

การปรับปรุงกระบวนการบำบัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำเสียโรงงานสกัดแร่แทนทาลัม

Improvement of Fluoride Removal for Wastewater Treatment Process of Tantalum Refinery

คำนำ

ในปัจจุบันนี้มีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่มีการใช้ฟลูออไรด์ในกระบวนการผลิต หรือใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) หรืออลูมิเนียมไบฟลูออไรด์ ($\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF}$) ในการทำความสะอาด หรือกัดผลิตภัณฑ์ในการผลิตแก้ว ซึ่งทำให้มีการปล่อยน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นจำนวนมาก น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจะมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในปริมาณที่แตกต่างตามปริมาณการใช้ฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนออกมากับน้ำเสียจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งนอกจากจะทำให้สมดุลของระบบนิเวศเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ยังอาจปนเปื้อนสู่พืช สัตว์ และเข้าสู่มนุษย์ได้ในที่สุด ซึ่งถ้าหากมนุษย์ได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่พอเหมาะแล้วจะก่อให้เกิดผลดี เช่น ช่วยป้องกันฟันผุ ป้องกันกระดูกเป็นต้น ในทางตรงกันข้ามหากได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสีย เช่น ทำให้เกิดโรคฟลูออโรซิส (fluorosis) รบกวนการทำงานของไตและต่อมไทรอยด์ รวมถึงอาจรบกวนระบบเมตาโบลิซึมของร่างกายทำให้น้ำหนักลดลงได้

โดยทั่วไปการบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม จะใช้วิธีการตกตะกอนด้วยปูนขาว หรือใช้วิธีการดูดซับด้วยสารดูดซับ ซึ่งหากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ค่อนข้างสูง จะนิยมใช้การตกตะกอนด้วยปูนขาวมากกว่าเนื่องจากสารดูดซับมีราคาที่แพงกว่า อย่างไรก็ตามการตกตะกอนด้วยปูนขาว จะมีข้อจำกัดเนื่องจากการตกตะกอนของแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ทำให้สามารถบำบัดฟลูออไรด์ได้ต่ำสุดเท่ากับค่าการละลายของตะกอน ดังนั้น นอกจากจะทำการบำบัดฟลูออไรด์ด้วยการตกตะกอนด้วยปูนขาวแล้ว จึงควรใช้วิธีอื่นร่วมด้วยในการบำบัดเพื่อให้ได้น้ำเสียที่มีค่าฟลูออไรด์ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

ในงานวิจัยนี้ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้น้ำปูนขาวในการบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน และนำน้ำเสียที่มีปริมาณฟลูออไรด์ต่ำ (low fluoride) มาใช้แทนน้ำประปาในการเตรียมน้ำปูนขาวเพื่อใช้ในการนำไปบำบัดฟลูออไรด์ และเพื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียฟลูออไรด์ที่ผ่านการบำบัดด้วยปูนขาวมาแล้ว

คำสำคัญ (Keywords) การบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment) การบำบัดฟลูออไรด์ (fluoride removal) การตกตะกอน (precipitation) แคลเซียมฟลูออไรด์ (calcium fluoride) สารส้ม (aluminum sulfate)

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและปริมาณน้ำปูนขาวในการบำบัดน้ำเสียฟลูออไรด์ใน
ขั้นต้น
2. ศึกษาหาปริมาณสารส้มที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟลูออไรด์หลังจากผ่านการบำบัด
ขั้นต้น
3. ปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดแร่แทนทาลัมเพื่อให้ได้ฟลูออไรด์
ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

ขอบเขตงานวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียจากโรงงานสกัดแร่แทนทาลัม ในนิคมอุตสาหกรรม
มาบตาพุด จังหวัดระยอง
2. น้ำที่นำมาเตรียมสารน้ำปูนขาว
 - น้ำประปา
 - น้ำเสียโรงงานสกัดแร่แทนทาลัมที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ไม่เกิน 5,000
มิลลิกรัม/ลิตร (น้ำเสีย Low fluoride)
3. สารเคมีที่นำมาใช้ในการศึกษา
 - ปูนขาว
 - สารส้ม
4. ศึกษาเน้นเฉพาะการลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำเสียของโรงงานสกัดแร่แทนทาลัม
เท่านั้น

การตรวจเอกสาร

ฟลูออไรด์

ฟลูออรีนเป็นธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงที่สุดในตารางธาตุ จึงทำให้ไอออนนี้ว่องไวมากกว่าไอออนอื่นๆ โดยคุณสมบัติทั้งเคมีและทางกายภาพมีความสำคัญต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ เป็นอย่างมาก แม้ว่าฟลูออไรด์ความเข้มข้นที่ต่ำ ๆ ก็ยังสามารถยับยั้งหรือกระตุ้นกระบวนการทางเอ็นไซม์ได้ และอาจทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ในร่างกาย ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับสรีระวิทยาของมนุษย์

การวิจัยเกี่ยวกับฟลูออไรด์ ได้เพิ่มมากขึ้นหลังจากที่มีการชี้ให้เห็นอิทธิพลต่างๆ ของฟลูออไรด์ในช่วงทศวรรษที่ 1930 ว่า แม้ว่าฟลูออไรด์ในปริมาณน้อยๆ ก็มีอิทธิพลต่อระบบฟันได้ โดยสามารถที่จะยับยั้งโรคฟันผุได้ แต่ถ้ามีฟลูออไรด์ในปริมาณที่สูงๆ นั้นจะไปรบกวนการสร้างเคลือบฟัน (enamel) ได้เช่นกัน ซึ่งทำให้ฟลูออไรด์ได้รับความสนใจอย่างมากในหลายๆ ด้าน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ฟลูออไรด์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตปุ๋ย การผลิตยา การผลิตสารเคมี การผลิตแก้ว เป็นต้น ฟลูออไรด์พบโดยทั่วไปทั้งในน้ำทะเล น้ำใต้ดิน ในดินแร่ต่างๆ รวมทั้งฝุ่นละอองต่างๆ ที่อยู่ใกล้แหล่งแร่

แหล่งของฟลูออไรด์

แหล่งของฟลูออไรด์ในธรรมชาติ

1. แร่ธาตุและดิน

ฟลูออไรด์แพร่กระจายอยู่ทั่วไปในเปลือกโลกซึ่งมีองค์ประกอบประมาณ 0.06 ถึง 0.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเปลือกโลกชั้นบน แร่ธาตุที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ฟลูออโรสฟาร์ (CaF_2) ไคโอไรต์ (Na_2AlF_6) และฟลูออราพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$) เป็นต้น แร่โคริโอไลต์ได้มาจากแร่ในประเทศกรีนแลนด์เป็นส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามแหล่งนี้ก็ได้ลดลงอย่างมากจากการทำเหมือง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์โคริโอไลต์ขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ในส่วน

อุตสาหกรรม ส่วนแร่ฟลูออราพาไทต์ ได้มีการขุดขึ้นมาใช้กันอย่างมากในสหรัฐอเมริกา และในประเทศอื่นๆ อีกหลายประเทศ

ดินอาจประกอบด้วยฟลูออไรด์ในรูปของแร่ต่างๆ หลายชนิดรวมทั้ง มัสโคไวต์อพาไทต์ และฟลูออไรด์ (ฟลูออรัสปาร์) การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน 30 ตัวอย่าง ที่เก็บจากจุดต่างๆ ในสหรัฐอเมริกาชี้ให้เห็นว่า ความเข้มข้นของฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้นตามความลึกของดิน โดยจะพบความเข้มข้นของฟลูออไรด์อยู่ในช่วง 20 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากตัวอย่างที่เก็บจากความลึก 0-12 นิ้ว มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์อยู่ระหว่าง 20 – 1,620 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งบางตัวอย่างดินจากในบางจุดอาจพบฟลูออไรด์ได้สูงถึง 8,300 มิลลิกรัมต่อลิตร (Adler, 1970)

2. แหล่งน้ำธรรมชาติ

คุณสมบัติทางเคมีของน้ำที่มีไอออนของฟลูออไรด์ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำธรรมชาติในแต่ละแหล่ง โดยที่น้ำที่มีไอออนของฟลูออไรด์และไฮดรอกไซด์ไอออนมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้น ในน้ำที่มีค่าพีเอชสูง ไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถแทนที่ในผลึกของแร่ฟลูออไรด์ ทำให้ฟลูออไรด์ในน้ำอยู่ในรูปฟลูออไรด์อิสระ (F^-) มากกว่าในรูปอื่น ส่วนที่พีเอชต่ำมักอยู่ในรูปกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และอาจอยู่ในรูปสารประกอบไอออนของเหล็ก เบอริลเลียม และอลูมิเนียมได้ รวมทั้งยังสามารถรวมตัวกับซิลิกาได้เป็น SiF_6^{2-} หรือ SiF_4 แต่มักไม่ค่อยพบในน้ำธรรมชาติในแต่ละแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณความเข้มข้นฟลูออไรด์สูงจะพบปริมาณแคลเซียมต่ำ (Hem, 1970)

