถ่วง จำเพาะ
2. มลทินที่เกิดร่วม กับแร่	ขนาดความแข็งของแร่และ มลทิน	สารเคมีที่เติมขณะ กวนแร่	ขนาดของ เม็ดย่อย
3. ส่วนประกอบของ แร่ที่ละลายน้ำได้	เวลาสัมพัทธ์สำหรับแร่ ชนิดต่างๆในขณะทำการบด	อุณหภูมิขณะกวนแร่	ความเข้มข้น ของของผสม
4. ความรุนแรงของ การได้ทำปฏิกิริยา กับออกซิเจนมาแล้ว	ชนิดของเครื่องบด	เวลาในการกวนแร่	อุณหภูมิขณะ ลอยแร่
5. ส่วนประกอบของน้ำ ที่ใช้ในการลอยแร่	ชนิดของตัวกลางในการบด เช่น ลูกเหล็กกลม (Ball) แท่งเหล็กกลม (Rod) หรือ ลูกบดแบบหินแข็ง (Pebble)	ความรุนแรงของ การกวน	สภาพความ เป็นกรด-ด่าง
6. มลทินที่ละลายได้ใน น้ำโดยเฉพาะเกลือ ของโลหะหนัก	การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ระหว่าง การบด	-	แร่ที่หมุนเวียน เข้า-ออก ใน เครื่องลอยแร่
7. การมีก๊าซบางชนิด เช่น H_2S หรือ SO_2 ในน้ำที่ใช้	สารเคมีที่เติมระหว่าง ทำการบด	-	เวลาที่ใช้ใน การลอยแร่

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)
ตัวแปรในการลอยแร่ (223-224)

วัตถุดิบ และ/หรือ สินแร่ป้อน	การบดและการคัดขนาด	การกวนของผสม	การลอย
8. ความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำที่ใช้	ความหนาแน่นของของ ผสม (Pulp Density) ระหว่างทำการบด	-	ลักษณะหรือ ประเภทของ เครื่องลอยแร่
9. -	ความช้า-เร็วของการ หมุนเวียนของวงจรการบด	-	ความเร็วของ ใบพัดกวนแร่
10. -	-	-	ลักษณะการเกิด ฟองอากาศและ ปริมาตรฟอง ฯ สารเคมีที่เติม

5.4.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

5.4.1.1 เซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ ชนิด WEMCO รุ่น 71250-1 - Agitair ขนาดน้ำที่กวนในการวิจัย 500 กรัม, เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 2-3/4 นิ้ว, ความเร็วใบพัดปรับได้ 1000-1400 รอบ/นาที และอัตราการป้อนอากาศสูงสุด 20 ± 5 ลบ.ฟุต/นาที แสดงตามรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 เซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ ชนิด WEMCO รุ่น 71250-1-Agitair

5.4.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

a) สารเคลือบผิวประจุบวก (Cationic Collector) ประเภทเกลือของอะมีนปฐมภูมิ (Salt of Primary Amine) ชนิดโดเดซิลแอมโมเนียมอะซิเตต (Dodecylammonium Acetate, คำย่อ DAA) มีสูตรเคมี $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{NH}_3\text{COOH}$, น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 245.41 โดยทำเป็นสารละลายกับน้ำที่ 1 % โดยน้ำหนัก

b) สารปรับสภาพความเป็นกรด - ด่าง (pH Regulator) ใช้กรดกัดแก้ว (Hydrofluoric Acid, HF) ของ บริษัท Merck จก., ความเข้มข้นร้อยละ 48 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นทั้งสารกระตุ้น (Activator) การลอยแร่เฟลด์สปาร์ และเป็นสารกด (Depressant) แร่ควอร์ตซ์อีกด้วย

c) สารเคลือบฟอง (Frother) ชนิด Polypropylene Glycol ซึ่งทางการค้าว่า Aerofroth 65 มีสูตรเคมี $\text{CH}_3-(\text{O}-\text{C}_2\text{H}_4)_n-\text{OH}$ ของ Cyanamid Co.,Ltd.

5.4.2 วิธีการวิจัย

จากตารางที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าตัวแปรในการลอยแร่มีมากมาย ในการวิจัยครั้งนี้ จึงได้กำหนดเป็นตัวแปรคงที่และตัวแปรที่สนใจ ดังแสดงตามตารางที่ 5.9 ซึ่งแร่ป้อนในการวิจัยการลอยแร่เป็นแร่ไม่ติดแม่เหล็กผ่านการแยกด้วย WHIMS จำนวน 2 ครั้ง (รหัส H2NM2BR10) โดยมีผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี, สัดส่วนแร่ที่อยู่ร่วมกัน รวมทั้งการกระจายตัวของของแร่ ได้แสดงไว้แล้วตามตารางที่ 4.6 , 4.7 และกราฟรูปที่ 4.53 ในบทที่ 4 ตามลำดับ

การศึกษาการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ด้วยเซลล์ลอยแร่ขนาดห้องปฏิบัติการ, วิธีการลอยแบบ Batch และเป็นการลอยขั้นต้น (Roughing) มีลำดับขั้นตอน ดังนี้ คือ

ก) ทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ที่ค่า pH 2.0, 2.25, 2.50, 2.75 และ 3.0 โดยใช้เวลาปรับสภาพพื้นผิวแร่ (Conditioning Time คำย่อ Cond.Time) เท่ากับ 5 นาที ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงปริมาณของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการลอย (Reagent Consumption, กรัม/ตันแร่ป้อน) เช่น สารเคลือบผิว DAA, สารปรับ pH (หรือสารกระตุ้น/กด) และสารเคลือบฟอง ที่ค่า pH ต่าง ๆ

ข) ทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ที่ 3 ค่า pH ซึ่งเลือกจากผลการวิจัยลำดับ ข) โดย พิจารณา ค่า 3 pH ที่ให้ร้อยละน้ำหนักร้อยได้ ต่อปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA หน่วยเดียวกัน (Collecting Power) มีค่ามาก โดยใช้เวลาในการปรับสภาพเท่ากันคือ 5 นาที ดังเดิม ซึ่งจะได้ค่า pH ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากอัตราการลอยแร่ (Flotation Rate)

ค) ทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ที่ค่า pH จากผลการวิจัยข้อ ข) โดยแปรเปลี่ยนเวลาในการปรับสภาพเป็น 1, 2, 3, 7 นาที (เดิม 5 นาที) ก็จะได้เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมในการลอยแร่เฟลด์สปาร์

