

บทที่ 2



ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟลูออไรด์

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของฟลูออไรด์

ฟลูออไรด์เป็นธาตุในหมู่ที่ 7 มีความถ่วงจำเพาะ 1.505 จุดหลอมเหลว -219.6°C จุดเดือด -188.2°C น้ำหนักอะตอม 18.9984 ฟลูออไรด์เป็นธาตุที่ไว มักพบในรูปสารประกอบ เช่น NaF , CaF_2 , H_2F_2 และ Na_2SiF_6 เป็นต้น

สารประกอบฟลูออไรด์มีอยู่บนเปลือกโลกประมาณร้อยละ 0.08 เป็นผลให้ธาตุฟลูออไรด์เป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 13 ฟลูออไรด์พบอยู่ในน้ำธรรมชาติ ตั้งแต่ปริมาณน้อยมากจนถึงปริมาณสูงถึง 10 มก./ล. ฟลูออไรด์ในน้ำมักมาจากแร่ธาตุ 3 ชนิด คือ ฟลูออสปาร์ (Fluospaer), ไครโอไลท์ (Cryolite) และแอฟพาไทต์ (Appatite)

2.1.2 ฟลูออไรด์ในน้ำเสีย

ฟลูออไรด์สามารถพบได้ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโรงงานเหล่านี้จะใช้ฟลูออไรด์ในกระบวนการผลิตและปล่อยน้ำเสียที่มีปริมาณฟลูออไรด์สูง อันได้แก่ โรงงานผลิตแก้ว และเซรามิก, โรงงานผลิตถ่านหิน, โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์, โรงงานผลิตแม่พิมพ์โลหะ, โรงงานผลิตปุ๋ย, โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า, โรงงานผลิตโลหะและอลูมิเนียม, โรงงานผลิตยาฆ่าแมลง และโรงงานผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ เป็นต้น โดยความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสีย (Patterson, 1985)

Source	Fluoride Concentration (mg/l)	
	Range	Avg
Computer circuits	-	57.8
Printed circuit boards	-	47.5
Aluminum ore smelting	10.2-1,400	147.7
Coke plant ammonia Recovery still	10-100	-
Steel manufacture		
Sintering plants	-	80.5
Blast furnace	0.49-23.0	14.0
Basic oxygen furnace	3.75-14.5	9.1
Open hearth furnace	65-148	106.5
Electric arc furnace	0-20.7	8.2
Aluminum production (gas scrubber waste)	-	<1,000
Phosphate ore		
Furnace slag quench	73-270	-
Phosphoric acid production	30-150	-
	4,000-12,000	-
	-	11,100
	-	1,480
Phosphate fertilizer plant waste	-	308
	-	1,050
Hydrogen fluoride manufacture	-	13.0
	-	193
Glass manufacture		
TV picture tube	-	143
Incandescent bulb frost	-	2,800
Pressed and blown glass	194-1,980	-
Fluoborate plating bath	-	134
Titanium descaling bath	80,000-99,500	-
Aluminum deoxidizer bath	-	2,250
Steel alloy descaling bath	18,000-39,600	-
Acidic coal-cleaning waste	-	81

ฟลูออไรด์ในน้ำเสี้ยวจะอยู่ในรูปต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของน้ำเสี้ยวนั้นๆ เช่น กรณีน้ำเสี้ยวจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย จะพบฟลูออไรด์ในรูปซิลิกาเตตระฟลูออไรด์ (SiF_4) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการแปรรูปหินฟอสเฟตเพื่อผลิตปุ๋ย ในโรงงานผลิตโลหะจะมีการใช้ฟลูออไรด์ในรูปของฟลูออรัสปาร์ (Fluorspar) ในขั้นตอนการเผาโลหะในเตาเผาที่ใช้ออกซิเจน การผลิตอลูมิเนียมก็เป็นแหล่งน้ำเสี้ยวฟลูออไรด์เช่นกัน โดยฟลูออไรด์อยู่ในรูปสารประกอบฟลูออไรด์ไครโอไลท์ (cryolite - Na_3AlF_6) และมีความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเสี้ยวประมาณ 107-145 มก./ล. ฟลูออไรด์ (Sylvester และคณะ, 1967) อุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เช่น การชุบคิงก ตะกั่วหรือโลหะอัลลอยด์ จะใช้ฟลูออไรด์ในรูปฟลูออโบเรตไอออน (BF_4^-) ซึ่งจะเกิดการไฮโดรไลซิสเป็นโบรอนไตรฟลูออไรด์(BF_3) และฟลูออไรด์ไอออนในที่สุด อุตสาหกรรมผลิตหลอดภาพโทรทัศน์และหลอดไฟจะใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อขัดชิ้นส่วนอุปกรณ์ให้เรียบ เช่นเดียวกับในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วที่ต้องใช้กรดไฮโดรฟลูออริกเป็นกรดกัดให้แก้วมีความเป็นเงา ทำให้เกิดน้ำเสี้ยวที่มีฟลูออไรด์ในรูปไฮโดรเจนฟลูออไรด์(HF) หรือฟลูออไรด์ไอออน (ขึ้นกับค่าพีเอช ของน้ำเสี้ยว) โดยมีความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเสี้ยวประมาณ 1,000-3,000 มก./ล. ฟลูออไรด์ (Zabban และ Jewett, 1967)

กรรมวิธีในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำเสี้ยวมีหลายกระบวนการ ซึ่งในแต่ละกระบวนการก็จะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้กำจัดฟลูออไรด์มีอยู่ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการตกตะกอนผลึก (Precipitation) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption)

2.2 กระบวนการทั่วไปที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์

2.2.1 กระบวนการตกตะกอนผลึก (Precipitation)

ในกระบวนการตกตะกอนผลึกนั้น สารเคมีที่นิยมใช้ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นสารที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับฟลูออไรด์ในน้ำเสี้ยวเกิดเป็นแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ซึ่งตามทฤษฎีแคลเซียมฟลูออไรด์สามารถละลายน้ำได้มากที่สุดประมาณ 8 มก./ล. ฟลูออไรด์ ที่ความเข้มข้นสโตยชิโอมตริกของแคลเซียม (Patterson, 1985) ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมฟลูออไรด์ในน้ำมีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าว ก็จะมีการตกตะกอนผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ขึ้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะ

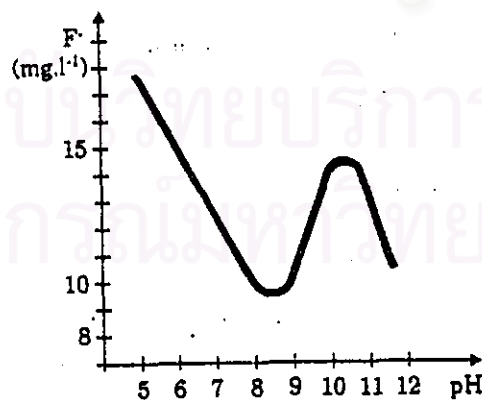
ตารางที่ 2.2 กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์ (Patterson, 1985)

Treatment Process	Fluoride Concentration (mg/l)		Current Application
	Initial	Final	
Lime	-	10	Industrial
	1,000-3,000	20	
	500-1,000	20-40	
	200-700	6 (16-hr settling)	
	45	8	
	4-20	5.9 (avg)	
	590	80	
	57.8	29.1 (avg)	
		14-16 (best)	
	93,000	0.8-8.8	
	-	10.6 (Clarified)	Industrial
		10.4 (Filtered)	
Lime, two-stage	1,460	9	
Lime + calcium chloride	-	12	
Lime + alum	-	1.5	
Lime + alum	2,020	2.4	Industrial (pilot scale)
Calcium carbonate + lime, two-stage	11,100	6	Industrial
Alum	3.6	0.6-1.5	Municipal
Alum	60	2	Lab scale
Hydroxylapatite beds			
Synthetic	12-13	0.5-0.7	Municipal
Synthetic	10	1.6	
Bone char	6.5	1.5	
Bone char	9-12	0.6	
Alumina			
contact bed	4.5-7.5	0.1-1	Municipal
	8	1	Municipal
	9	1.3	Industrial (lab scale)
	20-40	2-3	Industrial (pilot scale)

