เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับเฟร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride, Iron (III) chloride)

คมสัน ตันยืนยงค์

เฟร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่มีความสำคัญต่อกระบวนการปรับคุณภาพน้ำ การบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชน และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเป็นสารสร้างตะกอนหรือตกตะกอน (Coagulant) ที่ดีมาก กล่าวคือ สามารถกำจัดฟอสเฟต และโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ฯลฯ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เฟร์ริกคลอไรด์ยังสามารถควบคุมกลุ่มของน้ำเสียได้ โดยการรวมตัวกับอนุมูลซัลไฟด์ตกเป็นตะกอนเหล็กซัลไฟด์ ทำให้กลิ่นของน้ำเสียลดลง กากตะกอน (sludge) ที่เกิดขึ้นจากการใช้เฟร์ริกคลอไรด์สามารถนอนก้นได้เร็ว ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าสารตกตะกอนตัวอื่นๆ

คุณสมบัติ (Properties)

เฟร์ริกคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เฟร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึก มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $FeCl_3$ น้ำหนักโมเลกุล 162.206 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกสะโกนอล (Hexagonal) มีสีเกือบดำ เมื่อเป็นแผ่นผลึกขนาดเล็กละเอียดจะมีลักษณะมันวาวเหมือนโลหะ ที่อุณหภูมิ 305 องศาเซลเซียสจะระเหิด (sublime) กลายเป็นไอ จุดหลอมเหลวที่ 332 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 2.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และผลึกเป็นประเภทไฮโกรสโคปิค (hygroscopic) ที่แรง ทำให้สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ ซึ่งจะทำให้เกิดชุดของโครงสร้างของน้ำผลึกหลายแบบ คือ $FeCl_3.x\ H_2O$ เมื่อ x เท่ากับ 6, 3.5, 2.5, 2

2. เฟร์ริกคลอไรด์หกน้ำผลึก มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $FeCl_3.6\ H_2O$ น้ำหนักโมเลกุล 270.30 มีจุดหลอมเหลว 37 องศาเซลเซียส ผนึกที่มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิค (monoclinic crystal) จะมีสีน้ำตาล-เหลือง หรือสีส้ม โดยมีโครงสร้างทางเคมีคือ $[FeCl_2(H_2O)_4]^+\ Cl^-.2H_2O$

ในภาวะที่อุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส และมีก๊าซคลอรีนอยู่มากเกินพอ เฟร์ริกคลอไรด์จะเป็นก๊าซที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบไดเมอริค (dimeric) คือ Fe_2Cl_6 ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส จะเกิดการแตกตัว (dissociate) เป็นโมโนเมอริค (monomeric) คือ $FeCl_3$ ถ้าก๊าซคลอรีน ที่มีอยู่ไม่มากเกินไปจะเกิดการสลายตัวให้เฟอรัสคลอไรด์ และก๊าซคลอรีนเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 200 องศาเซลเซียส

เฟร์ริกคลอไรด์ละลายในน้ำได้ดีมากคือ 430 กรัมของเฟร์ริกคลอไรด์ต่อน้ำหนักของสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์หนึ่งกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หรือ 480 กรัมต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือ 743 กรัมต่อกิโลกรัมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ค่าเอนทัลปี (enthalpy) ของการเตรียมสารละลายร้อยละ 40 จากเฟร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึกเท่ากับ 95 kJ/mol ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

สารละลายเฟร์ริกคลอไรด์มีสีน้ำตาลแดง และมีฤทธิ์เป็นกรดที่แรง เมื่อทำให้เจือจางลง และทำให้เป็นกลางด้วยการเติมด่างอย่างช้าๆ ไอออน $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$ จะเปลี่ยนไปเป็นไอออน $[Fe(OH)(H_2O)]^{2+}$ และเกิดไดเมอริค (dimeric) ของไอออน $(Fe_2(OH)_2(H_2O_8)]^{4+}$ สีของสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์เปลี่ยนไปเป็นสีเหลือง และเมื่อค่าใกล้เป็นกลางมากขึ้นจะได้สารคอลลอยดอล (colloidal) สีน้ำตาลของ FeOOH เมื่อทำให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นคอลลอยดอลจะเปลี่ยนรูปไปเป็นตะกอนของเหล็กไฮดรอกไซด์ $Fe(OH)_3$