ตารางที่ 5.9

ตัวแปรในการวิจัยการลอยแร่เฟลด์สปาร์โดยใช้กรดกัดแก้ว

ประเภทของตัวแปร	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรแปรเปลี่ยน
1. สินแร่ (แร่ป้อน)		
- (H2NM2BR10)	เฟลด์สปาร์ & ควอร์ตซ์	-
- การกระจายตัวของขนาด	- 60 เมช	-
- สัดส่วนแร่ที่อยู่ร่วมกัน-	เฟลด์สปาร์ 80.65	-
% โดยน้ำหนัก	ควอร์ตซ์ 19.23	-
(CIPW NORM)	อื่น ๆ 0.49	-
- % ของแข็งในแร่ป้อนผสมน้ำ	30 %	-
- ความหนาแน่นของของผสม	1.23	-
(กิโลกรัม/ม. ³)		
2. การปรับสภาพ		
สารเคมี	ชนิด	ปริมาณ (กรัม/ตันแร่)
- สารเคลือบผิว	DAA	เริ่ม 100 เพิ่มทีละ 100
- สารเคลือบฟอง	Aerofroth 65	เริ่ม 74 เพิ่มทีละ 74
- สารปรับสภาพกรด	HF	ตาม pH ที่กำหนด
- สารกัด	HF	ตาม pH ที่กำหนด
- เวลาปรับสภาพ (นาที)		1, 2, 3, 5, 7
3. การลอย	Batch	-
- เซลลอยแร่	WEMCO - Agitair	-
- ความเร็วการกวน	1,100 รอบ/นาที	-

5.4.3 ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการวิจัยแต่ละลำดับ ตามหัวข้อ 5.4.2 ข้อ ก) ถึง ค) พิจารณาในเชิงคุณภาพจากการสังเกตขณะทำการลอยแร่ และจะได้ข้อมูลในเชิงปริมาณ กล่าวโดยรวม มีดังนี้คือ

i) ร้อยละน้ำที่แยกแร่ลอยได้ (% Floatability or Cumulative % Weight of Floated Product) และร้อยละน้ำที่แยกแร่ลอยได้ต่อปริมาณสารเคลือบผิว DAA เท่าเดียวกัน (Collecting Power) ที่ตัวแปรต่าง ๆ

ii) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุในรูปออกไซด์ แล้วคำนวณเป็นสัดส่วนร้อยละของแร่ที่อยู่ร่วมกันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CIPW NORM ซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณภาพ (Grade) และการเก็บแร่ได้ (Recovery) ของแร่ลอยได้และแร่จม

iii) ค่าดัชนีโวลูเมตริกการลอย เช่น อัตราการลอย (Flotation Rate), ค่าคงที่ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K) และดัชนีเลือกจงการลอยได้ (Flotation Selectivity Index, FSI)

iv) ขนาดแร่ลอยได้ (Floated Size) และแร่จม ซึ่งในที่นี้ใช้ขนาดของน้ำที่แยกสะสมร้อยละ 80 ผ่านตะแกรง (Cumulative Weight 80 % Passing)

v) ร้อยละการหดตัวโดยปริมาตร (% Volumetric Shrinkage) ของรูปกรวยของแร่ลอยได้และแร่จม ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200°C

5.4.3.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีต่อชนิด และปริมาณสารเคมี และการลอยได้ของแร่เฟลด์สปาร์

ผลการวิจัยจากหัวข้อ 5.4.2 ข้อ ก) ให้ผลตามตารางที่ 5.10 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรต่าง ๆ ในการทำงานรวมทั้งชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ส่วนตารางที่ 5.11 แสดงผลของร้อยละน้ำที่แยกแร่ลอยได้ (% Floatability or Cumulative % Weight of Floated Product) และร้อยละน้ำที่แยกแร่ลอยได้ต่อปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA เท่าเดียวกัน (Collecting Power) ในการลอยแร่เฟลด์สปาร์แต่ละค่า pH

ตารางที่ 5.10
ตัวแปรในการลอยแร่เฟลด์สปาร์ของแต่ละค่า pH

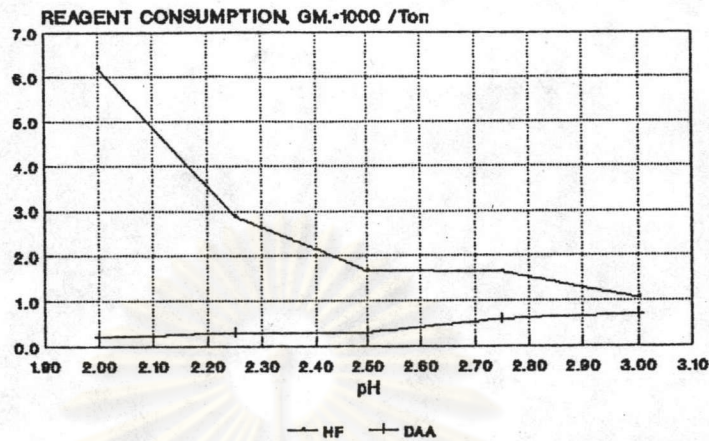
ตัวแปร ๓	pH 2.00	pH 2.25	pH 2.50	pH 2.75	pH 3.00
เวลาที่ใช้การปรับสภาพ (นาที)	5	5	5	5	5
เวลาที่ใช้ในการลอย (นาที)	16.52	22.91	15.75	49.74	38.34
pH ก่อนการปรับสภาพ	7.57	7.42	7.3	7.52	7.43
% ของแข็งในแร่ป้อนผสมน้ำ	30	30	30	30	30
ความเร็วรอบไม้นัด (RPM)	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
ทำการเติมสารเคลือบฟอง- ก่อนการลอย (นาที)	2	2	2	2	2
ปริมาณสารเคมี (กรัม/ตันแร่ป้อน)					
กรดกัดแก้ว (HF)	6,208	2,880	1,664	1,644	1,056
ลำดับการลอย (ครั้ง)	3	4	4	7	7
สารเคลือบผิว DAA	300	400	300	600	800
สารเคลือบฟองที่ใช้ทั้งหมด (Aerofroth-65)	152	152	304	804	880
อุณหภูมิ (°C, องศาเซลเซียส)	27.5	26.2	27.5	27.5	27.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