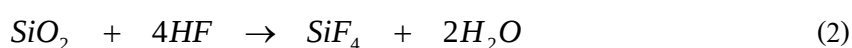
ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำธรรมชาติขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของฟลูออไรด์ในชั้นหินที่สัมผัสกับน้ำเป็นสำคัญ ทำให้ปริมาณฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำธรรมชาติแตกต่างกัน รวมทั้งขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ด้วย ปริมาณการระเหยของน้ำและปริมาณฝนตก โดยน้ำพุที่ไหลผ่านชั้นหินที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบอยู่มากทำให้บริเวณนั้นมีฟลูออไรด์มาก ส่วนในมหาสมุทรจะมีปริมาณฟลูออไรด์อยู่ประมาณ 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร (Larry D. *et al.*, 1982)

แหล่งของฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรม

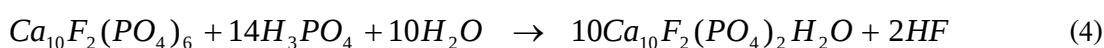
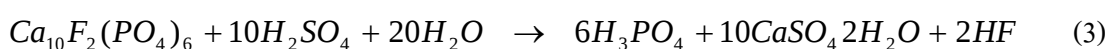
อุตสาหกรรมหลายชนิดได้มีการปล่อยฝุ่นละอองและก๊าซที่มีฟลูออไรด์ออกสู่บรรยากาศ ซึ่งรวมทั้งการบด การอบแห้งแร่ที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ การรีดิวซ์ทางด้านไฟฟ้าเคมีของโลหะ โดยใช้ฟลูออไรด์เป็นฟลักซ์ การเผาทำอิฐและเซรามิก การหลอมวัสดุฉนวนในการทำแก้ว และการใช้สารประกอบฟลูออไรด์ในการทำความสะดวก กัด และชุบเคลือบไฟฟ้าในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ การเผาถ่านหินจะทำให้เกิดการปลดปล่อยฟลูออไรด์ออกสู่บรรยากาศได้ด้วย โดยประเภทของอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยฟลูออไรด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งได้ดังนี้ (Liebman *et al.*, 1988)

1. การผลิตปุ๋ยฟอสเฟตและกระบวนการกรดฟอสฟอริก

หินฟอสเฟตส่วนใหม่ที่ถูกขุดขึ้นมาได้ จะถูกนำมาใช้ทำเป็นปุ๋ยฟอสเฟต กรดฟอสฟอริก และธาตุฟอสฟอรัส โดยธาตุฟอสฟอรัสจะถูกนำไปใช้ในการผลิตสารประกอบฟอสเฟตต่าง ๆ ต่อไป ในระหว่างการบดและทำหินฟอสเฟตให้แห้ง ซึ่งประกอบด้วยฟลูออราพาไทต์ที่มีฟลูออไรด์ 3-4 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้น โดยมีซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์เป็นก๊าซหลักที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศในขั้นตอนการผลิตหลายขั้นตอน ในการผลิตปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟตจะมีการใช้กรดซัลฟูริกในการทำปฏิกิริยากับหินฟอสเฟต ทำให้เกิดกรดไฮโดรฟลูออริกและซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์ ดังสมการ



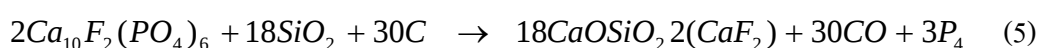
กรดไฮโดรฟลูออริกและซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์ สามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการอื่น ๆ เช่นกันดังสมการ



ซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้น สามารถกำจัดได้โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำได้กรดฟลูออโรซิลิซิก (H_2SiF_6) และไฮโดรเจนฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นกำจัดโดยการชะด้วยน้ำได้กรดไฮโดรฟลูออริก สำหรับการผลิตกรดฟอสฟอริกนั้นของเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นพวกยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โซเดียมและโพแทสเซียมฟลูออโรซิลิเคต กรดฟลูออริก และกรดฟลูออโรซิลิซิกซึ่งอาจสะสมในแหล่งน้ำได้

2. การผลิตฟอสฟอรัสและฟอสเฟตที่ใช้เติมในอาหารสัตว์

กระบวนการผลิตฟอสฟอรัส ทำได้โดยเผาถ่านหินฟอสเฟตรวมเข้ากับซิลิกาและถ่านโค้ก ดังปฏิกิริยา

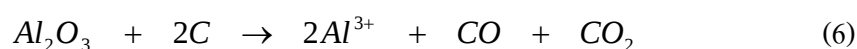


น้ำที่กลั่นตัวออกจากกระบวนการจะมี ไฮดรตซิลิกา ฟลูออโรซิลิเคต และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกมาด้วย โดยซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์และไฮโดรเจนฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดได้ด้วยน้ำซึ่งทำให้เกิดน้ำเสียที่เป็นของเหลวข้นเช่นกัน

3. การผลิตอลูมิเนียม

อลูมิเนียมจะผลิตได้โดยกระบวนการ Hall-Heroult ด้วยวิธีการละลายอลูมินา (Al_2O_3) ในแร่โครโอไลต์ที่หลอมเหลวแล้วนำไปรีดิวซ์ทางไฟฟ้าเคมี อลูมินาได้มาจากแร่บอกไซต์ซึ่งพบได้หลายแห่งทั่วโลก ส่วนแร่โครโอไลต์ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น เนื่องจากแร่โครโอไลต์มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นการหลอมอลูมินาร่วมกับแร่โครโอไลต์จะมีแคลเซียมฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย

เมื่อนำของผสมไปทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี อลูมิเนียมจะเกิดจากการรีดักชันที่ขั้วคาโทด ดังปฏิกิริยา



ก๊าซที่เกิดจากการทำอิเล็กโทรลิซิสจะประกอบด้วย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์ ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และไอน้ำ ส่วนฝุ่นที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย อลูมินา คาร์บอน ไครโอไลต์ อลูมิเนียมฟลูออไรด์ (AlF_3) แคลเซียมฟลูออไรด์ไฮโอไลต์ ($\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$) และไอร์รอนออกไซด์ (Fe_2O_3)

4. การผลิตเหล็กกล้า

ในการผลิตเหล็กกล้า จะใช้แร่ฟลูออร์สปาร์เป็นฟลักซ์ในเตาเผาเหล็กกล้าโดยจะเผาแร่เหล็กพร้อมกับแร่ฟลูออร์สปาร์ ปูนขาว ซิลิกา และถ่านโค้ก ทำให้เกิดฝุ่นและก๊าซที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์

5. การผลิตอิฐ กระเบื้อง เครื่องปั้นดินเผาและซีเมนต์

โดยทั่วไปแล้ว ดินที่ใช้ในการผลิตอิฐ กระเบื้อง เครื่องปั้นดินเผา และซีเมนต์นั้นจะประกอบด้วยฟลูออไรด์ 0.023-0.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นจะทำให้เกิดการขึ้นรูปดินตามต้องการ แล้วนำไปเผาในเตาที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส ซึ่งในระหว่างการเผาจะเกิดการปลดปล่อยก๊าซที่มีไฮโดรเจนฟลูออไรด์และซิลิกอนฟลูออไรด์ออกมาประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นฟลูออไรด์ในดิน

ในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะนำส่วนผสมของดินและหินปูนไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส โดยใช้ฟลูออไรด์ในดินจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวเกิดเป็นแคลเซียมฟลูออไรด์ขึ้น ส่วนในการผลิตซีเมนต์ขาว จะมีการเติมไครโอไลต์และฟลูออร์สปาร์เพิ่มลงไปด้วย ดังนั้นจึงทำให้มีฟลูออไรด์ปนเปื้อนอยู่ในฝุ่นและก๊าซ

6. การผลิตแก้ว ภาชนะเคลือบ และไฟเบอร์กลาส

แก้วซิลิเกตผลิตขึ้นได้โดยการหลอมวัตถุดิบที่ประกอบด้วยซิลิกา โลหะคาร์บอนเตตระออกไซด์รวมกัน โดยจะมีการเติมสารประกอบฟลูออไรด์ เช่น ฟลูออร์สปาร์ ไครโอไลต์ และโซเดียมฟลูออโรซิลิเกตลงไปเพื่อผลิตแก้วที่ใช้ในจุดประสงค์พิเศษ ก๊าซและฝุ่นละอองจากการผลิตจะมีฟลูออไรด์อยู่เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบ การผลิตจะมีการใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกหรือ

อลูมิเนียมไบฟลูออไรด์ ($\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$) ในการทำความสะอาดหรือกัดผลิตภัณฑ์ในการทำแก้วทำให้เกิดไอของฟลูออไรด์เกิดขึ้น

ในการผลิตผลิตภัณฑ์เคลือบ ซึ่งรู้จักในนามของเครื่องเคลือบปอร์เลนจะมีการใช้แคลเซียมฟลูออไรด์ อลูมิเนียมฟลูออไรด์ หรือโพแทสเซียมฟลูออโรซิลิเกต เติมลงไปด้วยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของฟลูออไรด์ที่เติมลงไปในวัตถุดิบอาจสูญเสียไปในรูปก๊าซออกสู่บรรยากาศได้

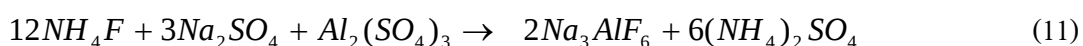
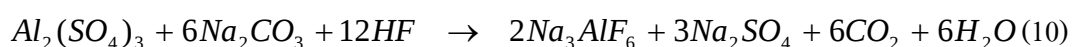
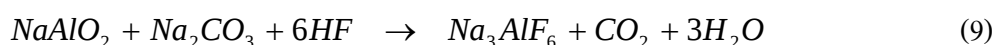
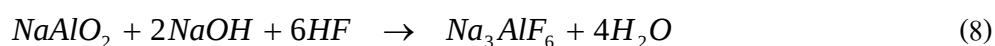
7. การผลิตฟลูออไรด์

การผลิตไฮโดรเจนฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรมทำได้โดยเผาแร่ฟลูออไรต์กับกรดซัลฟูริก โดยไฮโดรเจนฟลูออไรด์จะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 100-250 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำมากонденส์ให้เป็นบริสุทธิ์ และเก็บในถังเหล็กกล้า สมการการสลายตัวของแร่ฟลูออไรต์สปาร์มีดังนี้



ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ที่ได้ จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก โดยมีการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของกรดไฮโดรฟลูออริกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะต้องเก็บรักษาและขนส่งด้วยความระมัดระวัง

ธาตุของฟลูออรีน สามารถผลิตได้จากการทำอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายฟลูออโรคาร์บอน เช่น ฟริออน เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำไปผลิตแร่โครโอไลต์สังเคราะห์ด้วย ดังสมการ



8. การหล่อโลหะ การเชื่อม และการบัดกรี

ฟลูออไรด์จะใช้เป็นฟลักซ์ และใช้เคลือบแบบหล่อทรายในกระบวนการหล่อโลหะ สารประกอบฟลูออไรด์ที่ใช้คือ แอมโมเนียมฟลูออโรโบเรต (NH_4BF_4) โพแทสเซียมฟลูออโรโบเรต และแอมโมเนียมฟลูออโรซิลิเกต

ในการเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็กด้วยไฟฟ้า จะใช้อิเล็กโทรดที่เคลือบด้วย แคลเซียมฟลูออไรด์ หรือฟลูออไรด์อนินทรีย์อื่น ๆ เพื่อใช้เป็นฟลักซ์ที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีการปลดปล่อยฟลูออไรด์ออกสู่บรรยากาศ และปนเปื้อนลงในน้ำเมื่อล้างชิ้นงานกลายเป็นน้ำเสียฟลูออไรด์สู่สิ่งแวดล้อม

ฟลักซ์ที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบยังมีการนำมาใช้ในการบัดกรีอีกด้วย ทำให้เกิดของเสียที่มีฟลูออไรด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกัน

9. ฟลูออไรด์ในยาฆ่าแมลง

ได้มีการใช้โซเดียมฟลูออไรด์เป็นยากำจัดแมลงศัตรูพืช เพื่อควบคุมปริมาณของแมลงต่างๆ ในทางการเกษตร ปกติแล้วโซเดียมฟลูออไรด์จะมีสีขาว แต่เนื่องจากอาจเกิดการปะปนกับ แป้ง ผงฟู หรือสิ่งอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันได้ ดังนั้นกฎหมายของประเทศสหรัฐอเมริกาจึงกำหนดให้เติมน้ำเงินหรือสีเขียวลงไปเพื่อป้องกันการเข้าใจผิด

ฟลูออไรด์อนินทรีย์อื่นๆ ก็ใช้ฆ่าแมลงได้ด้วย เช่น โซเดียมฟลูออโรซิลิเกต แบเรียมฟลูออโรซิลิเกต ไครโอไลต์ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของฟลูออไรด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม และเป็นการปนเปื้อนฟลูออไรด์ลงในพืชผักผลไม้ที่ใช้ฆ่าแมลง นอกจากนี้ยังได้มีการนำสารประกอบอินทรีย์ที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบ มาใช้เป็นยาฆ่าแมลงเช่นกัน เช่น กรดฟลูออโรอะซิติก ฟลูออโรอะซิติกฟีนิลยูเรีย เป็นต้น โดยทั้งยาฆ่าแมลงที่เป็นสารประกอบฟลูออไรด์อินทรีย์และอนินทรีย์ จะทำให้เกิดการปนเปื้อนของลงในอาหาร ดิน และน้ำที่ชะจากดิน เป็นเหตุให้เกิดการแพร่กระจายของฟลูออไรด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม

10. การใช้ฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

มีการใช้กรดไฮโดรฟลูออริก แอมโมเนียมโบรไมด์ และเกลือของฟลูออไรด์อื่นๆ ในการกัดผิวในอุตสาหกรรมผลิตแก้วควอตซ์สำหรับอุปกรณ์สื่อสาร นอกจากนี้ของผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกกับกรดอื่นๆ จะใช้ในการขจัดความสกปรกต่าง ๆ ออกจากผิวของโลหะ

ในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะมีการใช้ฟลูออไรด์ในน้ำยาชุบ เช่น กรดไฮโดรฟลูออริก โซเดียมฟลูออไรด์ โพแทสเซียมฟลูออไรด์ กรดฟลูออซัลฟิวริก เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้สารประกอบฟลูออไรด์ในอีกหลายๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ อุตสาหกรรมสี เป็นต้น

ผลกระทบของฟลูออไรด์

ผลกระทบต่อมนุษย์

ฟลูออไรด์ในปริมาณน้อยๆ จะมีความจำเป็นต่อระบบกระดูก โดยจะไปเพิ่มขนาดของผลึกอพาไทต์ และลดค่าการละลายของผลึก ซึ่งมีผลให้กระดูกแข็งแรงและป้องกันโรคฟันผุได้ ฟลูออไรด์ในปริมาณน้อยๆ ยังสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานให้แก่เคลือบฟัน (enamel) เพื่อป้องกันโรคฟันผุได้ ฟลูออไรด์ยังจำเป็นต่อระบบเมตาโบลิซึมในร่างกาย โดยสารประกอบฟลูออไรด์ที่จำเป็น คือ CaF^+ MgF^+ เป็นต้น ในทางยารักษาโรคฟลูออไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของคอร์ติโคสเตอรอยด์ (corticosteroid) บางชนิด และใช้เป็นส่วนผสมของยาที่ใช้ในการบำบัดรักษาอาการมีเนรวิน โรค และมะเร็ง

ในทางตรงกันข้าม หากร่างกายมนุษย์ได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากเกินไป จะก่อให้เกิดโทษได้เช่นกัน โดยฟลูออไรด์ในปริมาณที่มีมากเป็น 2 เท่าของปริมาณที่ใช้ป้องกันฟันผุ (2 มิลลิกรัม/วัน) จะสามารถรบกวนสร้างแคลเซียมของเคลือบฟันได้ และถ้าได้รับปริมาณมากถึง 20 เท่าของปริมาณที่ใช้ในการป้องกันฟันผุ จะทำให้ระบบกระดูกของร่างกายเกิดการชำรุดเสียหายได้ (fluoride) นอกจากนี้ ปริมาณฟลูออไรด์ที่มีมากเกินไปยังจะไปรบกวนการทำงานของไตและต่อมไทรอยด์ได้และอาจทำให้น้ำหนักตัวลดลง และโครงสร้างของร่างกายผิดปกติได้ด้วย (Adler, 1970)