เฟร์ริกคลอไรด์ละลายได้ในตัวทำละลายที่มีขั้ว (polar solvent) เช่น แอลกอฮอล (alcohol) คีโทน (ketone) อีเธอร์ (ether) ไนไทรล์ (nitrile) เอมีน (amine) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulphur dioxide) แต่ละลายได้น้อยในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (nonpolar solvent) เช่น เบนซีน (benzene) และเฮกเซน (hexane) เฟร์ริกคลอไรด์เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเกลือหรือคลอไรด์ให้ไอออนคอมเพล็ก (complex) คือ เททระคลอโรเฟอเรต $[FeCl_4]^-$ และ $[FeCl_4(H_2O)_2]^-$ ที่สามารถรวมตัวกับตัวทำละลายโดเนอร์ ดังนั้น เฟร์ริกคลอไรด์ที่มีกรดเกลืออยู่สามารถสกัดออกจากสารละลายด้วยอีเธอร์

เฟร์ริกคลอไรด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ดังนั้นจึงมีโลหะหลายตัว เช่น เหล็ก ทองแดง นิเกิล แพลเลเดียม แพลทินัม แมงกานีส ตะกั่ว และดีบุก สามารถละลายได้ในสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์ และให้เฟอรัสคลอไรด์ออกมา โลหะแมกนีเซียมละลายในสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์ให้ก๊าซไฮโดรเจน สารประกอบคาร์บอเนตของโลหะอัลคาไลท์ละลายในสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เฟร์ริกคลอไรด์เมื่อทำให้ร้อนในอากาศจะสลายตัวให้เฟร์ริกออกไซด์ และก๊าซคลอรีน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เฟร์ริกคลอไรด์ถูกรีดิวซ์อย่างรวดเร็วด้วยก๊าซไฮโดรเจนให้โลหะเหล็ก และถ่านหิน (coal) ก็รีดิวซ์เฟร์ริกคลอไรด์ด้วย

การผลิต (Production)

การผลิตเฟร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึกในระดับอุตสาหกรรมทำได้ 2 กระบวนการ คือ

1. กระบวนการเติมคลอรีนโดยตรง (Direct chlorination) เป็นการผลิตเฟร์ริกคลอไรด์จากการทำปฏิกิริยาของก๊าซคลอรีนแห้งกับเศษเหล็กที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการผลิตคือ การบรรจุเศษเหล็กชิ้นเล็กๆ ที่ผ่านการเผาก่อนเข้าไปทางตอนบนของเตาเผาเหล็กแบบชัฟท์ที่มีน้ำเป็นตัวระบายความร้อน (Water-cool iron shaft furnace) ขณะที่ก๊าซคลอรีน (หรือก๊าซผสมของก๊าซคลอรีน และก๊าซไนโตรเจน) ถูกบรรจุเข้าที่ตอนล่างของเตา เพื่อป้องกันการเกิดเฟอรัสคลอไรด์ ก๊าซคลอรีนที่ใช้ต้องมีมากเกินพอร้อยละ 10-30 และเติมเศษเหล็กเข้าไปอย่างต่อเนื่องในอัตราเร็วที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา และ ปริมาณของก๊าซคลอรีนที่เหลืออยู่ในก๊าซที่ปล่อยออกมาจากเตาเผา ไอของเฟร์ริกคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจะผ่านเข้าไปในห้องควบแน่น (condensation chamber) ที่ใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ หรือ อากาศ ผลึกของเฟร์ริกคลอไรด์ที่เกาะที่ผนังห้องควบแน่นจะถูกนำออกมาอย่างต่อเนื่อง โดยการสั่นสะเทือนหรือการเคาะ ผลึกเฟร์ริกคลอไรด์ที่ได้จะถูกบดทันที ผ่านแร่งคัดขนาด และบรรจุในภาชนะที่ไม่มีความชื้นทันที ก๊าซคลอรีนที่เหลืออยู่ในก๊าซเสียถูกกำจัดโดยผ่านสารละลายเฟอรัสคลอไรด์หรือโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะให้ผลพลอยได้คือ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ และโซเดียมคลอไรด์