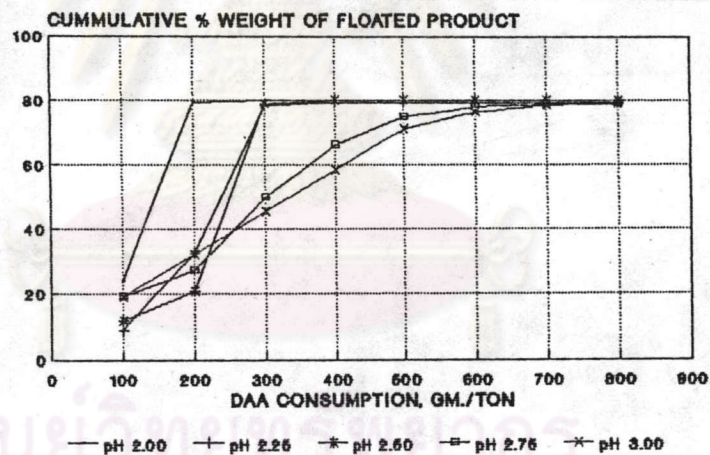
ตารางที่ 5.11

ผลการลอยแร่เฟลด์สปาร์ของแต่ละค่า pH

ปริมาณการใช้ DAA (กรัม/ตัน)	pH 2.00		pH 2.25		pH 2.50		pH 2.75		pH 3.00	
	% น.น. แวลอย	%น.น.แวลอย สะสม	% น.น. แวลอย	%น.น.แวลอย สะสม	% น.น. แวลอย	%น.น.แวลอย สะสม	% น.น. แวลอย	%น.น.แวลอย สะสม	% น.น. แวลอย	%น.น.แวลอย สะสม
100	24.00	24.00	9.00	9.00	11.80	11.80	19.20	19.20	19.20	19.20
200	55.40	79.40	23.40	32.40	9.00	20.80	8.00	27.20	13.00	32.20
300	0.80	80.20	46.00	78.40	58.20	79.00	22.40	49.60	13.20	45.40
400		80.20	1.20	79.60	1.20	80.20	16.60	66.20	13.00	58.40
500		80.20		79.60		80.20	8.80	75.00	12.60	71.00
600		80.20		79.60		80.20	3.20	78.20	5.60	76.60
700		80.20		79.60		80.20	0.80	79.00	2.00	78.60
800		80.20		79.60		80.20		79.00	0.60	79.20
รวม	80.20		79.60		80.20		79.00		79.20	
น.น.แวลอยรวม	19.80		20.40		19.80		21.00		20.80	



รูปที่ 5.16 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีต่อปริมาณการใช้สารปรับ pH (HF) และสารเคลือบผิว (DAA) ในการลอยแร่เฟลด์สปาร์



รูปที่ 5.17 ปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA ต่อการลอยได้ (% Floatability or Cummulative %Weight of Floated Product) แต่ละค่า pH

i) พิจารณากราฟรูปที่ 5.16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้สารปรับ pH และสารเคลือบผิว DAA กับ pH ที่ค่าต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ขึ้นมาให้มึ้นน้ำหนักแร่ลอยได้ประมาณร้อยละ 80 ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนแร่เฟลด์สปาร์ในแร่ป้อน ตามตารางที่ 4.6 ของบทที่ 4 (ดูกราฟรูปที่ 5.17 ประกอบ) ก็พบว่าเมื่อทำการลอยแร่ที่ค่า pH ต่ำ ปริมาณการใช้ HF จะมาก ส่วนปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA จะน้อยและการลอยแร่ที่ค่า pH สูงขึ้นแนวโน้มของการใช้ HF จะลดลง ส่วนปริมาณการใช้

สารเคลือบผิว DAA จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ii) พิจารณากราฟรูปที่ 5.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA กับน้ำหนักแร่ที่ลอยได้ ที่ค่า pH ต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ค่า pH 2.75 และ 3.00 ให้น้ำหนักแร่ลอยได้ต่อปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA ที่เท่ากัน (Collecting Power) มีค่าต่ำกว่าที่เมื่อใช้ค่า pH 2.00, 2.25 และ 2.50 หรือกล่าวได้ว่าที่ 3 ค่า pH นี้ (pH 2.00, 2.25, 3.00) มีการใช้สารเคลือบผิว DAA ต่ำกว่า เมื่อพิจารณาถึงการใช้น้ำหนักสารเคลือบผิว DAA ที่เหมาะสม (DAA Optimum Consumption) ก็จะได้ค่า 200, 300, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน ที่ค่า pH 2.00, 2.25 และ 2.50 ตามลำดับ

iii) สามารถกล่าวได้ว่า เนื่องจาก HF เป็นสารปรับสภาพความเป็นกรด - ด่าง (pH Regulator) ดังนั้นที่ค่า pH ต่ำ ย่อมมีปริมาณหรือความเข้มข้นไอออนของฟลูออไรด์ (F^-) มากด้วย ซึ่งไอออนนี้มีคุณสมบัติในการกระตุ้น (Activate) การลอยแร่เฟลด์สปาร์และกด (Depress) แร่ควอร์ตซ์⁽²⁰⁵⁻²⁰⁹⁾ และที่ค่า pH ต่ำนี้ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว DAA ที่ทำให้เกิดสภาพเฮมิไมซัลล์ (Hemi-micelle) ต่ำลง ตามที่อธิบายในหัวข้อ 5.2.2 นั่นคือปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA ต่ำลงนั่นเอง ซึ่งเป็นผลต่อการลอยแร่ให้ Collecting Power มีค่ามาก ส่วนการลอยแร่ที่ค่า pH สูงขึ้นก็สามารถอธิบายได้ในทางกลับกัน เชื่อว่ากลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism) ทำให้ผิวแร่ไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic Layer) สอดคล้องตามสมการที่ 5.13 ถึง 5.16⁽²⁰⁵⁻²⁰⁸⁾

5.4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ที่มีต่ออัตราการลอย (Flotation Rate)

จากผลการวิจัยในหัวข้อ 5.4.3.1 ก็จะได้ 3 ค่า pH 2.00, 2.25 และ 2.50 ที่ปริมาณการใช้สารเคลือบผิว DAA 200, 300 และ 300 กรัม/ตันแร่ป้อน ตามลำดับ ซึ่งให้ Collecting Power สูงกว่า pH 2.75 และ 3.00 มาทำการหาอัตราการลอย (Flotation Rate) ที่ใช้เวลาปรับสภาพ 5 นาที (ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ เพื่อเป็นไปตามมาตรฐานเดียวกัน) ผลการวิจัยแสดงตามตารางที่ 5.12