ผลกระทบต่อสัตว์

หากสัตว์ได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณมากเกินไปก็อาจเกิดโทษได้เช่นเดียวกับมนุษย์โดยฟลูออไรด์จะมีผลต่อการพัฒนาระบบฟันน้ำนม และอาจทำให้ฟันแท้ผิดปกติไปได้ นอกจากนี้ยังไปลดน้ำหนักตัวหรือลดการผลิตน้ำนมของสัตว์ ทำให้เกิดผลเสียต่อการปศุสัตว์ได้ด้วย มีรายงานการวิจัยพบว่า หากสัตว์ได้รับฟลูออไรด์ความเข้มข้นที่มากเกินไปเกิน 40 มิลลิกรัม/ลิตร ในระยะเวลานานจะส่งผลกระทบต่อการผลิตน้ำนม การเจริญเติบโต รวมทั้งทำให้เกิดโรคฟลูออโรซิสได้

ผลกระทบต่อพืช

ปริมาณฟลูออไรด์ที่มากเกินไปจะทำให้เกิดรอยด่างที่ใบของพืชได้ อีกทั้งยังรบกวนการเจริญเติบโตและเกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบเมตาโบลิซึมในพืชได้ โดยฟลูออไรด์จะปนเปื้อนสู่ผักได้ทั้งทางอากาศ ดิน และน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่สามารถทนต่อปริมาณฟลูออไรด์ได้มากน้อยเพียงใด

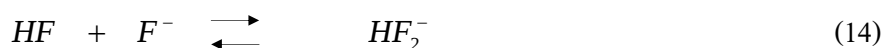
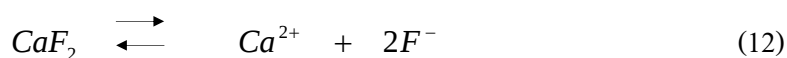
เคมีของฟลูออไรด์ในน้ำ

ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำฝนอาจมีค่าแตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปนในบรรยากาศ ส่วนความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ ประการหลักประการหนึ่งคือ ปริมาณและการละลายของแร่ฟลูออไรด์ลงในน้ำที่สัมผัส ซึ่งแร่ที่มีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่แล้วสามารถละลายน้ำได้ นอกจากการละลายและปริมาณของแร่ฟลูออไรด์แล้ว ปัจจัยอื่นๆก็มีความสำคัญในการหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่พบในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ซึ่งได้แก่ความพรุนของดินหรือหินที่น้ำไหลผ่านและความเร็วที่น้ำไหลผ่าน อุณหภูมิและปฏิกิริยาระหว่างหินกับน้ำ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในน้ำ ความเข้มข้นของฟลูออไรด์มักจะมีค่าสูงในน้ำที่เป็นด่างและในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง เช่น แหล่งน้ำใกล้ภูเขาไฟ เป็นต้น ในแหล่งน้ำหลายแห่งอาจมีแคลเซียมไอออนในปริมาณที่เกินพอ ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ มักจะเกิดแคลเซียมฟลูออไรด์ขึ้น โดยสามารถละลายน้ำได้ประมาณ 15 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิปกติ (Hem, 1970)

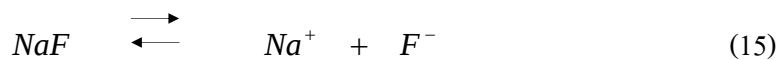
เมื่อสารประกอบฟลูออไรด์ละลายน้ำ ธาตุฟลูออรีนจะปรากฏอยู่ในรูปฟลูออไรด์ไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนและค่าพีเอชของสารละลาย ซึ่งฟลูออไรด์อาจอยู่ในรูป HF_2^- หรือ HF ได้ด้วย ในสารละลายที่เจือจางมากๆ และมีค่าพีเอชที่เป็นกลางฟลูออไรด์ทั้งหมดในน้ำจะอยู่ในรูปฟลูออไรด์ไอออน และเมื่อค่าพีเอชลดลง ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ไอออนจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของ HF จะเพิ่มขึ้น

ฟลูออไรด์ธรรมชาติและฟลูออไรด์สังเคราะห์อาจแสดงความแตกต่างกันได้ โดยถ้าพิจารณาแคลเซียมฟลูออไรด์ว่าเป็นฟลูออไรด์ธรรมชาติ และโซเดียมฟลูออไรด์ว่าเป็นฟลูออไรด์สังเคราะห์ โดยเมื่อละลายสารประกอบเหล่านี้ในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออน โดยฟลูออไรด์ในรูป F^- , HF และ HF_2^- มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเหมือนกันซึ่งแสดงดังสมการที่ 12 ถึง 17 (Adler, 1970)

- แคลเซียมฟลูออไรด์



- โซเดียมฟลูออไรด์



การตรวจวิเคราะห์หาฟลูออไรด์

วิธีการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟลูออไรด์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับการเก็บรวบรวม การแยก และควรจะเป็นวิธีที่ง่าย ถูกต้อง และแม่นยำ วิธีการไตเตรทและวิธีวัดเทียบสี เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นฟลูออไรด์โดยทั่ว ๆ ไปที่ใช้กันมานาน ในปัจจุบันได้มีการนำอิเล็กโทรดสำหรับวัดฟลูออไรด์ (fluoride ion selective electrode) เข้ามาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็วในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟลูออไรด์สามารถแบ่งวิธีวิเคราะห์ออกได้ดังนี้ (National Research Council Committee on Biological Effects of Atmosphere of Pollutants, 1971)

วิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric Methods)

วิธีนี้จะใช้ได้ผลดีกับการวิเคราะห์ฟลูออไรด์ในหินฟอสเฟต และแร่อื่นๆ ที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์อยู่สูงๆ เท่านั้น เนื่องจากไม่มีความว่องไวเพียงพอในการตรวจวัดแบบทั่วไป วิธีนี้จะใช้หลักการตกตะกอนโดยจะตกตะกอนเป็น แคลเซียมฟลูออไรด์ หรือ เลดคลอโรฟลูออไรด์ (PbClF) วิธีนี้อาจใช้ร่วมกับการหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์วิธีอื่นๆ ได้ เช่น ใช้ร่วมการไตเตรทหาความเข้มข้นของคลอไรด์ในเลดคลอโรฟลูออไรด์ เป็นต้น

วิธีเอนไซม์ (Enzymatic Methods)

วิธีนี้ใช้หลักการยับยั้งเอนไซม์โดยฟลูออไรด์ ซึ่งเป็นวิธีการหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ได้โดยทางอ้อมในการประมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในตัวอย่าง มีงานวิจัยหลายงานได้แสดงให้เห็นว่า วิธีนี้สามารถวัดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ได้ต่ำมาก เช่น ในปี 1959 Linde ได้ทำการศึกษาโดยใช้ฟลูออไรด์ในการยับยั้งเอนไซม์ ลิเวอร์ เอสเทอร์เรส (liver esterase) และสามารถวัดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในระดับไมโครกรัม ในปี 1966 McGaughey และ Stowell ได้ปรับปรุงวิธีของ Linde และหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ได้ในช่วง 5-30 มิลลิกรัม ในตัวอย่าง 2 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

วิธีการไตเตรท (Titrimetric Methods)

วิธีนี้เป็นการไตเตรทสารละลายฟลูออไรด์ด้วยสารละลายมาตรฐานที่ประกอบด้วยไอออนที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับฟลูออไรด์ได้ซึ่งนิยมใช้ทอเรียม และใช้อินดิเคเตอร์ เป็นอะลิซารินเรด (alizarin red) โดยฟลูออไรด์จะเกิดสีกับทอเรียมไอออน นอกจากนี้ยังมีการใช้ อินดิเคเตอร์ชนิดอื่นๆ ในไตเตรตสารละลายฟลูออไรด์ด้วยสารละลายทอเรียม อีกมากมาย

วิธีอื่นนอกจากวิธีดังกล่าวข้างต้นเช่น การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวก (cation exchange resin) ในการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดไฮโดรเจนฟลูออไรด์หรือกรดฟลูออโรโบริกแล้วนำไปไตเตรทด้วยเบส อีกวิธีหนึ่งคือ การวัดค่าความขุ่นจากการไตเตรทด้วย แคลเซียมคลอไรด์ หรือทอเรียมไนเตรท โดยจะหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ได้ในระดับมิลลิกรัม

วิธีวัดเทียบสี (Colorimetric Methods)