2. กระบวนการทำปฏิกิริยาในหม้อปฏิกิริยาที่ทนกรด (reactor with an acid-resistant liner) นำเศษเหล็กและก๊าซคลอรีนแห้งทำปฏิกิริยาในสารผสมที่หลอมเหลวของเฟร์ริกคลอไรด์ และโปแตสเซียมหรือโซเดียมคลอไรด์เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างเฟร์ริกคลอไรด์ และโปแตสเซียมคลอไรด์เท่ากับ 70 ต่อ 30 ขั้นตอนแรก นำเศษเหล็กละลายในสารผสมที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเศษเหล็กจะถูกออกซิไดซ์เป็นเฟร์รัสคลอไรด์โดยเฟร์ริกคลอไรด์ จากนั้นเฟร์รัสคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับก๊าซคลอรีนแห้งให้เฟร์ริกคลอไรด์ ซึ่งจะระเหิดขึ้นไปและส่งผ่านเข้าไปห้องควบแน่นเพื่อเก็บรวบรวมผลึกของเฟร์ริกคลอไรด์

ประโยชน์ของกระบวนการแรกเติมคลอรีนโดยตรงคือ ต้นทุนต่ำและมีของเสียน้อย ส่วนกระบวนการที่ 2 จะให้เฟร์ริกคลอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า เพราะสิ่งปนเปื้อนส่วนใหญ่ยังคงตกค้างอยู่ในสารผสมที่หลอมเหลวแต่ด้วยเหตุผลข้างต้น สารผสมหลอมเหลวซึ่งต้องมีการเปลี่ยนใหม่ และสารเก่าถูกนำไปกำจัดทิ้ง

สารละลายเฟร์ริกคลอไรด์เตรียมได้จากการละลายเหล็กในกรดเกลือให้เฟอรัสคลอไรด์และออกซิไดซ์เฟร์รัสคลอไรด์ด้วยก๊าซคลอรีน

ในกระบวนการผลิตเฟร์ริกคลอไรด์หกน้ำผลึกเป็นกระบวนปิดแบบหมุนเวียนต่อเนื่อง คือ สารละลายเฟร์ริกคลอไรด์ถูกรีดิวซ์ด้วยโลหะเหล็กให้เฟร์รัสคลอไรด์ และถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยก๊าซคลอรีนให้เฟร์ริกคลอไรด์ สารละลายเฟร์ริกคลอไรด์ที่ได้ถูกทำให้มีความเข้มข้นยิ่งยวดโดยการระเหย จากนั้นทำให้เย็นผลึกของเฟร์ริกคลอไรด์หกน้ำผลึกจะตกลงมา

ผลต่อสุขภาพ (Occupational Health)

เฟร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง และโดยเฉพาะต่อตา ฉะนั้นคนที่ทำงานสัมผัสสารเคมีชนิดนี้ ต้องสวมแว่นตาป้องกัน หรือสวมหน้ากากป้องกันใบหน้า และสวมถุงมือยาง ค่า Threshold limit value (TLV) ของเฟร์ริกคลอไรด์ คือ 1 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าเกลือของเหล็กที่ละลายน้ำ

การเก็บ (Storage) และการขนส่ง (Transportation)

เฟร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึกสามารถเก็บในภาชนะเหล็กกล้ามาตรฐาน (standard steel container) สามารถขนส่งโดยบรรจุในถังโลหะ (iron drum) หรือถังพลาสติก (plastic barrel) ชนิดที่อากาศเข้าไม่ได้ เฟร์ริกคลอไรด์ที่ชื้น และสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะ ฉะนั้นต้องบรรจุในถังโลหะที่เคลือบด้วยยาง หรือถังพลาสติกที่ทำจากวัสดุจำพวก โพลีเอทิลีน โพลีไวนิลคลอไรด์ และโพลีเททระฟูออโรเอทิลีน ถังพลาสติกที่เสริมเส้นใย หรือแก้ว หรือภาชนะหิน ภาชนะปอร์ชเลน หรือถังเคลือบด้วยสีเคลือบเงา วัสดุโลหะที่เหมาะสมในการทำภาชนะบรรจุ คือ โลหะไทเทเนียม แทนทาลัม และแฮสเทลลอย ซี (Hastelloy C)

เฟร์ริกคลอไรด์เมื่อเกิดการหกจากอุบัติเหตุ ต้องทำการเก็บรวบรวมและส่งไปกำจัดที่โรงงานกำจัดของเสีย ในกรณีที่ดินถูกปนเปื้อนด้วยเฟร์ริกคลอไรด์ต้องทำความสะอาดด้วยน้ำจำนวนมาก และทำให้เป็นกลางด้วยสารประเภทปูนไลม์

การใช้ประโยชน์ (Uses)

เฟร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึกใช้ในงานทางสาขาอินทรีย์เคมี เป็นสารคลอริเนตติง สำหรับสารประกอบประเภทอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon) และสารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic compound) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในการสังเคราะห์แบบฟีเดล คราฟท์ (Friedel Crafts syntheses) และปฏิกิริยาคอนเด็นเซชั่น (condensation reaction) บางครั้งถูกใช้เป็นสารออกซิไดซิ่ง (oxidizing agent)

สารละลายเฟร์ริกคลอไรด์ใช้ละลายโลหะ เช่น ทองแดง และสังกะสี โดยไม่มีปัญหาการเกิดก๊าซไฮโดรเจน จึงใช้ในการกัดแม่พิมพ์ หรือการทำความสะอาดผิวโลหะ สารละลายเฟร์ริกคลอไรด์ใช้ในการชะล้าง (leaching)

ทองแดงออกจากแร่ทองแดงคาลโคไพไรท์ (chalcopyrite)

เฟร์ริกคลอไรด์ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก รวมทั้งเฟร์ริกออกไซด์ที่ใช้เป็นผงสี

เฟร์ริกคลอไรด์ส่วนใหญ่นำมาใช้ในรูปของสารละลายเจือจางโดยใช้เป็นสารช่วยจับตะกอน (flocculating agent) และสารตกตะกอน (precipitating agent) ในระบบบำบัดน้ำ เช่น กระบวนการบำบัดน้ำผิวดินให้เป็นน้ำดื่ม น้ำที่ผ่าน กระบวนการใช้เฟร์ริกคลอไรด์ 5-40 กรัมเติมลงในน้ำดิบหนึ่งลูกบาศก์เมตรซึ่งค่าความ เป็นกรดด่าง ประมาณ 6-7 ตะกอนของเฟร์ริกไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ดูดซับของแข็งที่มีขนาดเล็ก และอนุภาคคอลลอยดอล เช่น ดินเหนียว (clay) และกรดฮิวมิค (humic acid) ถ้าต้องการลดปริมาณคาร์บอน (decarbonization) หรือตกตะกอนโลหะหนักในเวลาเดียวกันให้เติมปูนขาว (slake lime) เพื่อปรับความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วง 9-11 สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชน และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เฟร์ริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพที่ดีโดยเฉพาะในการตกตะกอนสารโลหะหนัก และซัลไฟด์ ในกรณีที่มีน้ำมันและสารโพลีเมอร์ที่ยากต่อการย่อยสลายก็จะถูกดูดซับบนตะกอนของเฟร์ริกไฮดรอกไซด์ และสารพวกฟอสเฟตถูกทำให้มีปริมาณอยู่ในระดับต่ำประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อน้ำหนึ่งลิตร ในกระบวนการทำน้ำให้ใส ในการบำบัดน้ำขั้นต้นด้วยการใส่เฟร์ริกคลอไรด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารทำให้น้ำใส (clearifier) ส่วนการปรับสภาพกาก (sludge) ด้วยเฟร์ริกคลอไรด์ และปูนไลม์ ทำให้ขั้นตอนการกรองกากสามารถกรองเอาน้ำออกได้มากขึ้น กากที่แห้งสามารถนำไปกำจัดหรือเผา

เกณฑ์กำหนดคุณภาพและการวิเคราะห์ (Quality Specifications and Analysis)

เกณฑ์กำหนดคุณภาพทางอุตสาหกรรมของเฟร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึกต้องมีเฟร์ริกคลอไรด์มากกว่าร้อยละ 99 หรือ เฟร์ริกคลอไรด์หกน้ำผลึกต้องมีเฟร์ริกคลอไรด์ประมาณร้อยละ 60 และสารละลายเฟร์ริกคลอไรด์มีเฟร์ริกคลอไรด์ประมาณร้อยละ 40 เฟร์ริกคลอไรด์ สำหรับบำบัดน้ำดื่ม (Potable water treatment) ต้องเป็นไปตาม DIN 19602-1987 หรือ American Water Works Association (AWWA) : ANSI/AWWA B407-98 "AWWA Standard for Liquid Ferric Chloride"

กรมวิทยาศาสตร์บริการได้ให้บริการวิเคราะห์ตัวอย่างเฟร์ริกคลอไรด์ทางเคมี และฟิสิกส์แก่ภาคเอกชนในช่วงปี พ.ศ.2538-2541 โดยวิเคราะห์ตาม "AnalaR" standard for Laboratory Chemicals ดังมีผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 1 ซึ่งเป็นตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเฟร์ริกคลอไรด์ กับมาตรฐานของ ANIS/AWWA B407-98 จากตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณเฟร์ริกคลอไรด์ เหล็กในรูปเฟร์รัส และความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างเฟร์ริกคลอไรด์ที่ส่งมาวิเคราะห์มีคุณภาพเป็นไปตามเกณฑ์กำหนดของ ANIS/AWWA B407-98 ส่วนปริมาณโลหะทองแดง สังกะสี โครเมียม แคดเมียม ปรอท และตะกั่วที่พบในตัวอย่างมีปริมาณน้อย

ตารางที่ 1 : ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเฟร์ริกคลอไร์ระหว่างปี พ.ศ. 2538 - 2541 เทียบกับมาตรฐาน ANSI/AWWA B407-98

รายการวิเคราะห์	ANSI/AWWA B407-98	ตัวอย่างเฟร์ริกคลอไรด์					
		1	2(40%)	3(40%)	4(40%)	5(46%)	6
เฟร์ริกคลอไรด์, ($FeCl_3$), ร้อยละ	28-47	35.7	42.5	43.0	40.5	46.6	42.1
ซัลเฟต (SO_4), ร้อยละ	-	0.06	0.02	0.005	0.004	0.004	-
เฟร์รัส (คำนวณเป็น Fe) ร้อยละ	<2.5	2.7	0.012	0.04	0.098	0.13	-
ทองแดง (Cu) ร้อยละ	-	-	0.29	0.0005	0.14	0.007	-
สังกะสี (Zn) ร้อยละ	-	0.57	0.02	0.01	0.03	0.08	-
โครเมียม (Cr) ร้อยละ	-	-	0.007	0.002	0.005	0.009	-
แคดเมียม (Cd) ร้อยละ	-	-	0.0001	0.0001	-	0.0001	-
ปรอท (Hg) มิลลิกรัม/กิโลกรัม	-	-	0.1	ไม่พบ	0.09	ไม่พบ	-
ตะกั่ว (Pb) ร้อยละ	-	-	ไม่พบ	0.001	0.0005	0.007	
กรดอิสระ (คำนวณเป็น HCl) ร้อยละ	<1.0	-	-	-	-	-	-
สารที่ไม่ละลาย ร้อยละ	<0.5	-	-	-	-	-	0.01
ความถ่วงจำเพาะที่ 20 °ซ.	1.3-1.5	1.47	1.46	1.464	1.44	1.524	1.466

หมายเหตุ : รายการกรดอิสระไม่มีการวิเคราะห์เนื่องจากผู้รับบริการไม่ระบุ

เอกสารอ้างอิง

American National Standards Institute. **Liquid Ferric Chloride.** ANSI/AWWA B407-98. 1998.

Barbara Elvers, et al. **U11 mann's Encyclopedia of Industrial Chemical.** 5th, ed., Weinheim Federal Republic of Germany : VCH Verlagesellschaft, 1989, vol. 14, p. 592-595.

D.J. Bucknell, **"AnalaR" Standard for Laboratory chemicals,** 8th. ed., London and Tonbridge : Whitefriass Press 1984, p. 310-313.

Ernest W. Flick, **Water Treatment Chemicals,** New Jersey : Noyes Publication, 1991, p. 54.

Martha Windholz. **The Merck Index.** 10th. ed., New Jersey : Merck, 1983, p. 3943.