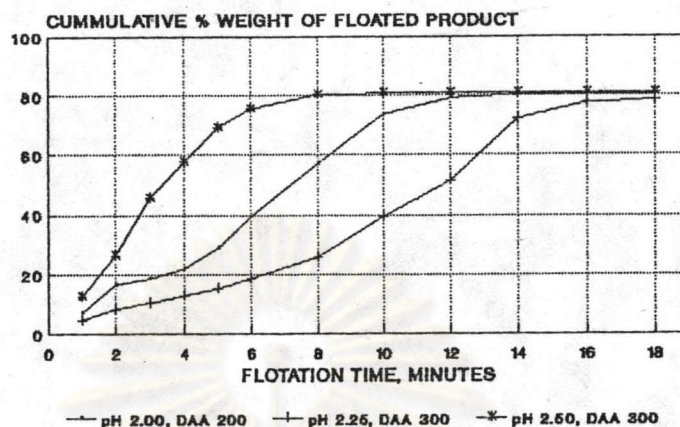
ตารางที่ 5.12

ผลการล่อยแร่เฟลด์สปาร์ที่ค่า pH 2.00, 2.25 และ 2.50

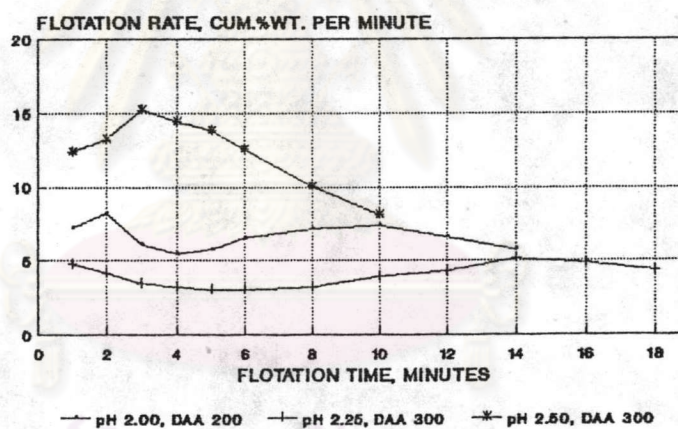
สารเคลือบผิว 200, 300, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาลอย (นาที)	pH 2.00 DAA 200 กรัม/ตัน			pH 2.25 DAA 300 กรัม/ตัน			pH 2.50 DAA 300 กรัม/ตัน		
		% น.น. แวลลอย	% น.น. แวลลอย สะสม	อัตรา การล่อย*	% น.น. แวลลอย	% น.น. แวลลอย สะสม	อัตรา การล่อย*	% น.น. แวลลอย	% น.น. แวลลอย สะสม	อัตรา การล่อย*
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 1	1.0	7.20	7.20	7.20	4.80	4.80	4.80	12.40	12.40	12.40
1 - 2	2.0	2.00	16.40	8.20	3.60	8.40	4.20	14.00	26.40	13.20
2 - 3	3.0	2.00	18.40	6.13	2.00	10.40	3.47	19.20	45.60	15.20
3 - 4	4.0	3.40	21.80	5.45	2.40	12.80	3.20	12.20	57.80	14.45
4 - 5	5.0	7.00	28.80	5.76	2.40	15.20	3.04	11.40	69.20	13.84
5 - 6	6.0	10.40	39.20	6.53	3.20	18.40	3.07	6.20	75.40	12.57
6 - 8	8.0	18.00	57.20	7.15	7.40	25.80	3.23	5.00	80.40	10.05
8 - 10	10.0	16.40	73.60	7.36	13.40	39.20	3.92	0.40	80.80	8.08
10 - 12	12.0	5.60	79.20	6.60	12.20	51.40	4.28			
12 - 14	14.0	1.00	80.20	5.73	20.80	72.20	5.16			
14 - 16	16.0				5.40	77.60	4.85			
16 - 18	18.0				1.00	78.60	4.37			
	รวม	80.20			78.60			80.80		
	แวลรวม	19.80			21.40			19.20		

* % นน. แวลลอยสะสม ต่อนาที



รูปที่ 5.18 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีต่อการลอยได้



รูปที่ 5.19 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีต่ออัตราการลอย

i) พิจารณากราฟรูปที่ 5.18 ผลการลอยได้ที่ค่า pH 2.00, 2.25 และ 2.50 ต่อเวลาการลอย แสดงให้เห็นว่าการลอยแร่เฟลด์สปาร์ให้ได้น้ำหนักแร่ลอยได้ที่ค่าปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของแร่ป้อน (มีแร่เฟลด์สปาร์ประมาณร้อยละ 80 ในแร่ป้อน) ณ ค่า pH 2.50 ใช้เวลาการลอยต่ำกว่าที่ค่า pH 2.00 และ 2.25 ตามลำดับ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าที่เวลาการลอยค่าเดียวกันที่ค่า pH 2.50 มีอัตราการลอยสูงกว่า pH 2.00 และ 2.25 ดังแสดงโดยกราฟรูปที่ 5.19

ii) สามารถกล่าวได้ว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีความสัมพันธ์ต่อการลอยได้, เวลาการลอย ซึ่งส่งผลต่ออัตราการลอย (Flotation Rate) กล่าวคือ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที สารเคลือบผิวทำการดูดซับเกิดพื้นผิวแร่ไม่เปียกน้ำที่ทำให้การเกาะติด (Attachment) ของฟองอากาศต่อผิวแร่มีความคงตัว หรืออีกนัยหนึ่งค่า pH นี้มีมุมสัมผัส (Contact Angle) สูงสุด วิจารณ์จากกราฟรูปที่ 5.11⁽²⁰⁵⁾ รวมทั้งปัจจัยจากสารเคลือบผิวที่ใช้และขนาดเม็ดแร่^(148, 156, 222) ซึ่งส่งผลต่ออัตราการลอยหรือเวลาที่ใช้ในการลอย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการทำงานดังกล่าวข้างต้นเป็นสภาวะการลอยแร่ที่เหมาะสม (Optimum Flotation Condition) ซึ่งบ่งชี้จากอัตราการลอย และพิจารณาเวลาที่เหมาะสมในการลอยแร่ (Optimum Flotation Time) เท่ากับ 8 นาที

5.4.3.3 ผลของเวลาปรับสภาพที่มีต่อการลอยได้ของแร่เฟลด์สปาร์

ลำดับการวิจัยนี้ต่อเนื่องจากผลการวิจัยหัวข้อ 5.4.3.2 โดยทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, แปรเวลาในการปรับสภาพเป็น 1, 2, 3, และ 7 นาที (เดิมเวลาปรับสภาพ 5 นาที) ซึ่งให้ผลการวิจัยแสดงตามตารางที่ 5.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.13

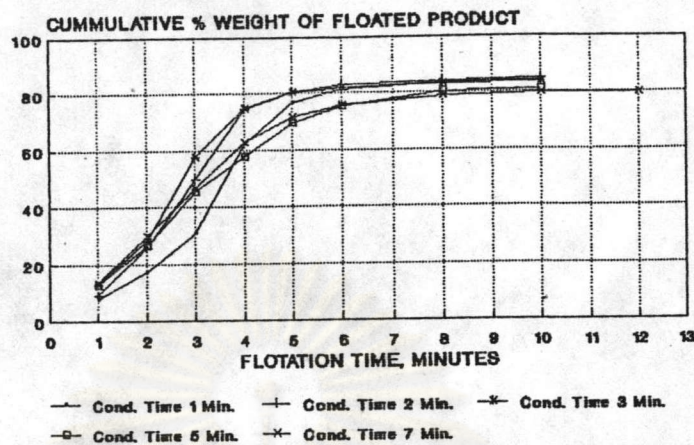
ผลการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.60, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน
ที่เวลาปรับสภาพต่าง ๆ กัน