ปฏิกิริยาการเกิดสีกับฟลูออไรด์ไอออนเป็นที่รู้จักมานานแล้ว แต่มีการนำไปใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น ใช้วิธีกำจัดสีของ ทอเรียม-อะลิซาริน ซัลโฟเนต (thorium-alizarin sulfonate) หรือ เซอร์โคเนียม-อะลิซาริน ซัลโฟเนต (zirconium-alizarin sulfonate) เป็นต้น ซึ่งมีไอออนรบกวนคือ ฟอสเฟต และซัลเฟต ต่อมาได้มีการใช้ อะลิซาริน คอมเพล็กซ์โซน ในการเกิดสารประกอบที่มีสีกับ ซีเรียม (III) โดยจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อมีฟลูออไรด์ไอออน ซึ่งวิธีนี้จะมีความเสถียรมากกว่าวิธี โลหะ-อะลิซาริน ซัลโฟเนต โดยมีไอออนรบกวน คือ ฟอสเฟต และซัลเฟต เช่นกัน สารประกอบเชิงซ้อนที่นิยมใช้วิธีนี้มี 2 ชนิด คือ ซีเรียม (III) อะลิซาริน คอมเพล็กซ์โซน (selenium alizarin complexone) และแลนทานัม (III) อะลิซาริน คอมเพล็กซ์โซน (lanthanum alizarin complexone) โดยชนิดหลังแม้จะมีความว่องไวในการตรวจวัดน้อยกว่า แต่มีการรบกวนโดยไอออนอื่น ๆ ได้น้อยกว่าเช่นกัน

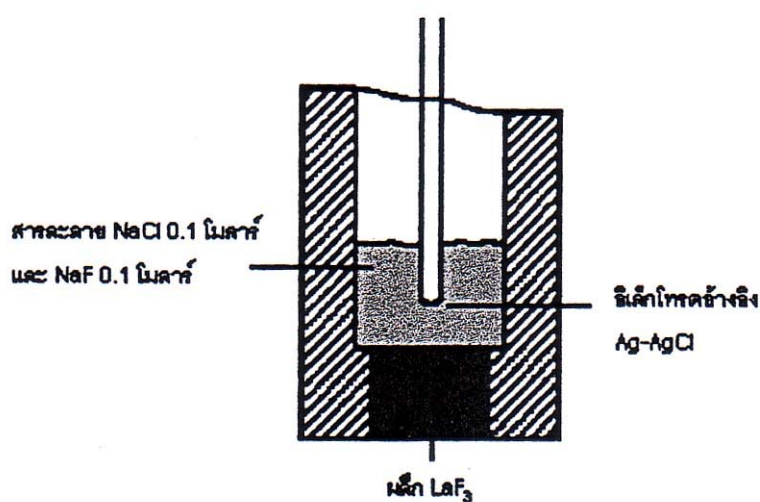
อินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไตเตรทด้วยทอเรียม จะนำมาใช้ในปฏิกิริยาการเกิดสี เพื่อหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ เช่น ทอเรียม-โครม อะซูลอล เซอร์โคเนียม-อิริโอโครม ไชยานีนอาร์ท เป็นต้น นอกจากนี้ยังเติม Sodium 2-(parasulfophenylazo)-1,8-dihydroxy-3,6-naphthalene disulfonate (SPADNS) ลงในระบบเซอร์โคเนียมสี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาฟลูออไรด์ในน้ำอีกด้วย

สีของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จะวัดหาปริมาณโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม ซึ่งจะวัดความเข้มสีเป็นค่าการดูดกลืนคลื่นแสง แล้วนำมาหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานต่อไป

วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Methods)

วิธีการทางไฟฟ้าเคมีที่นิยมมากที่สุดและประสบความสำเร็จที่สุด คือ การใช้อิเล็กโทรดสำหรับวัดฟลูออไรด์ ซึ่งมีหลักการคล้ายคลึงกับกลาสอิเล็กโทรดที่ใช้วัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในการหาความเข้มข้น

อิเล็กโทรดสำหรับฟลูออไรด์ จะประกอบด้วยเมมเบรนที่มีผลึกของแลนทานัมฟลูออไรด์ (LaF_3) ที่มียูโรเปียม (II) ปนอยู่ด้วยเล็กน้อยเพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า อิเล็กโทรดนี้มีความไวต่อฟลูออไรด์ไอออนมากกว่า คลอไรด์ โบรไมด์ ไอโอดีน ไนเตรต และซัลเฟต ถึง 1,000 เท่า และไวกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน อย่างน้อย 10 เท่า ซึ่งมีส่วนประกอบดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบของอิเล็กโทรดสำหรับวัดฟลูออไรด์

ที่มา : Kenner *et al.*, (1979)

การวัดความเข้มข้นของฟลูออไรด์โดยอิเล็กโทรดสำหรับฟลูออไรด์นี้ ทำได้โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลาย แล้วนำมาหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

นอกจากนี้อาจประยุกต์ใช้เล็กโทรดสำหรับวัดฟลูออไรด์ร่วมกับการไตเตรทหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์โดยทอริยมแลนทานัม หรือแคลเซียมได้ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอิมเมตริกแล้ว วิธีนี้จะให้ผลเป็นที่น่าพอใจเช่นเดียวกัน แต่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ง่ายและสะดวกมากกว่า อีกทั้งยังสามารถวัดหาความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในอากาศได้ด้วย ด้วยเหตุนี้ทำให้วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้เพิ่มขึ้นอย่างมาก

กระบวนการบำบัดฟลูออไรด์

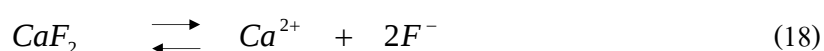
ฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อทั้งคน สัตว์ และพืชได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดฟลูออไรด์ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมไม่มากเกินไป น้ำที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์และจำเป็นต้องได้รับการบำบัด สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำธรรมชาติ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตปุ๋ยฟอสเฟต กระจก สารเคมี จะมีฟลูออไรด์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง วิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียประเภท คือ วิธีการตะกอนด้วยสารเคมี เช่น การตกตะกอนด้วยปูนขาว สารส้ม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Sollo *et al.*, 1978) เป็นต้น วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีนี้สามารถลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้จนถึงค่าหนึ่งซึ่งเท่ากับค่าการละลายของตะกอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของน้ำธรรมชาติ ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่จะมีอยู่ในปริมาณต่ำ การบำบัดน้ำประเภทนี้จะนิยมใช้หลักการของการดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของฟลูออไรด์ให้ต่ำมากๆ ได้

การตกตะกอน (Precipitation)

วิธีการตกตะกอนเป็นวิธีการเติมสารเคมีที่สามารถรวมตัวเข้ากับฟลูออไรด์ไอออนได้แล้ว จึงเกิดเป็นตะกอนของฟลูออไรด์ จากนั้นจึงใช้กระบวนการตกตะกอนหรือกระบวนการกรองเพื่อแยกตะกอนออกไป สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในวิธีนี้ได้แก่ ปูนขาว (Ca(OH)_2) , สารประกอบแมกนีเซียม เช่น โดโลไมท์ และอลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม)

1. ปูนขาว (Lime)

การเติมปูนขาวเป็นวิธีที่ใช้ลดความเข้มข้นของกับฟลูออไรด์ไอออน โดยปูนขาวที่เติมลงไปจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับฟลูออไรด์ไอออน แล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ซึ่งแคลเซียมฟลูออไรด์มีค่าการละลายซึ่งประมาณจากฟลูออไรด์ไอออน 8 มิลลิกรัมต่อลิตร สมมูลกับแคลเซียมไอออน 34 มิลลิกรัม/ลิตร สมการแสดงการสมดุลของแคลเซียมฟลูออไรด์แสดงดังนี้



ซึ่งค่าคงที่สมดุลของสมการ (K_{sp}) ของแคลเซียมฟลูออไรด์สูงสุด ที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 4×10^{-11} เพราะฉะนั้นความเข้มข้นของแคลเซียมฟลูออไรด์ที่มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของฟลูออไรด์ไอออน 8 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าขีดจำกัดของความสามารถในการละลายนี้ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นมา (Benefield, 1982)

สุรศักดิ์ (2541) ได้ทำการศึกษากำจัดฟลูออไรด์จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและจากน้ำธรรมชาติ (น้ำใต้ดิน) ความเข้มข้น 105 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งใช้ปูนขาวเป็นสารตกตะกอนโดยทำการทดลอง 2 วิธี พบว่า วิธีที่ 1 คือการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าพีเอชก่อนบำบัด ซึ่งมีสถานะที่เหมาะสมคือ ค่าพีเอชก่อนเติมปูนขาวเท่ากับ 5.0 และความเข้มข้นของปูนขาว เท่ากับ 1,125 มิลลิกรัม/ลิตร และวิธีที่ 2 คือไม่ปรับพีเอชก่อนบำบัด ซึ่งมีความเข้มข้นของปูนขาวที่เหมาะสมเท่ากับ 1,375 มิลลิกรัม/ลิตร