สามารถลดฟลูออไรด์โดยการตกตะกอนผลึกให้เหลือประมาณ 10-20 มก./ล. เนื่องจากการตกตะกอนของแคลเซียมฟลูออไรด์จะเกิดขึ้นช้ามาก เมื่อทำการทดลองโดยให้เวลาในการตกตะกอนด้วยปูนขาวเป็นเวลา 24 ชม. พบว่าสามารถลดฟลูออไรด์ในน้ำเสียได้ใกล้เคียงกับค่าความทฤษฎี คือที่ 8 มก./ล. (Zabban และ Jewett, 1967) ข้อเสียข้อหนึ่งของกระบวนการตกตะกอนผลึกด้วยปูนขาวคือการจมตัวของตะกอนอาจเกิดได้ช้า จากการวิจัยในห้องปฏิบัติการพบว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันต่อการตกตะกอนด้วยปูนขาว สามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ลดลงต่ำกว่า 10 มก./ล. (Fraust, 1975)

การใช้ปูนขาวปริมาณมากพบว่าสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้ดี โดยจากการวิจัยพบว่าการเติมปูนขาว 4 ก. ปูนขาว/ล. ของน้ำเสีย สามารถลดฟลูออไรด์จาก 200 มก./ล. เหลือ 3 มก./ล. ได้ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 19 ชม. (Rohrer, 1971) และการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำเสียโรงงานผลิตกรดฟอสฟอริก ต้องการใช้ปูนขาว 6.8 ก./ล. (เทียบเท่ากับสัดส่วนปริมาณความต้องการ 4.7 ก. ปูนขาว/ก. ฟลูออไรด์) ในการลดปริมาณฟลูออไรด์จาก 1,460 มก./ล. ฟลูออไรด์ ลงเหลือ 9 มก./ล. (Mooney และคณะ, 1982) ทั้งนี้การใช้แคลเซียมคลอไรด์ควบคู่กับปูนขาวในอัตราส่วน 1 : 1 จะทำให้ค่าฟลูออไรด์ลดลงมากกว่าการใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียว (Rohrer, 1974)

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพีเอชและค่าความเข้มข้นของแคลเซียมจะมีผลต่อกระบวนการตกตะกอนผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 8-9 (Degremont, 1991) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือเทียบกับค่าพีเอชโดยกระบวนการตกตะกอนผลึก (Degremont, 1991)

2.2.2 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวจะเกิดได้โดยการผ่านน้ำเสียไปในชั้นสัมผัส (Contact bed) เพื่อให้ฟลูออไรด์เกิดปฏิกิริยากับตัวกลางที่บรรจุในชั้นสัมผัส ซึ่งตัวกลางที่นิยมใช้คือ แอกทิเวตอะลูมินา (Activated alumina) กระบวนการนี้นิยมใช้มานานในการลดฟลูออไรด์ในน้ำประปา สารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพของแอกทิเวตอะลูมินา ได้แก่ โซดาไฟ, กรดซัลฟูริก, อะลูมิเนียมซัลเฟต และกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น ในงานอุตสาหกรรมมักจะใช้กรดซัลฟูริกเป็นสารฟื้นฟูสภาพ (Staebler, 1979)

การใช้อะลูมินาเบดตามหลังกระบวนการตกตะกอนผลึกด้วยปูนขาวในการกำจัดน้ำเสียฟลูออไรด์ความเข้มข้นสูง (1,000-3,000 มก./ล.) ที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์คงเหลือในน้ำออก 30 มก./ล. จะสามารถกำจัดฟลูออไรด์ได้จนเหลือ 2 มก./ล. (Zabban และ Jewett, 1967)

2.3 การกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด

แม้ว่ากระบวนการตกตะกอนผลึกด้วยปูนขาวจะเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟลูออไรด์ความเข้มข้นสูงมากกว่าวิธีอื่นๆก็ตาม แต่พบว่าจำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นๆเพิ่มในระบบเพื่อช่วยแยกส่วนของน้ำใสและสลัดจ์ออกจากกัน นอกจากนี้ยังต้องมีกระบวนการในการกำจัดสลัดจ์ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น การทำให้สลัดจ์เข้มข้นขึ้น (Sludge thickening), การรีดน้ำสลัดจ์ (Sludge dewatering) และการทิ้งกากสลัดจ์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะต้องใช้เนื้อที่ และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และดำเนินงานมาก

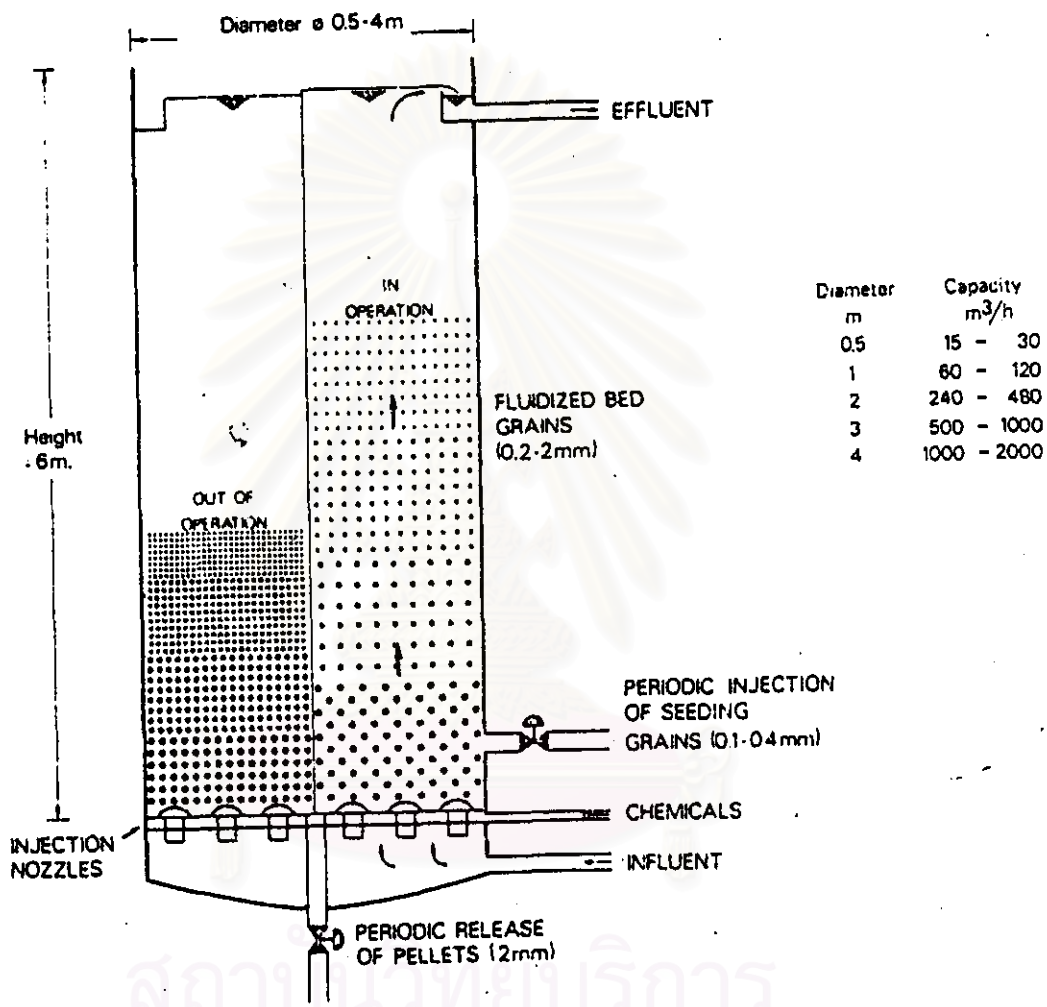
การใช้กระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่น่าสนใจที่เหมาะสมจะนำมาใช้ โดยที่สามารถออกแบบให้ถึงปฏิกรณ์มีขนาดเล็ก และไม่จำเป็นต้องใช้ถังตกตะกอน ทำให้ประหยัดเนื้อที่ก่อสร้างและค่าใช้จ่ายได้

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของระบบ

ลักษณะถึงปฏิกรณ์ของกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไคซ์เบด ได้แสดงไว้รูปที่ 2.2 ซึ่งตัวถังปฏิกรณ์จะเป็นรูปทรงกระบอกโดยบรรจุอนุภาคตัวกลาง เช่น ทรายกรอง ไว้ภายในเพื่อเป็นอนุภาคชักนำในการตกผลึก โดยน้ำเสียจะถูกสูบเข้าในทิศทางไหลขึ้น โดยใช้ความเร็วประมาณ 40-120 ม./ชม. ซึ่งจะทำให้ทรายเกิดสภาวะฟลูอิดไคซ์จะต้องไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่า ของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ทรายเกิดสภาวะฟลูอิดไคซ์ (สมศักดิ์, 2528) ที่ด้านใต้ของถังปฏิกรณ์ น้ำเสียและสารเคมีจะถูกสูบเข้าถังโดยผ่านหัวฉีด (Nozzle) โดยมีการผสมกันภายในถังปฏิกรณ์ ตัวอย่างหัวฉีดแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในสภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำมาก จะทำให้การผสมกันของน้ำเสียและสารเคมีเป็นไปอย่างรวดเร็วมีประสิทธิภาพและทั่วถึง (J.C. van Dijk และ Wilms, 1991) และจากการที่น้ำไหลในทิศทางไหลขึ้นทำให้น้ำและทรายเกิดการหมุนวนในแนวตั้งตลอดพื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์ทำให้เพิ่มโอกาสในการชนกันของผลึกที่เกิดกับเม็ดทราย และในสภาวะที่เหมาะสม การเกิดการอิมิตัวยังขวิดของสารเคมีในถังปฏิกรณ์ ประกอบกับสภาวะฟลูอิดไคซ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคตัวกลางสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้การเกิดผลึกเป็นไปอย่างรวดเร็วบนอนุภาคตัวกลางซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นเม็ดผลึก เม็ดที่ใหญ่และหนักกว่าจะจมสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ซึ่งจำเป็นต้องระบายทิ้งไป แล้วเติมอนุภาคตัวกลางใหม่ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเข้าไปแทนที่ในถังปฏิกรณ์ ส่วนเม็ดผลึกที่ระบายออกจะมีลักษณะเป็นเม็ดที่มีผลึกแข็ง ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Waterfree pellet) ซึ่งผลึกนี้สามารถละลายได้ในกรด

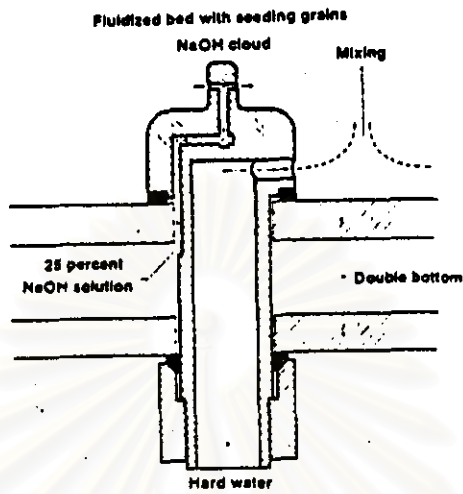
ทั้งนี้ข้อควรระวังในการออกแบบคือ การอิมิตัวยังขวิดมากเกินไป จะทำให้เกิดผลึกเม็ดเล็กๆ ขึ้นในน้ำแทนที่จะเกิดบนเม็ดอนุภาค (Spontaneous nucleation) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงและน้ำออกขุ่น (J.C. van Dijk และ Braakensiek, 1984)

จุดเด่นอีกประการหนึ่งของระบบนี้ คือ เมื่อความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำเสียมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการอิมิตัวยังขวิดมากเกินไป ระบบนี้สามารถปรับตัวได้โดยเพิ่มการเวียนกลับของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาทำการเจือจางน้ำเสียก่อนเข้าระบบได้ดังรูปที่ 2.5

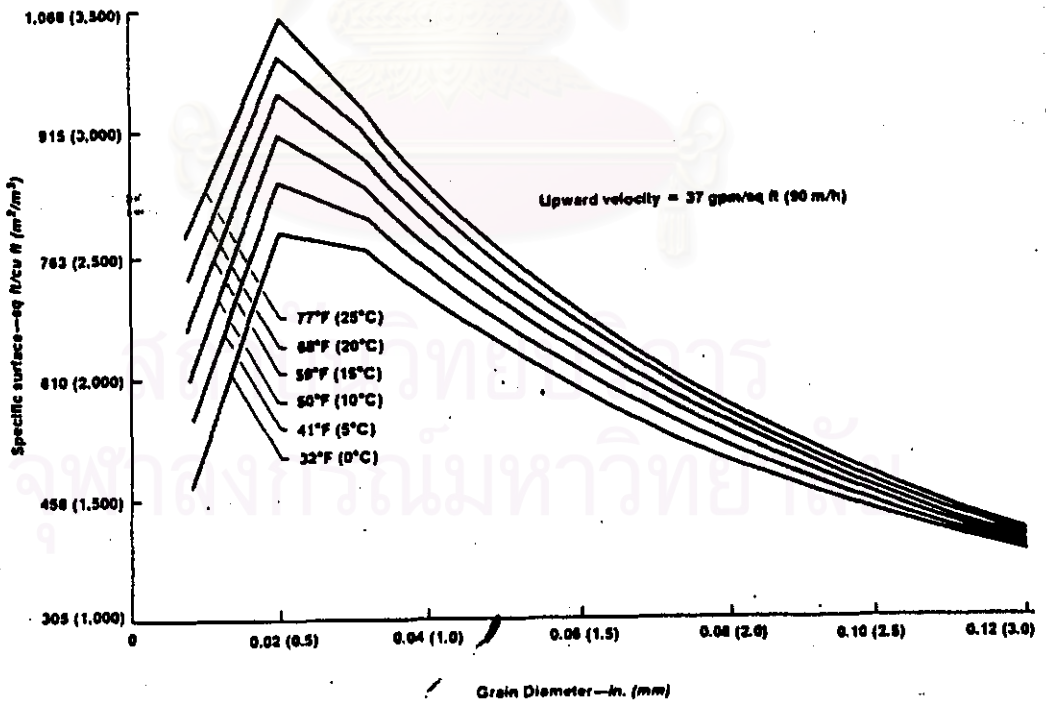


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

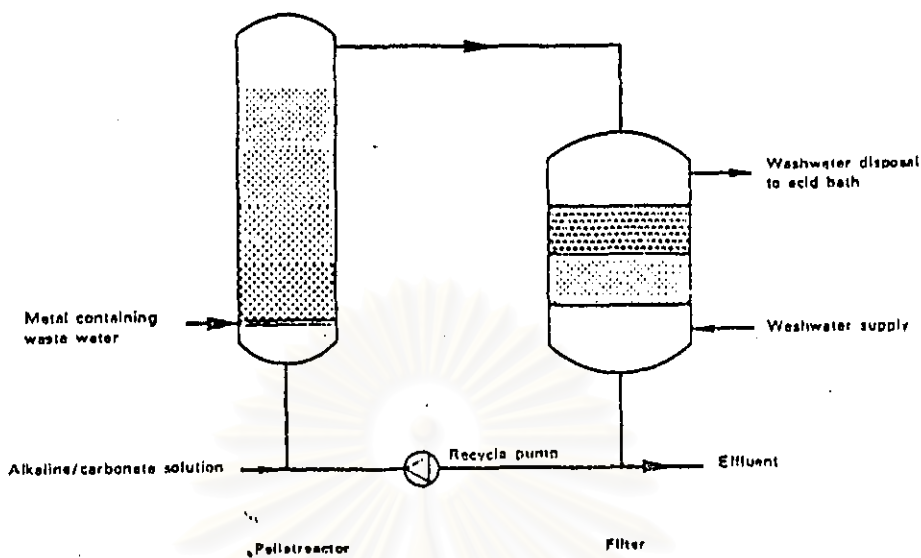
รูปที่ 2.2 ถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Van Dijk J.C. และ Braaksiek, 1984)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างหัวฉีด (C. van der Veen และ Graveland, 1988)



รูปที่ 2.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด (C. van der Veen และ Graveland, 1988)



รูปที่ 2.5 ถึงปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการเวียนน้ำกลับและการกรองตามหลัง
(Scholler และคณะ, 1991)

2.3.2 ทฤษฎีการเกิดผลึก

กระบวนการตกผลึก (Crystallization process) เป็นกลไกที่ใช้แยกสารที่เป็นของแข็งออกจากสารละลาย ประกอบด้วย 2 กลไกสำคัญ (J.C. van Dijk และ Wilms, 1991) อันได้แก่

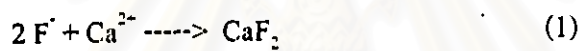
2.3.2.1 กลไกการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นการสร้างผลึกจากสารละลาย คือมีการเกิด (Birth) ของผลึกจากสารละลายที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation)

2.3.2.2 กลไกการเติบโตของผลึก (Growth) เป็นการเติบโตของผลึก มีการเพิ่มขนาดของผลึก โดยการจัดเรียงผลึกขึ้นเป็นโครงสร้างผลึก (Crystal lattice) และมีการเคลื่อนที่ของไอออน จากผิวผลึกเข้าไปในโครงสร้างผลึกด้วย

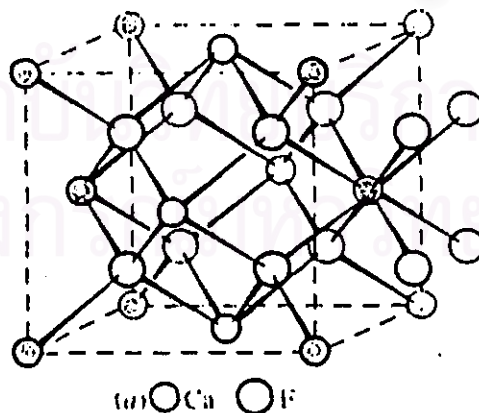
หากสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดมาก จะเกิดกลไกการสร้างผลึกและการเติบโตของผลึกขึ้นพร้อมๆกัน อนุภาคจะเกาะตัวกันเร็ว ผลึกจะมีขนาดเล็ก และ เช่น ในกรณีของกระบวนการตกตะกอนผลึกแบบธรรมดาทั่วไป (Conventional precipitation process) จะเรียกว่า Spontaneous nucleation หรือ Homogeneous nucleation ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกเม็ดเล็กๆ จำนวนมากขึ้นในน้ำ

แต่หากสารละลายอิ่มตัวความเข้มข้นต่ำ จะเกิดกลไกการเติบโตของผลึกเป็นกลไกเด่น อนุภาคจะเกาะตัวอย่างช้าๆ จะได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ รูปผลึกจะเป็นระเบียบทางเรขาคณิต เช่น ในถึงปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า Heterogeneous Nucleation

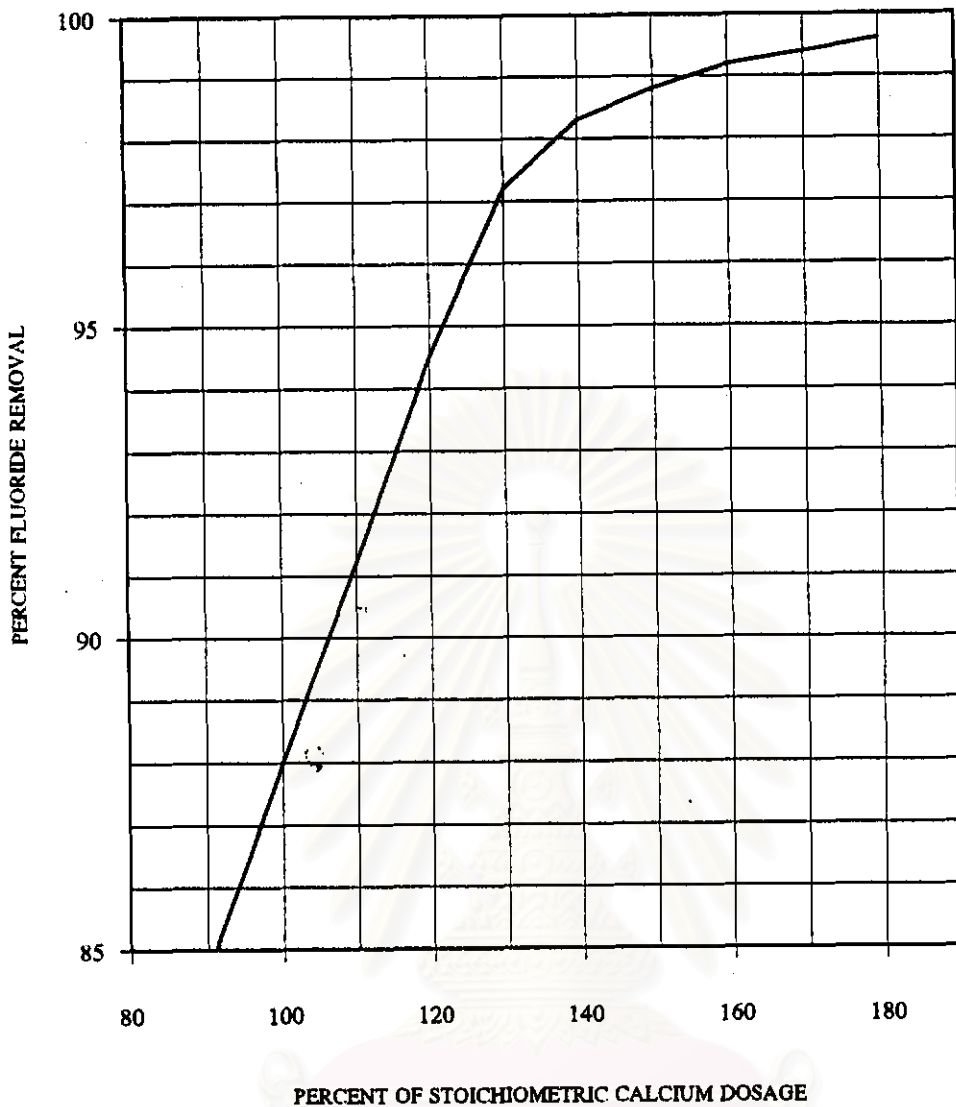
การกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำเสียโดยการตกผลึกในถึงปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด ฟลูออไรด์จะตกผลึกในรูปโลหะฟลูออไรด์ โดยเลือกใช้ผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ด้วยการใช้ CaCl_2 เป็นตัวเพิ่มปริมาณ Ca^{2+} ในการตกผลึก ซึ่งจะได้ผลึกเป็น แคลเซียมฟลูออไรด์ ดังสมการ



แคลเซียมฟลูออไรด์มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีความถ่วงจำเพาะ 3.14 มีความสามารถในการละลายน้ำได้ 0.0017 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยมีโครงสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.6 และจากรูปที่ 2.7 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์เทียบกับปริมาณแคลเซียม จะเห็นว่า การใช้ปริมาณของแคลเซียมที่ 1.5 เท่า ของจุดสตอยชิโอเมตริกจะมี



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์ (William, 1991)



รูปที่ 2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์เทียบกับปริมาณแคลเซียม

(Patterson, 1985)

ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกประมาณร้อยละ 99 (Patterson, 1985) ผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์จะมีลักษณะคล้ายคอลลอยด์ การตกตะกอนจะช้ามาก แต่เมื่อนำมาผ่านถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดชั้นทรายที่ลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการตกผลึก และผลึกบนเม็ดทรายมีความถ่วงจำเพาะสูง ความเร็วในการตกตะกอนสูง ทำให้สามารถป้อนน้ำเสียได้ในความเร็วสูงเช่นเดียวกัน ทำให้ถังปฏิกรณ์ไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ (M. van Ammers และคณะ, 1984) และจากการที่แคลเซียมฟลูออไรด์มีความสามารถละลายน้ำได้ไม่เท่ากันที่พีเอชต่างๆ ดังนั้นจะต้องควบคุมให้มีพีเอชที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการตกผลึกได้ดีที่สุด



2.3.3 ฟลูอิดไลเซชัน (Fluidization)

สมศักดิ์ คำรงเลิศ (2528) ให้นิยามของ ฟลูอิดไลเซชันว่าเป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดหรือชิ้นของแข็งดังกล่าว แรกทีเดียวถูกวางไว้บนตะแกรงในถังปฏิกรณ์ ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ของไหลที่ใช้ก็มีก๊าซหรือของเหลวปล่อยให้ผ่านมาจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของถังปฏิกรณ์ เพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหลกล่าวคือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบด หรือภายในถังปฏิกรณ์ หรือระหว่างเบดต่อบેดก็ได้ เราจึงเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า ฟลูอิดไลเซชัน (Fluidization) ตัวแปรสำคัญ ในการที่จะทำให้อนุภาคมีคุณสมบัติเหมือนของไหลได้อย่างเหมาะสมคือ ความเร็วต่ำสุดของก่อกวนสถานะเหมือนของไหล ตัวกระจายของไหล และชั้นส่วนที่จะทำให้อ่อนนุ่มของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของถังปฏิกรณ์

2.3.3.1 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสถานะเหมือนของไหล

(Minimum fluidizing velocity, V_{mf})

การผ่านของไหลเข้าไปในเครื่องที่มีกลุ่มอนุภาคบรรจุอยู่ โดยเพิ่มความเร็วของของไหลไปเรื่อย ๆ จะพบว่าที่ความเร็วหนึ่งกลุ่มอนุภาคจะเริ่มขยับตัวผิวบนสุดของกลุ่มอนุภาคที่เฉยไม่เรียบก็จะเรียบเสมอกันอยู่ในแนวระนาบ ความเร็วต่ำสุดนี้เป็นค่าสำคัญมาก เพราะถ้าหากต้องการให้อนุภาคอยู่ในสถานะเหมือนของไหลแล้ว จะต้องใช้ความเร็วของของไหลที่สูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วนี้ ความเร็วดังกล่าวเรียกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดสถานะเหมือนของไหล แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าที่ความเร็วนี้อนุภาคจะเริ่มเข้าสู่สถานะเหมือนของไหลแล้ว แต่ถ้าจะให้เกิดผลดี หรือต้องการให้สถานะเหมือนของไหลนี้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดีที่สุด จะต้องใช้ความเร็วไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดสถานะเหมือนของไหล (พล ศาเกษตร, 2526)

2.3.3.2 การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล

การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล สามารถทำได้โดยทำการทดลองปรับความเร็วน้ำที่เข้าถังปฏิกรณ์ ตรวจสอบการขยับตัวของชั้นอนุภาคในถังปฏิกรณ์ และค่าความดันสูญเสีย เมื่อเพิ่มความเร็วไหลขึ้นความดันสูญเสียจะเพิ่มตามจนถึงค่าหนึ่ง ความดันสูญเสียจะคงที่พร้อมกับชั้นของอนุภาคจะเริ่มขยับตัว ความเร็วนี้ ณ จุดนี้คือความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล

2.3.3.3 ตัวกระจายของไหล (Distributer)

พล สาททอง (2526) ได้กล่าวไว้ว่าลักษณะของการอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับตัวกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลมีไว้เพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาข้างล่างและให้ของไหลไหลผ่านได้สามารถกระจายของไหลออกได้เต็มผิวหน้าตัดของตัวเครื่องโดยที่ความเร็วของไหลที่เหนือตัวกระจายของไหลควรจะทำกันทุกจุดองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนที่จะทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคที่มีอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลดีหรือไม่ ก็คือความดันที่ลด (Pressure drop) ของของไหลที่ไหลผ่านตัวกระจายของไหลถ้าความดันลดน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันลดโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10 ของความดันลดที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว และ/หรือจะต้องไม่ต่ำกว่า 250 มิลลิเมตรของน้ำ ตัวกระจายของไหลมีหลายชนิด เช่น แบบแผ่นเจาะรู แบบตะแกรง แบบแผ่นอัด แบบท่อเจาะรู แบบระบบผสม ฯลฯ แต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของงาน

2.3.4 การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไคซ์เบด

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้จะเป็นรูปทรงกระบอก ภายในบรรจุอนุภาคชักนำ (Seeding material) คือ ทราเยกรอง ความเร็วในการไหลของเหลวในถังปฏิกรณ์มีค่าสูงเพื่อที่จะให้มีอนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลที่เหมาะสม และเพื่อป้องกันมิให้อนุภาคเหล่านั้นติดกันโดยใช้ความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้เกิดสภาวะเสมือนของไหลซึ่งสามารถหาได้จากการทดลอง สารเคมีที่เลือกใช้จะถูกฉีดเข้าสู่ระบบในปริมาณที่จะให้ได้พีเอชตามที่กำหนดและปริมาณแคลเซียมตามที่กำหนด ฟลูออไรด์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกฉีดเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ สภาวะของกระบวนการคือ ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ ปริมาณแคลเซียม และพีเอชในถังปฏิกรณ์จะต้อง

เหมาะสม เพื่อที่จะให้เกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) ของแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) ที่เหมาะสม ทั้งนี้การเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดจะต้องไม่มากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้เกิด Spontaneous nucleation จะทำให้น้ำออกขุ่นและประสิทธิภาพการกำจัดต่ำ ดังนั้นการใช้กระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดมากเกินไป และกลุ่มอนุภาคเสมือนของไหลจะให้พื้นที่ผิวในการตกผลึกมาก ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดผลึก แคลเซียมฟลูออไรด์สูงและเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เป็นผลกบนเม็ดอนุภาคเหล่านั้น ระบบนี้ควบคุมโดยค่าพีเอชและปริมาณแคลเซียมที่เหมาะสม ดังนั้นการดำเนินการของระบบนี้จึงง่ายและมีราคาในการดำเนินงานต่ำ

จากการศึกษาพบว่าระบบนี้อาจจะมีของแข็งแขวนลอยในน้ำออกอันเนื่องมาจากการขัดสีของผลึกบนเม็ดทรายหรือการเกิดผลึกในน้ำ (Spontaneous nucleation) จึงต้องมีกระบวนการกรองตามหลัง (Post filtration) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ (Wilms และคณะ, 1988) ดังรูปที่ 2.5

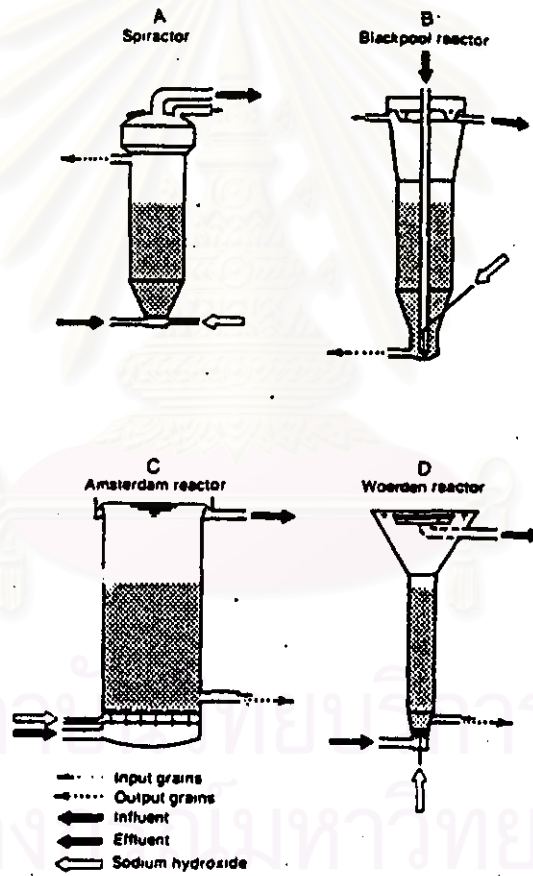
2.4 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด

การตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดได้มีการศึกษาไม่นาน เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งพัฒนามาจากการนำเอากระบวนการตกผลึกมาใช้กับกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด การวิจัยเป็นไปอย่างต่อเนื่องเพื่อช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น การศึกษาที่ผ่านมาได้มีดังนี้

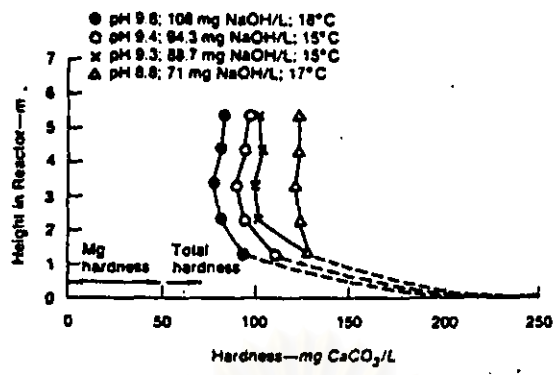
Graveland และ คณะ (1983) ได้ทำการศึกษาในเรื่องการกำจัดความกระด้างในน้ำ ที่เมืองอัมสเตอร์ดัม ประเทศเนเธอร์แลนด์เพื่อนำน้ำมีความกระด้างรวม 150 มก./ล.หินปูน ตามมาตรฐานประชาคมยุโรป การศึกษาดำเนินการโดยคณะกรรมการ KIWA ซึ่งเลือกวิธีการกำจัดความกระด้างของน้ำด้วยการตกผลึกในถังปฏิกรณ์เพลเล็ต (Pellet reactor) โดยเลือกใช้ถังปฏิกรณ์ในลักษณะต่างๆ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.8 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.3

ข้อสรุปจากการศึกษาพบว่า การตกผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ความสูง 1 ม.จากกันถึง ซึ่งสามารถเทียบเป็นเวลาเก็บกับ 5 -10 วินาที ค่าความกระด้างในน้ำจะลดลงเท่ากับค่าความกระด้างในน้ำออก ดังรูปที่ 2.9 และพบว่าค่าพีเอชที่ใช้ในการกำจัดความกระด้างในน้ำโดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าเท่ากับ 9.8 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากระบวนการตกตะกอนผลึกที่ใช้ค่าพีเอชสูงกว่า 11 และเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอช

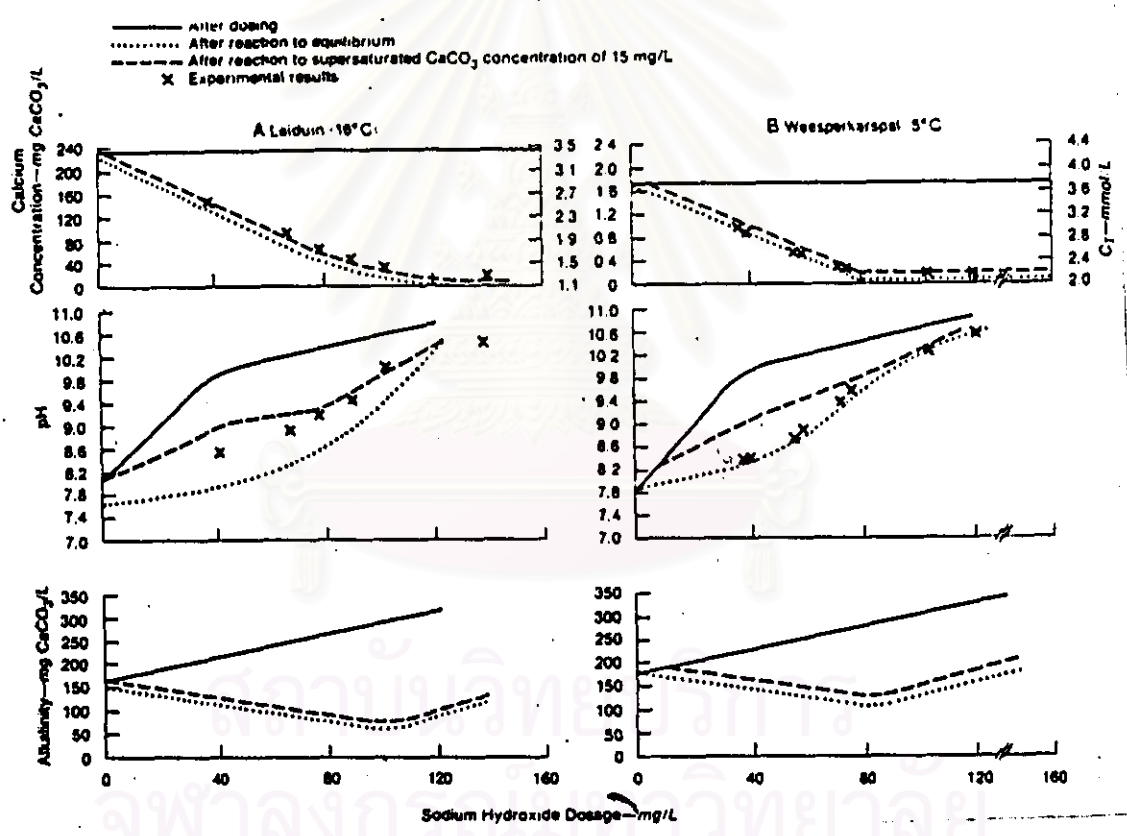
จะทำให้ค่าความเป็นด่างลดลง ดังรูปที่ 2.10 และเพื่อประสิทธิภาพที่ดีการออกแบบถังปฏิกรณ์จะต้องมีการไหลอย่างสม่ำเสมอในถังปฏิกรณ์และคำนึงถึงการผสมกันของน้ำที่เข้าถังปฏิกรณ์กับสารเคมีจะต้องรวดเร็ว และพื้นที่การผสมจะต้องเพียงพอเพื่อป้องกันการอิมตัวยิ่งยวดมากเกินไป ซึ่งถ้าทุกอย่างเหมาะสมจะทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วไหลขึ้น ความสูงชั้นทราย และขนาดเม็ดทราย ทำให้ง่ายต่อการควบคุม และในกรณีที่ใช้กำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลจะสามารถกำจัดเหล็กและแมงกานีสได้อีกด้วย



รูปที่ 2.8 รูปแบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในเนเธอร์แลนด์ (Graveland และ คณะ, 1983)



รูปที่ 2.9 ค่าความกระด้างคงเหลือที่ความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ (Graveland และคณะ, 1983)



รูปที่ 2.10 ผลการทดลองกำจัดความกระด้างด้วยถังปฏิกรณ์แบบ Amsterdam (Graveland และคณะ, 1983)

Pellet softeners in the Netherlands

Location	Year of Construction	Reaction Type	Diameter	Reactors x Capacity m ³ /h	Chemical	Process Scheme	Total Hardness mg CaCO ₃ /L		Remark
							Influent	Effluent	
Alphen aan de Rijn	1975	Spiractor	1.5	3x200	Caustic soda	Groundwater, aeration, filtration, softening, filtration	520	270	Carry-over at velocity >100 m/h; turbidity increase during grain seeding; scaling nozzles postfiltration; effluent mixed with soft water (5:2)
Altena	1977	Blackpool	2.1	1x250	Lime	Groundwater, aeration, softening, acid dosing, filtration	310	130	30 percent calcium reduction in filters; discontinuous operation; acid dosing 40 mg CaCO ₃ /L
Amsterdam (Leiduin)	1972	Amsterdam	0.6*	1x35	Caustic soda	Surface water, coagulation, sand filtration, infiltration (dunes), aeration, filtration, softening, slow sand filtration	240	150	Turbidity increase of less than 1 ntu; postfiltration run time of 1 month
Amsterdam (Weespertaspel)	1979	Amsterdam	2.6**	1x700	Caustic soda	Surface water, coagulation, filtration, ozonation, softening, coagulation, filtration, slow sand filtration	240	150	Turbidity increase of less than 1 ntu
Hazerswoude	1978	Woerden	1.6	3x200	Caustic soda	Groundwater, aeration, filtration, softening, filtration	590	270	Postfiltration run time of 1-2 days
Noord Bergum	1979	Woerden	1.8	1x260	Caustic soda	Groundwater, aeration, filtration, softening, filtration	320	150	Scaling problem at higher temperatures
Ridderkerk	1973	Spiractor	1.0 1.4	1x80 1x140	Caustic soda	Groundwater, aeration, filtration, (dry) filtration, softening, filtration	320	150	Without prefiltration no crystallization; serious short circuiting in large reactor; effluent mixed with nonsoftened water (2:3) before postfiltration
Spanenburg	1982	Woerden	1.8	10x260	Caustic soda	Ground water, aeration, filtration, degasification, softening, filtration	320	150	Scaling problem at higher temperature; effluent mixed with nonsoftened water (4.6:1)
Woerden	1972	Woerden	1.4	3x140	Caustic soda	Groundwater, aeration, filtration (dry), softening, filtration	380	160	Effluent mixed with soft water (3:2)

*Planned expansion - 10 reactors with a diameter of 3.0 m each

**Planned expansion - 5 reactors with a diameter of 2.6 m each

ตารางที่ 2.3 ผลการกำจัดความกระด้างในน้ำโดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไลซ์เบดในเนเธอร์แลนด์

วิทยาลัยเทคโนโลยี
 วิศวกรรมศาสตร์
 วิทยาเขตชลบุรี
 วิทยาเขตชลบุรี

J.C. van Dijk และ Braakensiek (1984) ทำการวิจัยในการกำจัดฟอสเฟตด้วยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้โซดาไฟ ซึ่งจะตกผลึกในรูปแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) การวิจัยใช้ถังปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก ให้น้ำเสียไหลแบบไหลขึ้น ความสูงของถัง 6 ม. ความสูงทราย 2 ม. โดยใช้ทรายขนาด 0.1 - 0.6 มม. เป็นอนุภาคตัวกลางความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 40 ม./ชม. พบว่า การเพิ่มค่าพีเอชจะเพิ่มแรงขับในการตกผลึก (Driving force) แคลเซียมฟอสเฟตในคอลัมน์ฟลูอิดไดซ์เบด แต่หากค่าพีเอชสูงเกินไป จะทำให้เกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟตในน้ำแทนที่จะเกิดการตกผลึกบนเม็ดทราย (Spontaneous nucleation) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ค่าผลคูณการละลายของแคลเซียมฟอสเฟตสูงเกินไปด้วย ผลการทดลองพบว่าฟอสเฟตถูกกำจัดออกไปถึงร้อยละ 90 วัดในรูป soluble - ortho phosphate ผลึกแคลเซียมฟอสเฟตสามารถนำกลับไปใช้ในอุตสาหกรรมฟอสเฟตได้

Catholic University of Leuven, Belgium (1985) อ้างโดย อัญชติ จันทวรรณกูร (2535) ได้มีการวิจัยในเรื่องการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกผลึก ซึ่งตกผลึกเป็นเม็ดตะกอนในรูปโลหะคาร์บอเนตการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก มีทรายเป็นอนุภาคตัวกลาง สารละลายคาร์บอเนตมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ในถังปฏิกรณ์ โดยใช้ความเร็วที่ทำให้เกิดภาวะฟลูอิดไดซ์ น้ำเสียที่มีโลหะหนักถูกฉีดเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ในรูปโลหะคาร์บอเนตการทำให้โลหะหนักตกผลึกใช้เวลานในการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นและถูกกำจัดไปในที่สุด

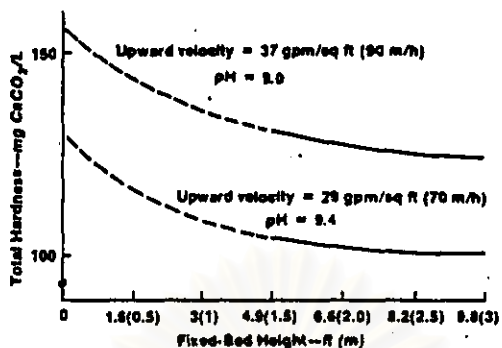
ปี คศ. 1987-1988 บริษัท DHV Consultant อ้างโดย อัญชติ จันทวรรณกูร (2535) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วิธีตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดอยู่ในช่วง 10-100,000 ppm. มีประสิทธิภาพการกำจัดถึงร้อยละ 90-99 โดยมีการหมุนเวียนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาเจือจางน้ำเข้า การทดลองครั้งแรกในปี คศ. 1987 ทดลองกับนิเกิลที่บริษัทดัชท์ เพลตติ้ง (Dutch plating Co., LTD.) ต่อมาในปี คศ. 1988 ได้นำมาใช้กำจัดสังกะสี โคบอลต์ นิเกิลและทองแดง ในระบบกำจัดวิธีนี้ควบคุมการทำงานง่าย เกิดเม็ดตะกอนในรูปโลหะคาร์บอเนต ซึ่งนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมได้

Scholler และคณะ (1987) ได้รายงานถึงการกำจัดทองแดง โดยการตกผลึกในรูปของคอปเปอร์คาร์บอเนต ($CuCO_3$) โดยทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 1300 ppm. ขนาดถังปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.80 - 99.95 ในช่วงพีเอช 6.5 - 8.5 คุณภาพของน้ำทิ้งที่ได้มีความเข้มข้นของทองแดงเพียง 0.2 - 2.0 ppm.

Wilms และคณะ (1988) ได้ร่วมทำการศึกษากำจัดนิเกิลจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยกระบวนการตกผลึกนิเกิลคาร์บอเนตในฟลูอิดไดซ์เบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 3 ซม. สูง 2.4 ม. ใช้เม็ดทรายขนาด 0.4-0.5 มม. ใช้ค่าความเร็วน้ำไหลขึ้น 60 ม./ชม. ความสูงของเบดนิ่ง 1.0 ม. ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิโมลต่อลิตร โดยมีอัตราส่วน CT/Ni 2.5 โมลต่อโมล เมื่อ CT คือผลรวมของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนต ที่การะบรทุกนิเกิล 350 กรัมต่อตารางเมตรถึงปฏิกรณ์ต่อชั่วโมง ค่าพีเอช 10 พบว่าถ้าเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายมากเกินไปจะทำให้เกิด Spontaneous nucleation ซึ่งจะให้น้ำออกขุ่น มีของแข็งแขวนลอยมาก และประสิทธิภาพการกำจัดต่ำ ดังนั้นเมื่อน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงๆ เข้ามาจึงต้องทำการเจือจางก่อน ประกอบกับมีของแข็งแขวนลอยซึ่งเกิดจากการขจัดสีของผลิตภัณฑ์เม็ดทราย จึงต้องมีถังกรองแบบ Dual media มาทำการกรองตามหลัง (Post filtration) และใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาผสมกับกรดเพื่อทำการล้างย้อน จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นละลาย และสามารถนำน้ำล้างย้อนนี้กลับไปบำบัดใหม่ จะช่วยให้ไม่มีของเสียที่ต้องกำจัดทิ้ง คงมีเพียงผลิตภัณฑ์เม็ดทรายเท่านั้น ผลการทดลองสามารถลดนิเกิลในน้ำออกได้ต่ำกว่า 0.5 ppm. เกิดผลิตภัณฑ์เม็ดทรายขนาด 1 มม. ซึ่งประกอบไปด้วย nickle hydroxi-carbonate ซึ่งสามารถละลายในกรดเกลือ (HCl) ให้ได้สารละลายนิเกิลคลอไรด์บริสุทธิ์ ส่วนทรายสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในถังปฏิกรณ์ได้

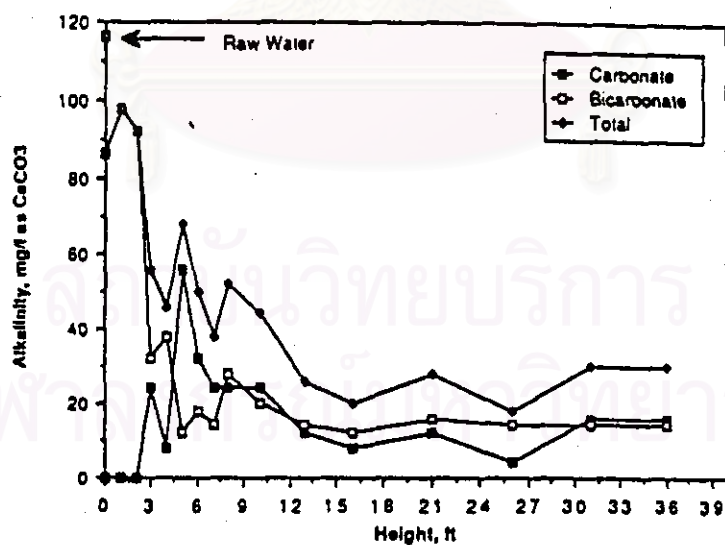
C. van der Veen และ Graveland (1988) ศึกษาการกำจัดความกระด้างโดยกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดในโรงงานผลิตน้ำประปาเนเธอร์แลนด์ พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของทรายในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด จะทำให้การตกผลึกของแคลเซียมดีซีเทรตทำให้ความกระด้างในน้ำลดลง ดังรูปที่ 2.11 โดยที่ความกระด้างจะลดลงต่ำสุดที่ความสูง 2.5 ม.

Janda and Benesova (1988) ศึกษาการกำจัดแมงกานีสออกไซด์จากน้ำเสีย โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด การทดลองทำในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. ใช้ทรายขนาด 0.4-0.63 มม. ความสูงเบดนิ่ง 1.1 ม. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 47.8 ม./ชม. โดยใช้โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เป็นตัวออกซิไดซ์ Mn^{2+} เป็น Mn^{4+} ผลการศึกษาพบว่าได้ประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีสประมาณร้อยละ 75-80 และการทดลองใน pilot plant ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 95-100 นอกจากนี้ยังพบว่าแมงกานีสไม่เพียงแต่ถูกออกซิไดซ์ แต่จะเกิดการตกผลึกแมงกานีสออกไซด์บนเม็ดทรายด้วย



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างเทียบกับความสูงชั้นทราย
(C. van der Veen และ Graveland, 1988)

Harms และ Robinson (1993) ศึกษาการกำจัดความกระด้างโดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด ผลการทดลองได้ค่าความเป็นด่างจะลดลง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ค่าความเป็นด่างที่ความสูงต่างๆ ของถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด
(Harms และ Robinson, 1993)

อัญชลี เอนด์สัมฤทธิ์ (2535) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด ทำการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นตะกั่ว 200, 100, 50, 10 และ 5 มก./ล. พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ พีเอช และความสูงของชั้นทราย สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชคือ โซดาแอช ทำการศึกษาที่พีเอช 7.5-9.5 และความสูงของชั้นทราย 1.0-2.0 ม. โดยใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85-1.0 มม. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นเท่ากับ 66 ม./ชม. จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วคือ ที่พีเอช 9.5 และความสูงชั้นทราย 2.0 ม. ที่ความเข้มข้นตะกั่ว 200, 100 และ 50 มก./ล. ให้ประสิทธิภาพการกำจัดในรูปตะกั่วทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 44.50, 58.89 และ 67.96 และในรูปตะกั่วละลายให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นคือร้อยละ 99.64, 99.11 และ 98.88 ตามลำดับ ส่วนตะกั่วที่ความเข้มข้น 5 และ 10 มก./ล. พบว่าสภาวะเหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดมากที่สุดคือ พีเอช ส่วนความสูงของชั้นทรายมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดน้อยมาก สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 5 และ 10 มก./ล. คือ พีเอช 9.5 และความสูงชั้นทราย 2.0 ม. โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดในรูปตะกั่วทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 90.40 และ 90.05 และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดในรูปตะกั่วละลายเท่ากับร้อยละ 98.09 และ 98.17

อัญชลี จันทวรรณกุล (2535) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดและสารที่ทำให้เกิดตะกอนโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้คอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 3.45 ม. บรรจุด้วยทรายขนาด 0.85-1.0 มม. ความสูงเบด 1.0, 1.5 และ 2.0 ม. ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมค่าพีเอช 8.5, 9.0 และ 9.5 ทดลองที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 ค่า คือ 5, 10, 50, 100 และ 200 มก./ล. โดยใช้ค่าความเร็วไหลขึ้นเท่ากับ 66 ม./ชม. จากการศึกษาพบว่าพีเอชและความสูงของชั้นทรายเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้กำจัดโครเมียม โดยมีพีเอชที่เหมาะสมคือ 9.0 และความสูงของเบดที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดคือ ที่ความสูง 2.0 ม. ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้ร้อยละ 45-60 ยกเว้นที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล. เนื่องจากจะมีความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอต่อการตกผลึก โดยกลไกการกำจัดเกิดจากการถ่ายเทมวลสารและการตกผลึกบนผิวเม็ดทราย แต่การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดตะกอนเบาอัดตัวไม่แน่นบนผิวเม็ดทราย ซึ่งจะเป็นผลให้มีของแข็งแขวนลอยมากในน้ำที่ผ่านการบำบัด

2.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

ข้อดีของกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด (J.C. van Dijk และ Wilms, 1991)

1. ระยะเวลาพักในถังปฏิกรณ์น้อย เนื่องจากความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคตัวกลางสูง ทำให้ความเร็วไหลขึ้นของน้ำเสียสูง (50-120 ม./ชม.) เป็นผลให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดเล็ก
2. พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคชักนำในถังปฏิกรณ์สูง เนื่องจากใช้อนุภาคตัวกลางที่มีขนาดเล็ก (0.2-1.2 มม.) เป็นตัวชักนำให้เกิดการตกผลึก ทำให้ประสิทธิภาพในการตกผลึกสูงเนื่องจากพื้นที่ผิวในการตกผลึกมีมากและเกิดการตกผลึกเป็นไปอย่างรวดเร็ว
3. ไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการตกตะกอน และกระบวนการกำจัดสลัดจ์ เนื่องจากไม่มีสลัดจ์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบเกิดขึ้น จะมีแต่ผลึกที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Water free) เกิดบนเม็ดทราย
4. ผลึกที่เกิดบนอนุภาคตัวกลางค่อนข้างบริสุทธิ์ และเป็นผลึกที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องหรือนำไปใช้ในการก่อสร้างได้

ข้อเสียของกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด (Harm และ Robinson, 1993)

1. อาจมีของแข็งแขวนลอยหลุดออกมาที่กระแสส่งออก ทำให้น้ำออกมีความขุ่นสูงซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้การกรองทรายตามหลังถังฟลูอิดไดซ์เบด (Post filtration) และผลึกในน้ำทิ้งจากการล้างย้อน สามารถนำไปละลายในกรดและนำไปกำจัดในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดใหม่ได้
2. การออกแบบหัวกระจายน้ำ การกวน และการเติมสารเคมี ถ้าทำไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการอิมตัวยิ่งยวดมากเกินไป ส่งผลให้เกิด Spontaneous nucleation คือการเกิดผลึกในน้ำแทนที่จะเกิดผลึกบนเม็ดทราย
3. ไม่สามารถรองรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงๆได้ เนื่องจากจะเกิดผลึกเม็ดเล็กๆ ในน้ำ แต่สามารถแก้ไขโดยนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว มาหมุนเวียนโดยการทำเจือจางก่อนเข้าถังปฏิกรณ์