ช่วงเวลา (นาที)	เวลาลอย (นาที)	เวลาปรับสภาพ 1 นาที			เวลาปรับสภาพ 2 นาที				เวลาปรับสภาพ 3 นาที					เวลาปรับสภาพ 5 นาที					เวลาปรับสภาพ 7 นาที			
		% น.น. แร่ลอย	% น.น. แร่ลอย สะสม	อัตรา การลอย*	% น.น. แร่ลอย	% น.น. แร่ลอย สะสม	อัตรา การลอย*	ขนาดแร่ ลอยได้*** (ไมครอน)	% น.น. แร่ลอย	% น.น. แร่ลอย สะสม	อัตรา การลอย*	ขนาดแร่ ลอยได้ (ไมครอน)	%การห ตัวโดย ปริมาตร	% น.น. แร่ลอย	% น.น. แร่ลอย สะสม	อัตรา การลอย*	ขนาดแร่ ลอยได้*** (ไมครอน)	%การห ตัวโดย ปริมาตร	% น.น. แร่ลอย	% น.น. แร่ลอย สะสม	อัตรา การลอย*	
0 - 1	1.0	7.40	7.40	7.40	9.20	9.20	9.20	180	12.80	12.80	12.80	180	48.43	12.40	12.40	12.40	175	65.28	13.40	13.40	13.40	
1 - 2	2.0	9.80	17.20	8.60	16.60	25.80	12.90	194	15.40	28.20	14.10	195	48.43	14.00	26.40	13.20	192	65.28	16.40	29.80	14.90	
2 - 3	3.0	13.60	30.80	10.27	24.20	50.00	16.67	205	29.60	57.80	19.27	210	45.12	19.20	45.60	15.20	204	60.10	16.80	46.60	15.53	
3 - 4	4.0	31.40	62.20	15.55	6.20	74.20	18.55	220	17.00	74.80	18.70	220	51.50	12.20	57.80	14.45	215	60.10	16.00	62.60	15.65	
4 - 5	5.0	14.20	76.40	15.28	2.40	80.40	16.08	225	5.60	80.40	16.08	225	32.77	11.40	69.20	13.84	220	58.50	9.00	71.60	14.32	
5 - 6	6.0	4.80	81.20	13.53	1.40	82.80	13.47	228	1.40	81.80	13.63	228	32.77	6.20	75.40	12.57	225	58.50	4.00	75.60	12.60	
6 - 8	8.0	2.20	83.40	10.43	0.60	84.20	10.53	228	1.20	83.00	10.38	228		5.00	80.40	10.05	228	58.50	3.00	78.60	9.83	
8 - 10	10.0	0.60	84.00	8.40		84.80	8.48	228	0.40	83.40	8.34	228		0.40	80.80	8.08			0.80	79.40	7.96	
10 - 12	12.0																		0.40	79.80	6.65	
	รวม	84.00			84.80				83.40					80.80						79.80		
	รวม	16.00			15.40			220	16.60			220	21.57	19.20					13.36	20.20		

* % น.น. แร่ลอยสะสม ต่อ นาที

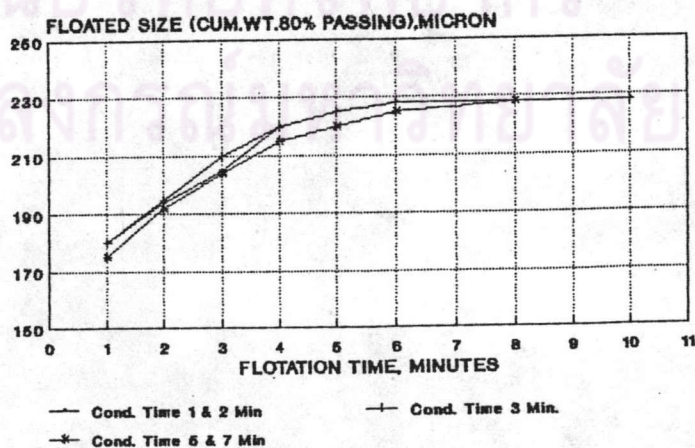
** ขนาดแร่ลอยได้ ที่เวลาปรับสภาพ 1 นาที เท่ากับ ที่เวลาปรับสภาพ 2 นาที

*** ขนาดแร่ลอยได้ ที่เวลาปรับสภาพ 5 นาที เท่ากับ ที่เวลาปรับสภาพ 7 นาที



รูปที่ 5.20 ผลของเวลาปรับสภาพที่มีต่อการลอยได้ของแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน

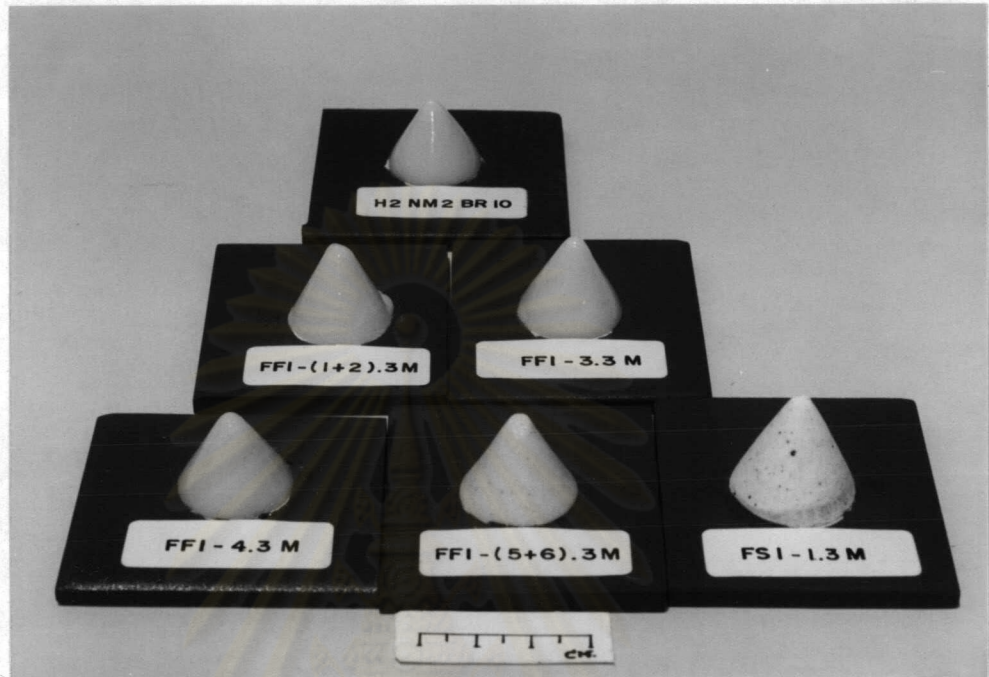
i) พิจารณากราฟรูปที่ 5.20 แสดงผลของเวลาปรับสภาพ 1, 2, 3, 5, 7 นาที ที่มีต่อการลอยได้ของแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน จะเห็นได้ว่าที่เวลาปรับสภาพเร็วกว่า 5 นาที คือ 1 ถึง 3 นาที ให้ผลการลอยแร่มีน้ำหนักเกินร้อยละ 80 ของแร่ป้อน ซึ่งมากกว่าเมื่อทำการลอยเมื่อใช้เวลาปรับสภาพ 5 นาทีขึ้นไป (ซึ่งจะได้น้ำหนักแร่ลอยประมาณร้อยละ 80 ของแร่ป้อน) ส่วนที่เวลาปรับสภาพ 5 และ 7 นาที มีแนวโน้มของการลอยได้ใกล้เคียงกัน แต่ ณ เวลาปรับสภาพ 5 นาทีให้ผลการลอยแร่มีน้ำหนักร้อยละ 80 ก่อนเวลาปรับสภาพ 7 นาที