Roher (1971) ได้ทำการศึกษาวิธการกำจัดฟลูออไรด์โดยการเติมปูนขาวผลึกน้ำ (hydrated lime) 4 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดจะมีพีเอชสูงกว่า 12 และสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์จาก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาในการบำบัด 19 ชั่วโมง

Abou-Elala *et al.* (1995) ได้ทำการศึกษากำจัดฟลูออไรด์จากอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์อยู่ในช่วง 80–3,500 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้การตก

ตะกอน ด้วยปูนขาว พบว่าการบำบัดฟลูออไรด์ด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 90 ซึ่งทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณปูนขาวที่ใช้

2. แมกนีเซียม (Magnesium)

ฟลูออไรด์ไอออนในน้ำที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์สูงเกินไปนั้นอาจสามารถกำจัดออกไปได้ โดยอาศัยกระบวนการแก้เนื้อกระด้าง (softening) ซึ่งใช้ปูนขาวและโซดาแอช ปริมาณฟลูออไรด์ไอออนที่ถูกกำจัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความกระด้างของน้ำที่เกิดจากแมกนีเซียมที่ถูกกำจัด โดยฟล็อก (floc) ของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถดูดซับฟลูออไรด์ไอออนไว้ได้

Culp and Stoltenburg (1985) ได้ทำการศึกษากระบวนการในการแก้เนื้อกระด้างโดยใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า การแก้เนื้อกระด้างด้วยวิธีนี้มีผลกระทบต่อปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่อยู่ในน้ำ โดยสามารถลดปริมาณฟลูออไรด์จาก 3-4 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 0.8 -1.12 มิลลิกรัม/ลิตร

3. สารส้ม (Aluminum Sulfate)

การกำจัดฟลูออไรด์โดยการเติมสารส้มลงไปเป็นกระบวนการตกตะกอนผลึกร่วม (coprecipitation) กระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์ เมื่อมีการเติมสารส้มลงไปในพื้นที่ที่มีฟลูออไรด์ จะเกิดอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide) ซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากในสารละลายมีปริมาณ Al^{3+} จึงถูกดูดซับที่ผิวของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ตามกฎของ Paneth-Fajan-Hahn เกิดเป็นชั้นที่เรียกว่า “stern layer” (fixed layer) หลังจากนั้นชั้นเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และฟลูออไรด์ไอออน (F^-) ที่ละลายอยู่และมีประจุตรงข้ามกับ Al^{3+} จะถูกดึงเข้ามาในชั้นที่เรียกว่า “gauy layer” (diffused) ของกลุ่มก้อนนี้จากนั้นก็กำจัดกลุ่มก้อนนี้ด้วยการตกตะกอนต่อไป

Robosky and Miller (1974) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์โดยใช้ปูนขาวและสารส้มช่วยในการตกตะกอนพบว่า ในขั้นแรกใช้ปูนขาวในการตกตะกอนฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 11.9 สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์เหลือ 5-5.2 มิลลิกรัม/ลิตร

และในขั้นตอนที่สองใช้สารส้มในการรวมตะกอนขนาดเล็กให้เป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่พีเอช 7 สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์เหลือเพียง 1.7 มิลลิกรัม/ลิตร

รีเวอร์สออสโมซิส (Revers Omosis : RO)

เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสอะซิเตท และโพลีเอมีน วิธีนี้ต้องใช้ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ต้องใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องปรับพีเอชเพื่อแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกไป และต้องมีการกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน

Lykins *et al.* (1995) ได้ศึกษาวิธีการบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำใช้สาธารณะโดยใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งวิธีนี้สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่มากกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร ให้เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ได้และยังสามารถกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ในน้ำได้อีกด้วย

การแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับไอออน (Ion exchange and Adsorption)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายและไอออนที่อยู่ของแข็ง ซึ่งไอออนในสารละลายจะถูกดูดซับด้วยสารแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (zeolite) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบที่มีความสามารถแลกเปลี่ยน Na^+ ที่อยู่ในตัวกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำหลายชนิดได้ ซีโอไลต์มี 2 ชนิด คือ แบบธรรมชาติ และ แบบสังเคราะห์ ซึ่งซีโอไลต์แบบธรรมชาติ ได้แก่ green sand หรือ glauconite เป็นต้น ส่วนซีโอไลต์แบบสังเคราะห์จะมาจากสารประกอบหลายชนิดผสมกัน เช่น โซเดียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ โซเดียมอะลูมินเนต เป็นต้น

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนพัฒนามาจากสารอินทรีย์โพลีเมอร์ซึ่งมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าซีโอไลต์ โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ โครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

และหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า (functional group) ซึ่งเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น (มันลิน, 2538)

ดยาคี (2547) ทำการศึกษาวีธีลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้เปลือกไข่เป็ดและไข่ไก่ เปลือกหอยลาย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณฟลูออไรด์ คือ เวลาในการสัมผัสประมาณ 4 ชั่วโมง พีเอชอยู่ในช่วง 6-10 และเปลือกไข่ไก่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงสุด คือ 95.87% รองลงมาเป็นเปลือกไข่เป็ดและเปลือกหอยลาย

นอกจากซีโอไลต์และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนยังมีการใช้ลูมินัมกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ ในรัฐ Texas เมือง Bartlett มีการใช้ลูมินัมกัมมันต์ในโรงผลิตน้ำประปาซึ่งมีการใช้อยู่ในชั้นสัมผัสขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์ฟุต สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์จาก 8 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 1 มิลลิกรัม/ ลิตร และมีการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical)

หลักการของระบบ คือ ปล่อยน้ำไหลด้วยอัตราการไหลที่ต่อเนื่องผ่านขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำการจับฟลูออไรด์ไอออนไว้ โดยที่ขั้วไฟฟ้าที่ใช้จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายและไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชหรือเติมสารเคมีใดๆ ในกระบวนการนี้ จึงทำให้มีการพัฒนากระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อการใช้ในการจำหน่ายเชิงพาณิชย์มากขึ้น

Feng Shen *et al.* (2003) ทำการศึกษการบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการรวมกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันและกระบวนการอิเล็กโทรโฟเทซัน พบว่า สามารถบำบัดฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัม/ ลิตร เหลือ 2 มิลลิกรัม/ ลิตร ที่พีเอชประมาณ 6 ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันให้ได้ผลดี จะต้องควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม ปัจจัยที่ต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารสร้างตะกอน ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาในการกวนน้ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเร็วเกรเดียนท์และความเร็วในการกวนน้ำ มักกำหนดไว้ก่อนแล้วในการออกแบบและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ การควบคุมโคแอกกูเลชัน จึงมุ่งหมายในการควบคุมปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมและระดับพีเอชของน้ำ เพื่อให้เกิดการโคแอกกูเลชันได้ดีที่สุด การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดโคแอกกูเลชันสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ โดยวิธีจาร์เทสต์ (jar test) และโดยวิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (zeta potential)

วิธีการควบคุมโคแอกกูเลชันที่ได้รับความนิยมที่สุดและใช้กันมานานแล้ว คือวิธีจาร์เทสต์ (jar test) ส่วนวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (zeta potential) จะไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากอุปกรณ์ที่มีราคาแพงและการวัดต้องอาศัยความชำนาญอย่างมาก (มันสิน, 2538)

นอกจากสองวิธีข้างต้นแล้ว ยังมีวิธีการปรับปรุงให้การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (zeta potential) ให้มีความถูกต้องมากขึ้นในการนำไปใช้งาน โดยใช้เครื่อง streaming current detector (SCD) ซึ่งสามารถใช้กับน้ำได้หลายประเภท (Kawamura, 1991)

การสร้างสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้เกิดฟล็อกกูเลชัน

การทำให้อนุภาคคอลลอยด์มาสัมผัสกันและเกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ตกตะกอนได้เร็ว ต้องอาศัยการกวนช้า ซึ่งปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดกลไกได้แก่ (อุบลวรรณ, 2536)

1. Perikinetic flocculation เป็นการรวมตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน ซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว และชนอนุภาคความขุ่นที่กระจายอยู่ในน้ำนั้น ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่เกิดการสัมผัสจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำและจำนวนอนุภาคความขุ่นในน้ำ โดยจะมีบทบาทเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และจะมีบทบาทน้อยลงเมื่ออนุภาคใหญ่กว่า 1 ไมครอน

2. Orthokinetic flocculation เป็นการรวมตะกอนที่จะเกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในภาวะของการกวน โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งและเวลา ดังนั้นอนุภาคความขุ่นที่เคลื่อนที่ไปตามน้ำจะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย จึงทำให้เกิดการชนและรวมตัวกันในที่สุด กลไกแบบนี้จะมีบทบาทมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า กลไกหลักของการกวนช้าจะต้องมีการสร้างสภาวะการเคลื่อนที่ของน้ำให้มีความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ใบพัดแบบต่างๆ

องค์ประกอบที่มีผลต่อการรวมตัวกันตกตะกอน

การที่อนุภาคจะรวมตัวกันและตกตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้ (โกมลและคณะ, 2527)

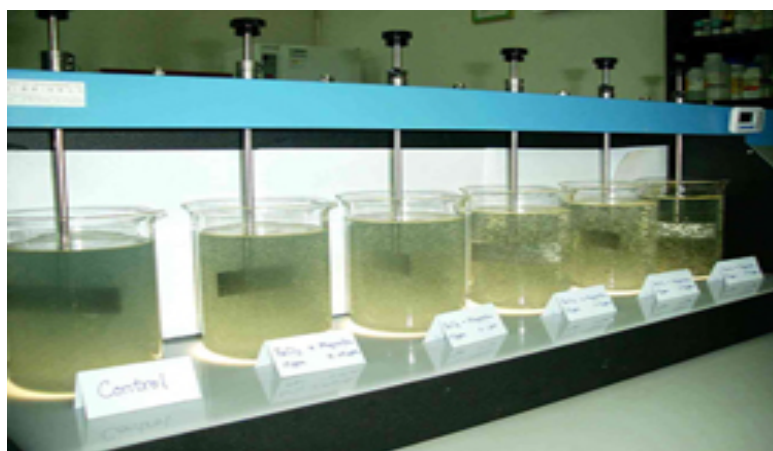
1. พีเอช น้ำแต่ละชนิดจะมีช่วงของพีเอชที่จะเกิดการรวมและตกตะกอนได้ดี การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำที่ไม่อยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้เปลี่ยนสารเคมีที่ใช้แล้วยังจะทำให้ น้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควรด้วย
2. เหลือของสารอนินทรีย์ จะทำให้สิ่งต่อไปนี้เป็นเปลี่ยนแปลงไป ช่วงพีเอชที่เหมาะสม ระยะเวลาที่รวมตัวเป็นตะกอนที่เหมาะสม และสารที่ใช้สร้างตะกอนมากขึ้น
3. อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิค่าความหนืดของน้ำมีมากขึ้น จึงทำให้การตกตะกอนช้าลง มีผลต่อช่วงพีเอชที่เหมาะสมและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้ อุณหภูมิจะมีผลต่อการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์และการเกิดของโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งจะละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง
4. ค่าความเป็นด่างของน้ำ (Alkalinity) จะทำให้น้ำที่เป็นบัฟเฟอร์ให้กับน้ำ มีผลทำให้การปรับพีเอชของน้ำยากขึ้น สิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอช ค่าความเป็นด่างของน้ำจะพบในรูปไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต
5. ความขุ่น น้ำที่มีความขุ่นมาก อาจใช้สารสร้างตะกอนเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับน้ำที่มีความขุ่นน้อย

6. สารสร้างตะกอน ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำอาจแตกต่างกัน ถ้าใช้สารสร้างตะกอนต่างชนิดกัน ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองเปรียบเทียบ เพื่อเลือกสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมกับน้ำนั้น สำหรับน้ำที่มีความกระด้างสูง การใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตและปูนขาวจะช่วยลดความกระด้าง ความขุ่น และสีได้ดี

7. เวลาและความแรงของการผสมเพื่อให้สารเคมีกระจายตัว การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรวดเร็วด้วยเวลาอันสั้น และสารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง ถ้าต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอนที่เกิดขึ้น ต้องเพิ่มโอกาสการลอยมาสัมผัสซึ่งกันและกันให้ได้มากที่สุด โดยทั่วไปการกวนเร็วใช้เวลา 30-90 วินาที ส่วนการกวนช้าใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที (Kawamura, 1991)

วิธีจาร์เทสต์ (Jar Test)

วิธีจาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบในบีกเกอร์ (Beaker) เครื่องมือทดสอบเป็นเครื่องกวนที่ปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งส่วนมากมักมีใบพัด 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารเคมีและกำหนดสถานะต่างๆ ซึ่งได้แก่ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ ความเร็วรอบและระยะเวลาวนน้ำ (ทั้งกวนเร็วและกวนช้า) และระยะเวลาตกตะกอน จากนั้นจึงทดลองโดยเติมสารเคมีในปริมาณต่างๆ ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ระดับฟิเอโซอาจรักษาให้คงที่หรือแปรเปลี่ยน ทั้งนี้แล้วแต่ความมุ่งหมายของการทำจาร์เทสต์ (มันสิน, 2538)



ภาพที่ 2 เครื่องจาร์เทสต์ (Jar Test)

ขั้นตอนต่างๆ ในการทำจาร์เทสต์ (มันสิน, 2538)

1. วิเคราะห์น้ำตัวอย่างเพื่อหา สี ความขุ่น พีเอช และความเป็นด่าง (ตามแต่ความจำเป็น)
2. เติมน้ำตัวอย่าง 600 มิลลิลิตร ลงในแก้วบีกเกอร์แต่ละใบ และเติมสารเคมีที่ใช้เป็น โคแอกกูแลนต์ลงไปในบีกเกอร์ ตามปริมาณที่ต้องการใช้
3. กวนน้ำและสารเคมีอย่างรวดเร็ว (ความเร็ว 100 รอบ/นาที) เป็นเวลา 1 นาที
4. กวนช้า (ความเร็ว 30 รอบ/นาที) เป็นเวลา 20 นาที ระยะเวลาการกวนช้าอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามแต่จุดมุ่งหมายในการทำ Jar Test
5. จดบันทึกเวลาที่เริ่มเกิดฟล็อก (กลุ่มตะกอน) ปรากฏให้เห็น
6. ทิ้งให้ตกตะกอน (โดยปิดเครื่องกวนน้ำ) เป็นเวลา 30 นาที
7. ใช้ปิเปตดูดเอาแต่น้ำใสออกจากบีกเกอร์โดยมิให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นแก้ว
8. วิเคราะห์น้ำใสเพื่อหา สี ความขุ่น พีเอช และระดับความเป็นกลาง ฯลฯ (ตามความจำเป็น)
9. พล็อตกราฟระหว่างปริมาณสารเคมีที่ใช้กับความขุ่นหรือพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ตามความจำเป็นเพื่อหาปริมาณสารเคมีที่สามารถกำจัดความขุ่นหรือสารอื่นๆ ได้มากที่สุด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yasushi and Minour (1973) ได้ทำการศึกษาการตกตะกอนฟลูออไรด์ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งพบว่าแมกนีเซียมไอออนจะเป็นสาเหตุหลักในการตกตะกอนร่วมของฟลูออไรด์กับแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณฟลูออไรด์ที่ตกตะกอนด้วยแคลไซต์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน ในขณะที่ปริมาณฟลูออไรด์ที่ตกตะกอนด้วย อราโกไนท์(Aragonite) จะลดลง อาจเป็นไปได้ว่ากลไกการตกตะกอนของฟลูออไรด์ด้วยแคลไซต์มีความแตกต่างจากการตกตะกอนฟลูออไรด์ด้วยอราโกไนท์ ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณฟลูออไรด์ที่ตกตะกอนด้วยอราโกไนท์จะมีมากกว่าแคลไซต์

Staebler (1974) ได้ทำการศึกษาการบำบัดฟลูออไรด์จากอุตสาหกรรมไทเทเนียม ซึ่งมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ตั้งแต่ 1,750 - 100,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้การตกตะกอนด้วยปูนขาว ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด 95-99 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งที่ผ่านการตกตะกอนยังมีฟลูออไรด์อยู่ในช่วง 9-10 มิลลิกรัม/ลิตร จึงได้มีการนำเรซินและแอคติเวตเตดลูมินามาใช้ในการ

บำบัดด้วย โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟลูออไรด์ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งที่ออกมาจะมีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ต่ำกว่า 1.8 มิลลิกรัม/ลิตร

Wu (1978) ได้ทำการศึกษาการบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำ โดยใช้แอคติเวตเตดอลูมินาซึ่งทำการทดลองแบบครั้งคราว (batch) โดยศึกษาผลกระทบของค่าพีเอช อัตราการดูดซับ และจลนศาสตร์ของการดูดซับเมื่ออัตราส่วนของฟลูออไรด์ต่อแอคติเวตเตดอลูมินาโดยน้ำหนักในหน่วยมิลลิกรัม อยู่ในช่วงที่น้อยกว่า 0.01 มิลลิกรัมของฟลูออไรด์/มิลลิกรัมของสารดูดซับ ผลการทดลองชี้ว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดฟลูออไรด์ คือ 5 และอัตราการดูดซับของฟลูออไรด์ในน้ำจะลดลงเมื่ออัตราส่วนฟลูออไรด์ต่อแอคติเวตเตดอลูมินาเพิ่มขึ้น การศึกษาทางจลนศาสตร์โดยใช้ Langmuir isotherm พบว่าค่าความจุในการดูดซับฟลูออไรด์ของแอคติเวตเตดอลูมินามีค่าสูงสุดเท่ากับ 637 มิลลิกรัมของฟลูออไรด์/กรัมของแอคติเวตเตดอลูมินา

Parthasarathy *et al.* (1986) ได้ทำการศึกษาการใช้เกลือแคลเซียม (Calcium Salts) และ โพลีเมอร์อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Polymeric Aluminium Hydroxide) ในการบำบัดฟลูออไรด์จากน้ำเสีย พบว่าที่ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ต่ำๆ (2×10^{-3} โมล) ปฏิกิริยาการตกตะกอนของแคลเซียมฟลูออไรด์ (calcium fluoride) จะเกิดขึ้นได้ช้า ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลือที่พบในการทดลองจะเป็นไปตามการคำนวณทางทฤษฎีเฉพาะที่แคลเซียมมีความเข้มข้นของสูงและมีระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลนาน การเติมอนุภาคแคลเซียมฟลูออไรด์ (calcium fluoride seed) ประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร จะไปเร่งกระบวนการตกตะกอนและทำให้ปริมาณฟลูออไรด์ที่เหลือใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี การเติมโพลีเมอร์อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะช่วยให้เกิดการตกตะกอนได้ง่ายขึ้น

Phantumvanit *et al.* (1988) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เครื่องกรองฟลูออไรด์ภายในครัวเรือนแถบจังหวัดเชียงใหม่ในการบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำตามบ้านเรือน ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศ กรมอนามัย องค์การอนามัยโลก โดยในการศึกษามุ่งเน้นที่จะลดปริมาณฟลูออไรด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณบ้านแม่ร้อยเงิน อำเภอคอยสะเกิด และบ้านปูลา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีปริมาณฟลูออไรด์ 3-7 มิลลิกรัม/ลิตร ให้เหลือต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเครื่องกรองสารฟลูออไรด์ของศูนย์ทันตสาธารณสุขระหว่างประเทศนี้ ทางองค์การอนามัยโลกได้ยอมรับว่า เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และได้เสนอแนะให้เป็นตัวอย่างสำหรับประเทศกำลังพัฒนาที่มีปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำสูง เช่น ไนจีเรีย

ศรีลังกา เคนยา อินเดีย เป็นต้น เครื่องกรongนี้เป็นที่รู้จักทั่วไปในต่างประเทศในนามของ “ไอโคเดตีฟลูออริเดเตอร์” (ICOH Defluoridator) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ คือ ตัวกรongทำจากท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร สูง 75 เซนติเมตร ใต้กรongประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิดได้แก่ ถ่านไม้ ถ่านกระดูก และกรวดใส่เป็นชั้นๆ ในถุงพลาสติก โดยถุงพลาสติกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-12 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร แล้วเจาะรูวางเข้าไปในเครื่องกรongและทำการวางเป็นชั้นๆ โดยชั้นกลางใส่ถ่านกระดูก 1,000 กรัม ขนาด 40-60 เมช ซึ่งได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 20 นาที ที่ส่วนบนสุดของถังกรongจะบรรจุกรวดเล็ก ๆ 200 กรัม เพื่อกันถ่านลอยและช่วยกรongสิ่งสกปรกต่างๆ ส่วนชั้นล่างสุดใส่ถ่านไม้ 300 กรัม เพื่อบำบัดสีและกลิ่น การทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำไม่เกิน 4 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทั่วถึง จากการศึกษาพบว่า สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ในน้ำปริมาณ 480 ลิตร ให้ลงเหลือต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 2.16 มิลลิกรัมฟลูออไรด์/กรัมของถ่านกระดูก

Saha (1993) ได้ทำการศึกษาทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีการปนเปื้อนฟลูออไรด์โดยใช้การตกตะกอนร่วมกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ซึ่งสามารถลดฟลูออไรด์ได้ถึงประมาณ 15 มิลลิกรัม/ลิตร แล้วจึงนำไปบำบัดต่อด้วยการเติมอลูมิเนียมคลอไรด์ ทำให้ฟลูออไรด์ลดลงเหลือประมาณ 1 มิลลิกรัม/ลิตร

กิตติพร (2534) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไอออนฟลูออไรด์ในน้ำเสียโดยใช้ออกไซด์ของโลหะพบว่า ตัวดูดซับชนิดสารสังเคราะห์ที่นำมาทดลองสามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ได้ดี ซึ่งความสามารถในการดูดซับไอออนฟลูออไรด์ขึ้นกับสภาพพีเอชของน้ำเสีย โดยทั่วไปการดูดซับไอออนฟลูออไรด์เกิดขึ้นได้ดีในสภาพที่เป็นกรดมากกว่าในสภาพด่าง ถ้ามีความเป็นด่างมากๆ คือ ที่พีเอชมากกว่า 10 ขึ้นไป ตัวดูดซับส่วนใหญ่จะไม่มี การดูดซับไอออนฟลูออไรด์เลย ตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีช่วง พีเอชที่เหมาะสมในการใช้งานต่างกันออกไป จากการศึกษาอัตราเร็วในการกำจัดไอออนฟลูออไรด์ พบว่า ปฏิกิริยาในการดูดซับไอออนฟลูออไรด์ของตัวดูดซับจะเสร็จสิ้นภายในเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อน้ำเสียที่เตรียมมีความเข้มข้นเป็น 1 มิลลิโมล และ 5 มิลลิโมล จากการศึกษาพบว่า hydrous cerium (IV) oxide มีความจุในการดูดซับไอออนฟลูออไรด์ไว้บนผิวได้มากที่สุด และสารธรรมชาติ ได้แก่ เปลือกหอยกาบ และกระดูกหมู ก็มีความจุในการดูดซับไอออนฟลูออไรด์ได้สูงใกล้เคียงกับสารสังเคราะห์เช่นกัน

Eli Dahi *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคเนลกอนดา (Nalgoda thechnique) ในการบำบัดฟลูออไรด์ในแทนซาเนีย ซึ่งเทคนิคนี้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศอินเดียโดยใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ อลูม (alum or aluminium salphate) และปูนขาว (lime) ในการตกตะกอนฟลูออไรด์ ใน การศึกษานี้ได้บำบัดน้ำดิบที่มีฟลูออไรด์ระหว่าง 8.8-12.5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้ปริมาณอลูมและ ปูนขาว 12.8 และ 6.4 กรัม ตามลำดับ สามารถลดฟลูออไรด์ได้เหลือ 2.1 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

Grzmil and Wronkowski (2006) ได้ทำการศึกษาการบำบัดฟอสเฟตและฟลูออไรด์จากน้ำ เสียอุตสาหกรรม พบว่า การแยกฟอสเฟตและฟลูออไรด์ออกมาสามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกจะ ใช้แคลเซียมซึ่งจะเห็นว่าไอออนของเหล็กและอลูมินัมตกตะกอนออกมาเป็นเหล็กฟอสเฟตและ อลูมินัมฟอสเฟต ที่พีเอช 3 ในขั้นที่สอง (ที่พีเอช 8) ฟลูออไรด์จะถูกตกตะกอนออก มาในรูปของ แคลเซียมฟลูออไรด์ ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตและฟลูออไรด์เท่ากับ 85-91 เปอร์เซ็นต์ และ 82.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ วิธีที่สอง น้ำเสียมีปริมาณ เหล็กและอลูมิเนียมน้อย จึงใช้แคลเซียม เพื่อแยกฟลูออไรด์ออกมาก่อน (พีเอช 3) จากนั้นจึงกำจัดฟอสเฟตเป็นลำดับต่อมา (พีเอช 8) ซึ่ง ประสิทธิภาพการบำบัดฟลูออไรด์และฟอสเฟตเท่ากับ 85-88 เปอร์เซ็นต์ และ 63-37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