รูปที่ 5.21 ผลของเวลาปรับสภาพที่มีต่อขนาดแร่ลอยได้ที่น้ำหนักสะสมร้อยละ 80 ผ่านตะแกรง ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน

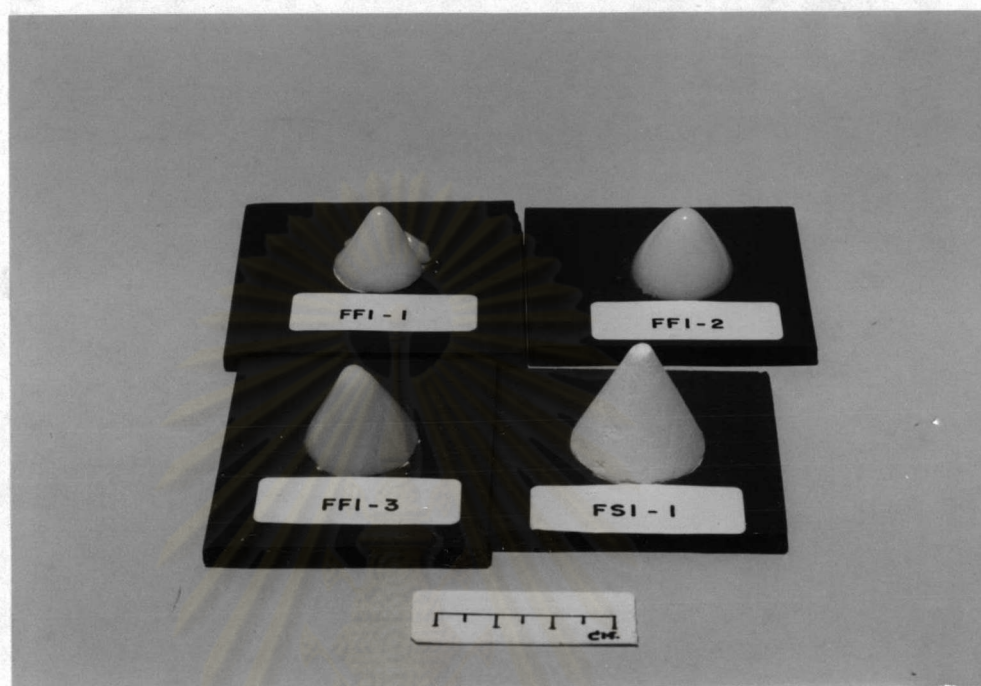
ii) พิจารณากราฟรูปที่ 5.21 แสดงผลของเวลาปรับสภาพ 1, 2, 3, 5 และ 7 นาที ที่มีต่อขนาดแร่ลอยได้ที่น้ำที่กักสะสมร้อยละ 80 ผ่านตะแกรง ๗ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน จะเห็นได้ว่าที่เวลาปรับสภาพ 1 ถึง 3 นาที มีแนวโน้ม โดยส่วนใหญ่ของขนาดแร่ลอยได้โตกว่าที่ใช้เวลาปรับสภาพ 5 และ 7 นาที แต่จะใกล้เคียงกันที่ เวลาการลอยแร่ 8 นาที ซึ่งอธิบายได้ว่า การปรับสภาพพื้นผิวแร่เป็นการเตรียมการให้สาร เคลือบผิวเกิดปฏิกิริยาดูดซับต่อผิวเม็ดแร่ก่อเกิดผิวแร่ไม่เปียกน้ำ ดังนั้นเวลาในการปรับสภาพจะ บ่งชี้ถึงพื้นผิวแร่ซึ่งแปรตามขนาดเม็ดแร่ (Mineral Size) และส่งผลต่อการลอยได้ ดังนั้นใน กรณีของการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ช่วงเวลาปรับสภาพ 1 ถึง 3 นาที น่าจะไม่พอเพียงในการทำ ให้เกิดกลไกการดูดซับดังกล่าว จึงมีผลให้พื้นผิวที่กักแร่ลอยได้เกินค่าร้อยละ 80 และขนาดแร่ลอย ได้ที่ช่วงเวลาปรับสภาพ 1 ถึง 3 นาที มีแนวโน้มโตกว่าที่ใช้เวลาปรับสภาพ 5 และ 7 นาที ซึ่งน่าจะเป็นแร่ควอร์ตซ์มีโอกาสปะปนมากับแร่ลอยได้ (Misplaced) เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้เวลาการปรับสภาพเร็ว (1 ถึง 3 นาที) ที่เวลาการลอยเพิ่มขึ้น (ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการบด ลดขนาดในบทที่ 3 แร่ควอร์ตซ์โดยส่วนใหญ่ มักมีขนาดโต เนื่องจากมีความแข็ง (Hardness) มากกว่าแร่เฟลด์สปาร์) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการหารูป กรวยของแร่ลอยได้และแร่จม ๗ เวลาปรับสภาพ 3 และ 5 นาที ตามรูปที่ 5.22 และ 5.23 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูป กรวยของแร่ลอยได้ ที่เวลาปรับสภาพ 3 นาที ยังคงทรงรูปและสากมือ หรือมีร้อยละการหดตัว โดยปริมาตรต่ำกว่าเวลาปรับสภาพ 5 นาที (ตามตารางที่ 5.13) ซึ่งแสดงถึงย่อมมีแร่ควอร์ตซ์ ปะปนมากนั่นเอง ดังนั้น ๗ เวลาการปรับสภาพ 5 นาที น่าจะพอเพียงต่อ ขนาดแร่เฟลด์สปาร์ ของการลอยที่ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.22 ผลการเพาะรูปกรวยของแผลลอยได้ [(FFI-(1+2).3M, เวลาลอย 1+2 นาที), (FFI-3.3M, เวลาลอย 3 นาที), (FFI-4.3M, เวลาลอย 4 นาที), (FFI-(5+6).3M, เวลาลอย 5+6 นาที)] และแผลจม (FSI-1.3M), เวลาปรับสภาพ 3 นาที, ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแผลป้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.23 ผลการเพาะรูปกรวยของแร่ลอยได้ [(FFI-1, เวลาลอย 1+2 นาที), (FFI-2, เวลาลอย 3+4 นาที), (FFI-3, เวลาลอย 5+8 นาที)] และแร่จม (FSI-1), เวลาปรับสภาพ 5 นาที, ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน

iii) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ลอยได้และแร่จมของการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 5 นาที, เวลาการลอยแร่ 8 นาที ตามตารางที่ 5.14 จะให้ผลเป็นตารางที่ 5.15 ซึ่งแสดงถึง การเก็บแร่ได้ (Recovery), คุณภาพแร่ (Grade), ค่าคงที่ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K) ตามลำดับ

ตารางที่ 5.14

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสัดส่วนแร่ที่อยู่ร่วมกันของการลอยแร่เฟลด์สปาร์

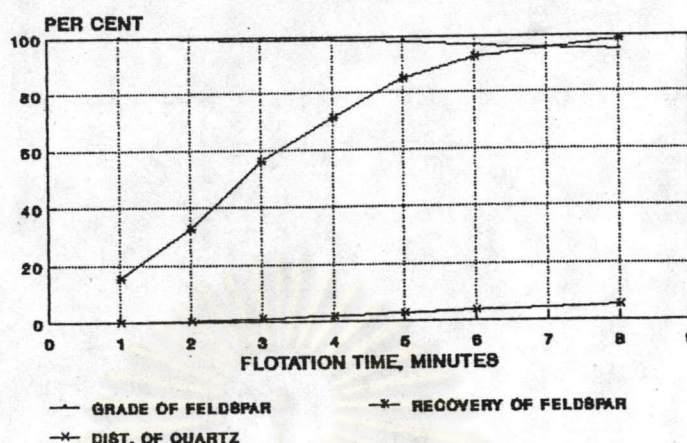
ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	แร่ลอยที่ 0-1 นาที	แร่ลอยที่ 1-2 นาที	แร่ลอยที่ 2-3 นาที	แร่ลอยที่ 3-4 นาที	แร่ลอยที่ 4-5 นาที	แร่ลอยที่ 5-6 นาที	แร่ลอยที่ 6-8 นาที	รวม
SiO ₂	66.39	66.73	67.12	67.14	67.13	67.77	68.30	97.50
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	0.01
Al ₂ O ₃	19.26	19.28	19.28	19.20	19.14	18.77	18.41	1.43
Fe ₂ O ₃	0.032	0.032	0.035	0.038	0.047	0.065	0.072	0.080
MnO	-	-	-	-	-	-	-	0.01
CaO	0.40	0.41	0.48	0.46	0.44	0.45	0.45	0.20
Na ₂ O	6.39	7.01	7.65	7.45	7.28	7.10	6.80	0.48
K ₂ O	7.41	6.47	5.38	5.64	5.88	5.79	5.92	0.25
LOI	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
รวม	100.24	100.29	100.30	100.29	100.28	100.30	100.31	100.32
<u>สัดส่วนแร่ที่อยู่ร่วมกัน (CIPW NORM)</u>								
ไมโครไคลน์	43.79	38.24	31.79	33.33	34.75	34.22	34.99	1.48
แอลไบต์	54.07	59.32	64.73	63.04	61.60	60.08	57.54	4.06
อะนาอริไทต์	1.98	2.03	2.38	2.28	2.18	2.23	2.22	0.99
รวมแร่เฟลด์สปาร์	99.84	99.59	98.90	98.65	96.53	96.53	94.75	6.53
แร่ควอร์ตซ์	0.00	0.31	1.00	1.23	1.34	3.35	5.13	93.32
แร่อื่น ๆ	0.40	0.39	0.40	0.41	0.41	0.42	0.43	0.47

ตารางที่ 5.16

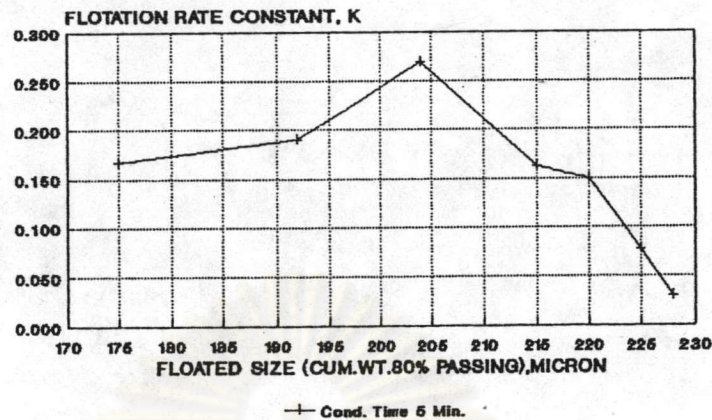
การเก็บแร่ได้ (Recovery), ความหนาแน่น (Grade) และค่าคงที่ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K) ของการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที

รหัส	เวลาลอย (นาที)	% หน. แร่ลอย	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O	เฟลด์สปาร์			ควอตซ์			ค่าคงที่ของอัตราการลอย (K)
									% Grade	% การเก็บแร่ได้		% Grade	% การกระจายตัว		
										(ช่วงเวลา)	(สะสม) (Recovery)		(ช่วงเวลา)	(สะสม) (Dist.)	
H2NM2BR10		แร่ป้อน	72.80	15.56	0.047	0.41	5.86	4.88	80.66			19.22			
FFI-1	1.0	12.40	66.39	19.26	0.032	0.40	6.39	7.41	99.84	15.36	15.36	0	0	0	0.167
	2.0	14.00	66.73	19.28	0.032	0.41	7.01	6.47	99.64	17.30	32.67	0.31	0.22	0.22	0.190
FFI-2	3.0	19.20	67.12	19.28	0.035	0.48	7.65	5.38	98.90	23.56	56.22	1.00	1.00	1.22	0.269
	4.0	12.20	67.14	19.20	0.038	0.46	7.45	5.64	98.65	14.94	71.16	1.23	0.78	2.00	0.162
	5.0	11.40	67.13	19.14	0.047	0.44	7.28	5.88	98.53	13.94	85.10	1.34	0.79	2.79	0.150
FFI-3	6.0	6.20	67.77	18.77	0.065	0.45	7.10	5.79	96.52	7.43	92.63	3.35	1.08	3.87	0.077
	8.0	5.00	68.30	18.41	0.072	0.45	6.80	5.92	94.75	5.88	98.41	5.13	1.33	5.20	0.030
Float Calc.		80.40	67.07	19.16	0.041	0.44	7.17	6.02	98.63			1.25			
FSI-1 (Sink)		19.60	97.50	1.43	0.080	0.20	0.48	0.25	6.53	1.59		93.52	94.80		
Head Calc.		100.00	73.03	15.68	0.048	0.40	5.86	4.92	80.58			19.29			



รูปที่ 5.24 ผลของการเก็บแร่ได้ (Recovery) และคุณภาพแร่ (Grade) ของ การลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที

a) พิจารณากราฟรูปที่ 5.24 แสดงถึงคุณภาพแร่ (Grade), การเก็บได้ของแร่เฟลด์สปาร์ (Recovery of Feldspar), สัดส่วนแร่ควอร์ตซ์ ที่ปะปนมากับแร่ลอยได้ (Distribution of Quartz) เมื่อทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลา การลอยเพิ่มขึ้น (ภายใต้เวลาการลอยเหมาะสม 8 นาที) การเก็บแร่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่คุณภาพ ของแร่เฟลด์สปาร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีแร่ควอร์ตซ์ลอยปะปนเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 5.15 จะได้ว่าหัวแร่เฟลด์สปาร์จากการคำนวณ (Float Calc.) มีคุณภาพแร่เฟลด์สปาร์ร้อยละ 98.63 ที่การเก็บแร่ได้ร้อยละ 98.41 และมีสัดส่วนแร่ควอร์ตซ์ปะปนในหัวแร่เฟลด์สปาร์อยู่ร้อยละ 5.20 ที่คุณภาพร้อยละ 1.25 ผลวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีและสัดส่วนแร่ที่อยู่ร่วมกันของ แร่ลอยได้ แสดงตามตารางที่ 5.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของแร่เฟลด์สปาร์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก (53-60) ส่วนแร่จม (แร่ควอร์ตซ์โดยส่วนใหญ่) มีคุณภาพแร่ควอร์ตซ์ร้อยละ 93.52 ที่การ เก็บแร่ควอร์ตซ์ได้ร้อยละ 94.80 และยังมีสัดส่วนแร่เฟลด์สปาร์ปะปนอยู่ร้อยละ 1.59 และ ดัชนีเงาจะจงการลอย (FSI) มีค่าเท่ากับ 32.37 (ซึ่งหมายถึงในสภาวะการทำงานที่ตัวแปร นี้ แร่เฟลด์สปาร์ลอยได้ดีกว่าแร่ควอร์ตซ์ 32.37 เท่านั่นเอง)



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K) กับขนาดแร่ลอยได้ (ที่น้ำหนักสะสมร้อยละ 80 ผ่านตะแกรง) ของการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที

b) วิจารณ์กราฟรูปที่ 5.25 แสดงผลของ ค่าคงที่ของอัตราการลอย (K) ต่อขนาดแร่ลอยได้ ของการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาปรับสภาพ 5 นาที จะเห็นได้ว่า ขนาดแร่ลอยได้มีค่าคงที่ของอัตราการลอยสูงสุด (0.269) ที่ขนาด 204 ไมครอน ที่เวลาการลอยแร่ 3 นาที ซึ่งถือว่าเป็นขนาดเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่ลอยได้เร็ว (Fast Float) ส่วนที่ขนาดละเอียดและขนาดโตกว่า ถือได้ว่าเป็นขนาดลอยได้ช้า (Slow Float) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟรูปที่ 5.14 ในบทที่ 5⁽¹⁵⁶⁾

c) สามารถกล่าวได้ว่าเวลาการปรับสภาพ 5 นาทีของการลอยแร่ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน เป็นเวลาที่เหมาะสมและพอเพียงในการปรับสภาพของการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อขนาดเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่ลอยได้ที่สภาวะการทำงานนี้ ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาในข้อ ii) และในหัวข้อ 5.4.3.2 ดังกล่าวข้างต้น

5.4.4 สรุปผลการวิจัย

ผลของค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH), เวลาในการปรับสภาพ ที่มีต่อชนิด และปริมาณสารเคมีที่ใช้, การลอยได้ (% Floatability), ร้อยละน้ำที่แยกได้ต่อปริมาณ สารเคลือบผิว DAA หน่วยเดียวกัน (Collecting Power), อัตราการลอย (Flotation Rate), คุณภาพแร่ (Grade), การเก็บแร่ได้ (Recovery), ขนาดแร่ลอยได้ (Floted Size), ดัชนีเจาะจงการลอยได้ (Flotation Selectivity Index, FSI) และค่าคงที่ ของอัตราการลอย (Flotation Rate Constant, K) ของการลอยแร่เฟลด์สปาร์โดยใช้ กรดกัดแก้ว (HF) สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

i) การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จะมีผลต่อปริมาณสาร ปรับ pH (HF), สารเคลือบผิวประเภท (DAA), การลอยได้ รวมทั้งร้อยละน้ำที่แยกได้ ต่อปริมาณสารเคลือบผิว DAA หน่วยเดียวกัน ดังได้อธิบายในหัวข้อ 5.4.3.1 และมีผลต่ออัตรา การลอย หรือเวลาในการลอย และสภาวะการลอยแร่ที่เหมาะสม (Optimum Flotation Condition) คือ ทำการลอยแร่เฟลด์สปาร์ ณ ค่า pH 2.50, 300 กรัม DAA/ตันแร่ป้อน, เวลาการปรับสภาพ 5 นาที และเวลาการลอยแร่ 8 นาที ดังได้อธิบายในหัวข้อ 5.4.3.2

ii) การเปลี่ยนแปลงเวลาปรับสภาพก็จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการลอย ได้, ขนาดแร่ลอยได้, เวลาที่ใช้ในการลอย, คุณภาพแร่, การเก็บแร่ได้ ซึ่งส่งผลต่อค่าดัชนี จลนศาสตร์การลอย ดังได้อธิบายตามหัวข้อ 5.4.3.3 และเวลาปรับสภาพที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ ประมาณ 5 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย