

## บทที่ 2

### ทฤษฎี แนวความคิด และการทดลองที่ผ่านมา

#### 2.1 ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอน

ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอนประกอบด้วยทฤษฎีของกระบวนการโคแอกูเลชันและทฤษฎีของการสมานตะกอน (หรือ flocculation)

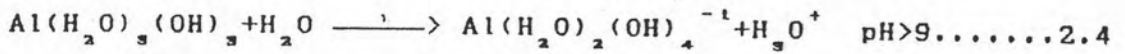
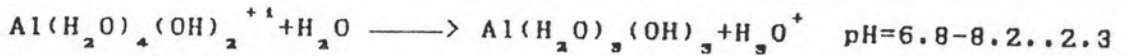
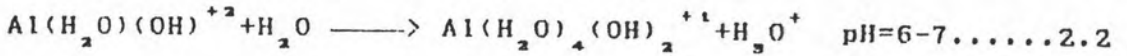
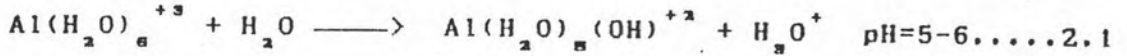
##### 2.1.1 ทฤษฎีกระบวนการโคแอกูเลชัน

การกระจายสารโคแอกูแลนต์ในน้ำให้ทั่วถึง เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ กลไกทางเคมีที่ใช้ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือพีเอช ชนิดและปริมาณของโคแอกูแลนต์ ตลอดจนระดับความปั่นป่วนของน้ำ ปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างแนบแน่นในกลไกทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น โคแอกูแลนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ สารส้ม ดังนั้นในที่นี้จึงจะกล่าวถึงกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกูเลชันโดยใช้สารส้มเท่านั้น

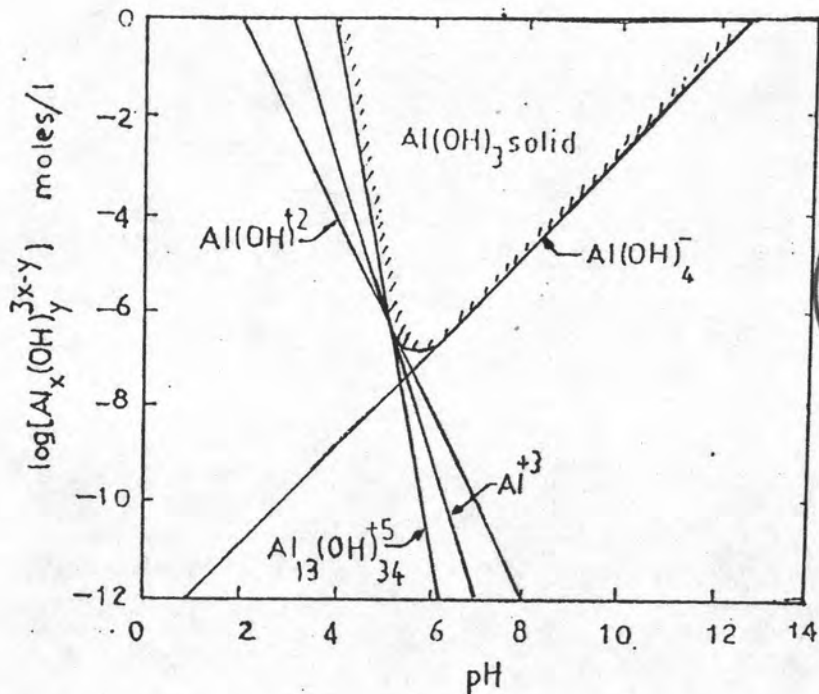
##### 2.1.1.1 บทบาทของสารส้มในน้ำ

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ สารส้มจะแตกตัวเป็นไอออนชนิดประจุบวกและประจุลบ ไอออนลบจะอยู่เป็นอิสระ ส่วนไอออนบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้มีโมเลกุลของน้ำ 6 ตัว เกาะอยู่โดยรอบไอออนบวกซึ่งเขียนเป็นสูตรเคมีได้เป็น  $Al(H_2O)_6^{+3}$  มีชื่อเรียกว่า aquometal ion ไอออนนี้มีคุณสมบัติเป็นกรด ดังนั้นจึงไม่คงรูปแต่จะจ่ายโปรตอน ( $H^+$ ) ให้กับน้ำในทันที ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ

เชิงซ้อนชนิด monomeric hydroxo complex ต่างๆ ดังสมการ 2.1-2.4 (Stum and Morgan, 1962)



ตามความหมายของสมการ 2.1 - 2.4 ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นอลูมิเนียม (Al) และพีเอช ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ดังในรูปที่ 2.1 (O' melia, 1972)



รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมในสภาวะสมดุลที่พีเอชต่าง ๆ (O' melia, 1972)

จากรูปที่ 2.1 ขอบเขตของพื้นที่ที่เป็นตะกอน  $Al(OH)_3$  จะแสดงความเข้มข้นสูงสุดของอลูมิเนียมที่จะละลายได้ที่พีเอชต่าง ๆ อลูมิเนียมซึ่งมีความเข้มข้นเกินขอบเขตนี้จะตกตะกอนเป็น  $Al(OH)_3$  กราฟเส้นตรงของสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ แสดงความเข้มข้นสูงสุดที่จะมีได้ของสารประกอบเชิงซ้อนนั้นๆ ที่พีเอชต่างๆซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าหรือเท่ากับจุดอิ่มตัวที่พีเอชนั้นๆถ้าความเข้มข้นของอลูมิเนียมต่ำกว่าจุดอิ่มตัวสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ จะเกิดได้น้อยกว่าค่าที่กราฟแสดง

#### 2.1.1.2 กลไกโคเอกูเลชันของสารส้ม

สารส้มทำให้เกิดโคเอกูเลชันโดยกลไกต่าง ๆ ดังนี้

##### 2.1.1.2.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย

กลไกนี้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้าม (ในที่นี้คือไอออนของ  $Al$  ซึ่งมีประจุบวก) กับประจุไฟฟ้าของอนุภาค (มักจะมีประจุลบ) ทำให้ไอออนประจุบวกที่กระจายอยู่รอบๆอนุภาคไปอ้อยู่ใกล้ผิวของอนุภาคมากขึ้น ชั้นไอออนที่กระจายอยู่รอบอนุภาคจึงมีความหนาลดลงอำนาจประจุลบของอนุภาค ซึ่งเป็นต้นเหตุของแรงผลักดันระหว่างอนุภาคจึงลดลงด้วย

กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย มักเกิดได้ดีกับไอออนที่มีประจุมากเช่น  $Al(H_2O)_6^{3+}$  และ polymeric hydroxo complex ต่างๆ เนื่องจากไอออนที่มีประจุมากเหล่านี้มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบอยู่มาก จึงไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ แต่ก็มีผลลดความหนาชั้นกระจายได้มากกว่าไอออนที่มีประจุน้อย (มันสัน ตัณฑลเวศม์, 2526; O' melia, 1972; Stumm and O' melia, 1968)

ในกรณีที่มีพีเอชสูงๆ ไอออนของอลูมิเนียมส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบซึ่งเหมือนประจุของอนุภาคแขวนลอย การลดอิทธิพลของประจุอนุภาคหรือลดความหนาของชั้นกระจายจึงไม่เกิดขึ้น นอกจากนี้ในกรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงมาก ๆ อนุภาคจะถูกทำลายเสถียรภาพโดยกลไกความหนาของชั้นกระจายได้ง่ายขึ้น (Bratby, 1980) ทั้งนี้เนื่องจากไอออนที่มีประจุมากซึ่งเหมาะกับกลไกนี้เกิดใน

ช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพอนุภาคเบื้องต้นที่ได้จากการทำลายเสถียรภาพนี้อยู่ใกล้กันมากพอที่จะชนกัน เกิดเป็นอนุภาคตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นได้ง่ายก่อนที่ไอออนและผลึกจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสช่วงต่อมาจะทำให้เกิดกลไกแบบอื่น

#### 2.1.1.2.2 กลไกแบบคอลลอยด์และสะเทินทางไฟฟ้า

สารส้มสร้างกลไกแบบคอลลอยด์และสะเทินทางไฟฟ้า โดยการแตกตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประจุชนิดต่างๆ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้งนี้ สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้สามารถคอลลอยด์ไปบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ (มันลีน ตันทูลเวคม์, 2526; Bratby, 1980; Sanks, 1978) เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนเป็นชนิดประจุบวกก็จะลดประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งก็จะเป็นการลดเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ลงด้วย เมื่อแรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงจนน้อยกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์จะเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น จนกลายเป็นจุฬาลีอกเล็ก ๆ

ตะกอนที่เกิดจากกลไกโคเอกูเลชัน ลักษณะนี้จะสามารถอัดตัวได้แน่น และทำให้แห้ง หรือดึงเอาน้ำออกจากตะกอนได้ง่าย (มันลีน ตันทูลเวคม์, 2520) ซึ่งจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนต่อไป แต่การควบคุมระบบให้ทำงานได้ดีนั้นยากมากเพราะกลไกชนิดนี้จะให้ผลดีในช่วงพีเอชแคบๆ (O'melia, 1972) รวมทั้งมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่พอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนต่ำไปโคเอกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะคอลลอยด์ไปที่ผิวของอนุภาคมากจนทำให้อนุภาคเป็นประจุบวก ซึ่งก็จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพใหม่ (restabilization) เนื่องจาก ประจุบวกนั้นกลับขึ้นมาอีก อย่างไรก็ตามกลไกนี้จะต้องเกิดขึ้น และเสร็จสิ้นภายในเวลา  $10^{-4}$  ถึง 1 วินาที สารประกอบเชิงซ้อนต้องคอลลอยด์อนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลาดังกล่าว มิฉะนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก  $Al(OH)_3$  ดังในสมการที่ 2.3 ทำให้เกิดการขจัดความขุ่นด้วยกลไกแบบกวาดซึ่งจะมีการจับตัวกันระหว่างตะกอนฟล็อก  $Al(OH)_3$  และอนุภาคคอลลอยด์ (มันลีน ตันทูลเวคม์, 2526) มากกว่าที่จะเป็นแบบคอลลอยด์และสะเทิน

ทางไฟฟ้า ดังนั้นการกระจายสารโคเอกูแลนที่ในน้ำให้ทั่วถึงจึงเป็นสิ่งสำคัญมากดังได้กล่าวมาแล้ว

#### 2.1.1.2.3 กลไกแบบกวาด

กลไกนี้เกิดจากการเติมสารส้ม จนความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าจุดอิ่มตัวทำให้เกิดฟล็อกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (มันลิน ตัทเทิลเวคม์, 2526; Camp, 1985; Steven and Jame, 1988) ซึ่งฟล็อกนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ไม่แสดงอิทธิพลของประจุไฟฟ้า และเมื่อกวนให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกนี้แล้ว เกิดการสัมผัสก็จะจับกันเป็นจุลฟล็อก (microfloc) สำหรับน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อยๆ โอกาสที่อนุภาคจะสัมผัสกันก็น้อยด้วย

#### 2.1.1.2.4 กลไกโคเอกูแลนแบบร่วม

กลไกโคเอกูแลนแบบร่วม เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกัน ระหว่างกลไกแบบคูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้า กับกลไกแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัดกล่าวคือในขณะที่เกิดกลไกโคเอกูแลนแบบกวาดซึ่งเป็นการทำงานของฟล็อกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์นั้น ไม่ได้หมายความว่าในน้ำที่เกิดโคเอกูแลนจะไม่มีสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ หรือสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆไม่ได้ทำงานเพียงแต่ว่าในสภาวะนั้นสารประกอบเชิงซ้อนสร้างกลไกแบบคูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับการทำงานของฟล็อกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

ดังนั้น ในบางสภาวะเมื่อโคเอกูแลนมีกลไกทั้งสองชนิดประกอบกันโดยที่ไม่มีกลไกชนิดหนึ่งชนิดใดมีอิทธิพลสูงกว่ากลไกอีกชนิดหนึ่ง จนกลไกชนิดหนึ่งไม่มีนัยสำคัญแล้ว จึงจัดว่าเป็นกลไกโคเอกูแลนแบบร่วม



### 2.1.2 ทฤษฎีของการสมานตะกอน

กระบวนการฟล็อกคูเลชัน หรือสมานตะกอนเป็นการทำให้อนุภาค คอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะเสถียรแล้วเกิดชนกัน และรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชัน อาจจำแนกออกเป็นสามประเภท (O'melia, 1972) ได้แก่ การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion), การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential settling) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภท มีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.1 การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์สามารถทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว และชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) และเกิดการชนหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคขึ้น การสมานกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคภายหลังการสัมผัสทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น

การสมานตะกอนในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติก (perikinetic flocculation) อัตราการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติก ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คืออุณหภูมิ และขึ้นอยู่กับจำนวนของอนุภาค การสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูง เมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน และจะลดลงเหลือน้อยมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O'melia, 1972)

#### 2.1.2.2 การจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน

การสมานตะกอนโดยปรากฏการณ์นี้ เกิดขึ้นในน้ำที่อยู่ ในสภาวะสถิตย์หรือปราศจากความปั่นป่วน (static or non-turbulent fluid)

โดยอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า จะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์และการชน รวมทั้งสมานกันขึ้นในระหว่างการจมตัว การสมานตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันดังกล่าวมานี้ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถังทำน้ำใสแบบชั้นสลัดจ์ (sludge blanket clarifier) และในถังตกตะกอนแนวตั้งทั่วไป

### 2.1.2.3 การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อมีการกวนเกิดขึ้นในเนื้อของเหลว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำมวลหนึ่งๆ จะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับมวลน้ำนั้นๆ ก็จะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย ทำให้เกิดโอกาสการชนและสมานตัวกันในที่สุญญากาศ การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่าการสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนติก (orthokinetic flocculation) เมื่อเปรียบเทียบอัตราสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดอนุภาค ปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติกมาก เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O'melia, 1972)

โดยทั่วไปอนุภาคที่ไม่เสถียรภาพ และถูกนำมาส่งมาอยู่ในขั้นตอนการสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน ดังนั้นกลไกหลักในขั้นสมานตะกอนของกระบวนการโคเอกูเลชันจึงได้แก่กลไกแบบออร์โธไคเนติก (O'melia, 1972)

ในทางปฏิบัติสำหรับระบบบำบัดน้ำทั่วไป ปัจจัยที่ได้รับการนำมาใช้ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของขั้นสมานตะกอนคือ ความเร็วเกรเดียนท์  $G$  (velocity gradient) และเวลากักน้ำ  $t$  (hydraulic residence time) พารามิเตอร์  $G$  และ  $t$  มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของการสมานตะกอน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของตะกอน กล่าวคือ ตะกอนจะมีขนาดจำกัดที่ค่า  $G$  หนึ่ง ๆ (Gregory, 1977; Kawamura, 1973; Kawamura, 1976) ขนาดตะกอนจะแปรตาม  $t$  ในขณะที่แปรกลับกับค่า  $G$  (Andrew-

Villogas and Lottorman, 1974 ; Camp, 1995; Kawamura, 1976; Mhaisalkar et al., 1991) อย่างไรก็ตาม แม้ว่า  $G$  สูง ๆ จะทำให้ขนาดตะกอนเล็ก แต่ตะกอนที่ได้จะมีความหนาแน่นมากกว่าตะกอนใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า  $G$  ที่ต่ำกว่า (วริษฐ มงคลศรี, 2526; wamura, 1976; Lin, 1982; Tambo and Watanabe, 1978)

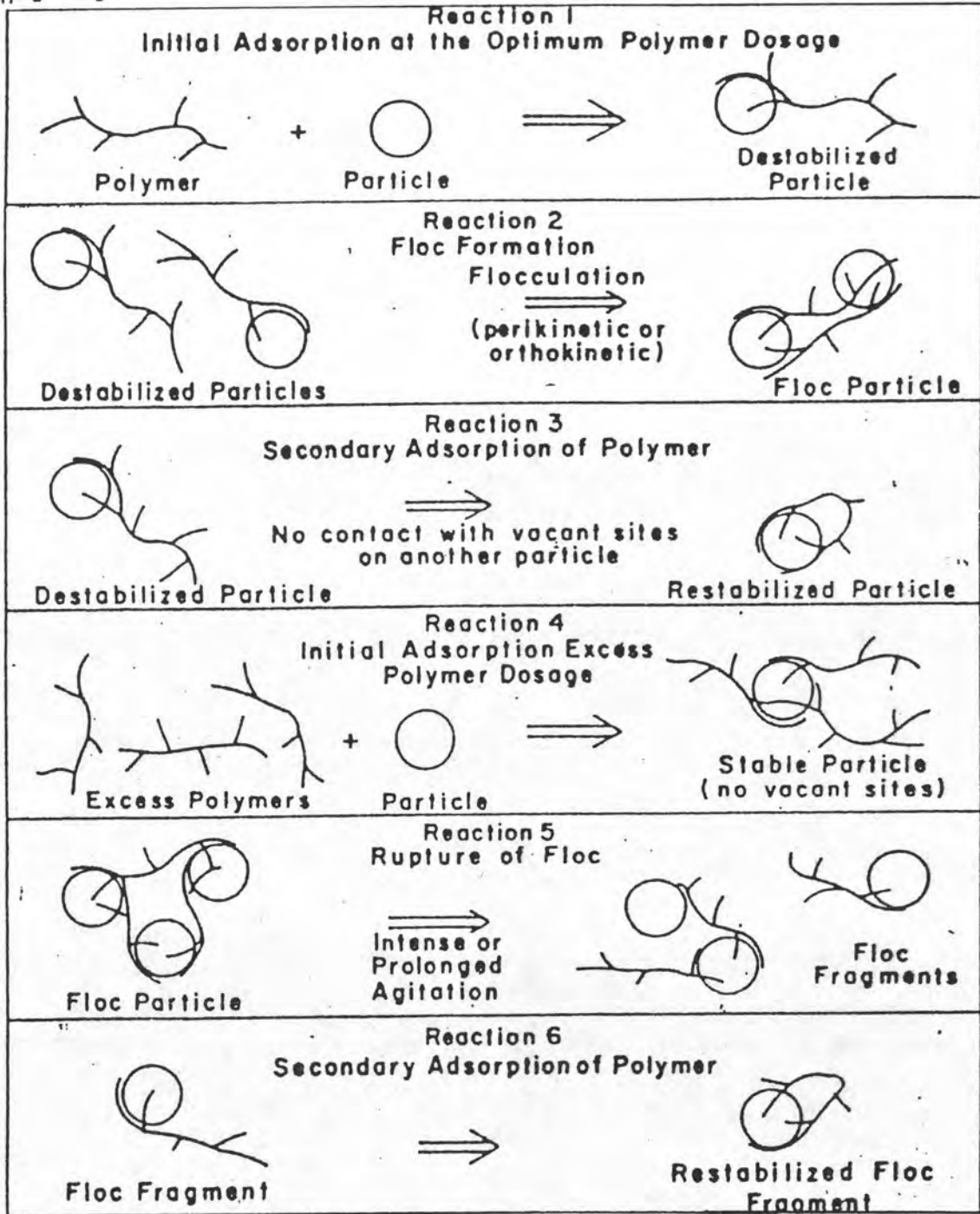
### 2.1.3 การใช้โพลีเมอร์เป็นโคเอกูแลนท์เอ็ด

หลังจากการเติมโคเอกูแลนท์ เช่น สารลัม ลงในน้ำดิบแล้วจะมีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคจนได้อนุภาคเบื้องต้นที่พร้อมจะรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ การเติมสารโพลีเมอร์หลังจากเกิดอนุภาคเบื้องต้นจะช่วยให้การสมานตะกอนเกิดได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของโพลีเมอร์จะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นเหล่านี้ให้รวมตัวกันได้รวดเร็ว และเกิดเป็นอนุภาคตะกอนที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Gregory, 1979 ; Mayhew and Raman, 1984 ; Schwayer, 1981) และเนื่องจากการมีได้มุ่งหวังที่จะใช้โพลีเมอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นสารโคเอกูแลนท์โดยตรงจึงไม่นิยมใช้โพลีเมอร์ประจุบวก ดังนั้นโคเอกูแลนท์เอ็ดที่ใช้หลังจากการเติมสารลัมจึงมักเป็นพวกโพลีเมอร์ไม่มีประจุหรือโพลีเมอร์ประจุลบ เพราะโพลีเมอร์เหล่านี้มีโมเลกุลใหญ่ เหมาะที่จะใช้เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้น เพื่อให้ได้ฟล็อกที่แข็งแรง มีน้ำหนักมากแยกออกจากน้ำได้ดี อย่างไรก็ตามพบว่า โพลีเมอร์ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของฟล็อก (Lagavanker and Gemmell, 1968; Tambo and Watanabe, 1978)

กลไกการทำงานของโพลีเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดล ที่เรียกว่า Polymer Bridging (รูปที่ 2.2) ในรูปปฏิกิริยาที่ 1 แสดงถึงวิธีการเกาะจับของโมเลกุลโพลีเมอร์กับอนุภาค ซึ่งในกรณีของอนุภาคเบื้องต้นที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การเกาะของโมเลกุลโพลีเมอร์จะทำให้เกิดฟล็อก ที่มีน้ำหนักมากขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีปลายอิสระที่เหลือของโมเลกุลโพลีเมอร์ไปเกาะจับกับอนุภาคอื่นๆ ดังในรูปปฏิกิริยาที่ 2 ปฏิกิริยาที่เราต้องการ คือ ในรูปที่ 1 และ 2 นี้ สามารถทำให้เกิดได้สมบูรณ์ จะต้องประกอบด้วยความพอดีของปัจจัย 3 ประการ คือ ปริมาณของโพลีเมอร์ที่ใช้ ค่าความเร็วเกรเดียนท์ และเวลากักน้ำในถังปฏิกิริยา ความไม่พอ



ติของปัจจัยทั้ง 3 นี้ เช่นถ้าใช้โพลีเมอร์ปริมาณมากเกินไป จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพคืนมาได้ นอกจากนั้นการกวนผสมที่มีความปั่นป่วนสูง หรือใช้เวลานานมากเกินไป อาจทำให้ ฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วนๆ และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์ เกาะจับกับอนุภาคเดิม เสถียรภาพของอนุภาคจึงกลับคืนมาได้ ดังแสดงในรูปปฏิกิริยาที่ 3 - 6



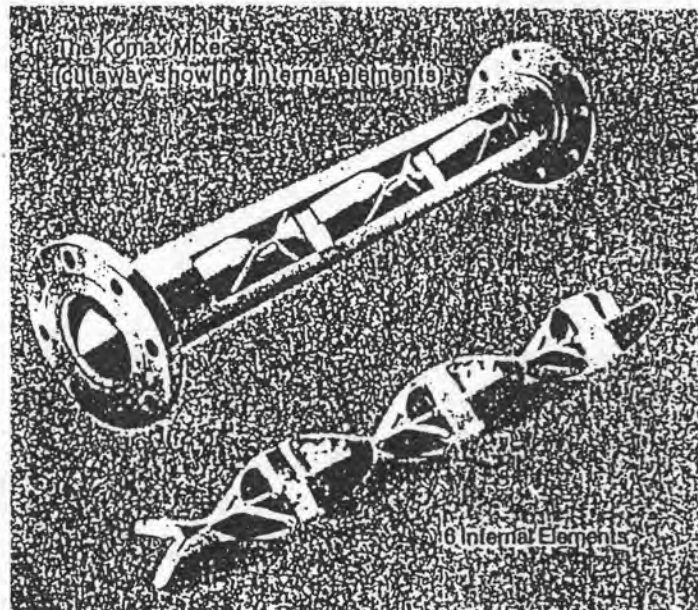
รูปที่ 2.2 Polymer Bridging Model



## 2.2 การกวนเร็วในท่อ

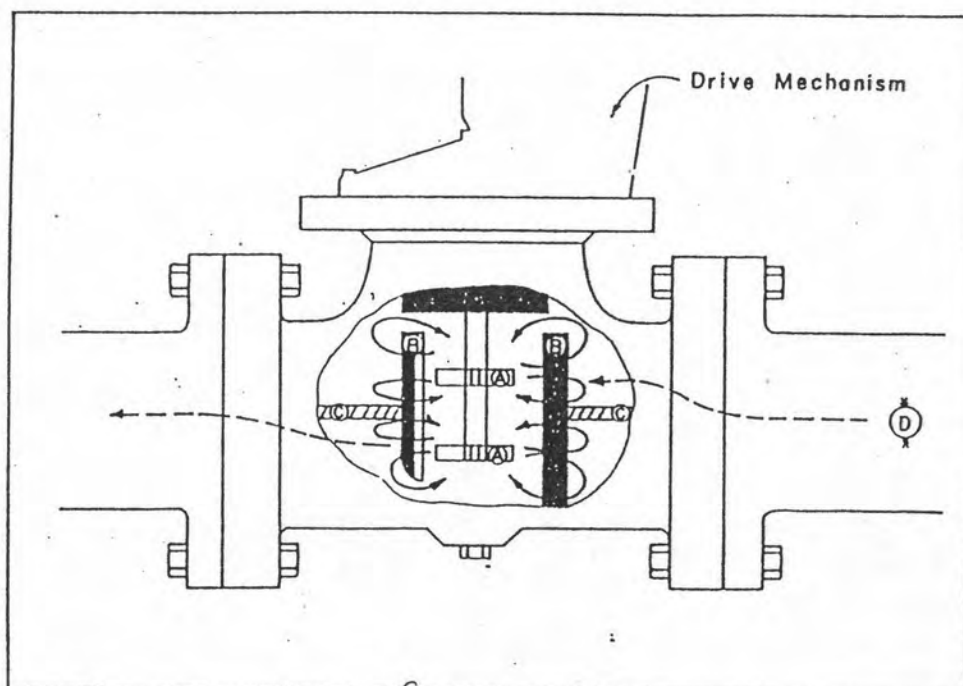
อุปกรณ์ที่ใช้กันทั่วไปในการกวนเร็ว คือ ใช้ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (completely stirred tank reactor) ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือกลสำหรับสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำ เช่น ใบพัด (propeller) ใบพาย (paddle) ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้ คือ สามารถแปรค่าพารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็ว เช่น ความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) ได้โดยปรับความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือกล แต่อย่างไรก็ตามการกวนเร็วแบบนี้ก็มีข้อด้อยที่สำคัญ เช่น ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ และต้องติดตั้งเครื่องมือกล มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล รวมทั้งต้องมีผู้ชำนาญพิเศษควบคุมเพื่อให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุด อุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งที่ได้มีการพัฒนาเพื่อการกวนเร็วคือ ใช้วิธีทางชลศาสตร์ สร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำแทนเครื่องมือกล วิธีการอย่างหนึ่งทางชลศาสตร์ ได้แก่ การกวนเร็วในท่อ การกวนเร็วโดยไม่ใช้เครื่องมือกลเช่นนี้ทำให้สามารถลดค่าก่อสร้างและบำรุงรักษาลงได้ในระดับหนึ่ง

อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ เรียกว่า Static Mixer ซึ่งทำเป็นเกลียวติดอยู่ภายในท่อ ทำให้น้ำที่ไหลผ่านมีความปั่นป่วนได้เอง (ดูภาพที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์กวนเร็วแบบ Static Mixer ซึ่งใช้กวนน้ำในท่อได้โดยตรง

หรือใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า In-Line Blender ซึ่งเป็นเครื่องชนิดแบบที่มีความเร็วสูง (ดูภาพที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์กวนเร็วแบบเครื่องบด (In-Line Blender)

### 2.3 อุปกรณ์ในการสมานตะกอน

การกวนช้าเพื่อการสมานตะกอน ทำให้สร้างโอกาสสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ที่สูญเสียเสถียรภาพ (destabilized colloid) เพื่อให้รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า ฟล็อกคเลชั่น (มันลีน ตันทูลเวคม์, 2526) ซึ่งมีวิธีการอยู่ 2 ประเภท คือ ประเภทแผ่นกั้นน้ำ (ไม่ใช่เครื่องจักร) และประเภทใบพัด

### 2.3.1 การสมานตะกอนโดยใช้แผ่นกั้นน้ำ

การบังคับให้น้ำไหลววน และคดเคี้ยวไปมาด้วยแผ่นกั้นก็สามารถสร้างความปั่นป่วน (G) ให้กับน้ำพอเพียงที่จะเกิดฟล็อกคูล์ขึ้นได้ จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการกวนน้ำโดยใช้แผ่นกั้นน้ำ 2 แบบ แบบแรกเป็นการบังคับให้น้ำไหลววนในแนวระนาบ ส่วนแบบหลังบังคับให้น้ำไหลวนในแนวตั้ง ทำให้เกิดการรวมตัวของคอลลอยด์จนกลายเป็นฟล็อก ความเร็วในการไหลต้องไม่ต่ำเกินไปจนมีการตกตะกอนเกิดขึ้น

### 2.3.2 การสมานตะกอนโดยใช้ใบพัด

ปัจจัยที่ควบคุมการทำงานของชั้นสมานตะกอน คือ ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และเวลากักน้ำ (t) การใช้ใบพัดจะสามารถทำให้ควบคุมค่า G ได้ตามต้องการ ใบพัดที่ใช้มีเป็นใบพัด 3 แบบ คือแบบใบพาย (paddle) แบบเทอร์ไบน์ (turbine) และแบบใบเรือ (propeller) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากสมการของแคมป์ และสไตน์

$$G = (P/\mu V)^{0.5}$$

$$P = 0.5 C_D \rho A v^3$$

โดยที่

$$P = \text{กำลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำ, นิวตัน-ม./วินาที}$$

$$C_D = \text{สพส.ของความหน่วง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 สำหรับใบพัดแบน (paddle)}$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของน้ำ, กก./ม}^3$$

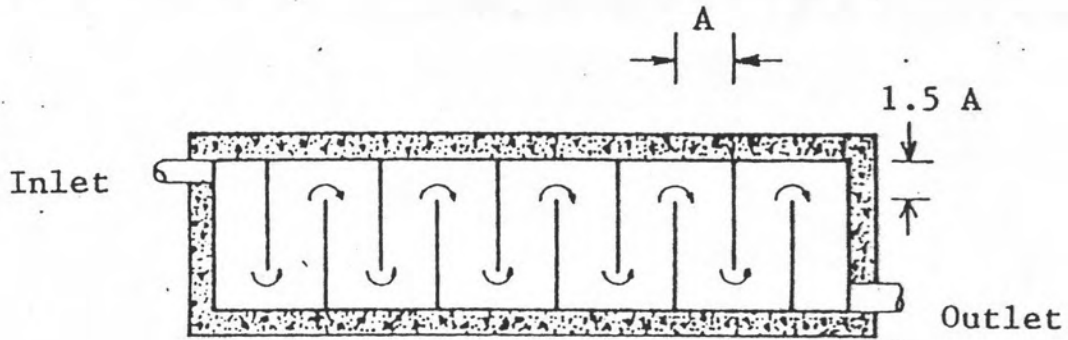
$$A = \text{พื้นที่ของใบพัด, ม}^2$$

$$v = \text{ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัด}$$

$$(0.75 \times \text{ความเร็วขอบใบพัด})$$

$$\text{ค่าคงที่ } \mu = 0.89 \times 10^{-3} \text{ นิวตัน-วินาที/ม}^2$$

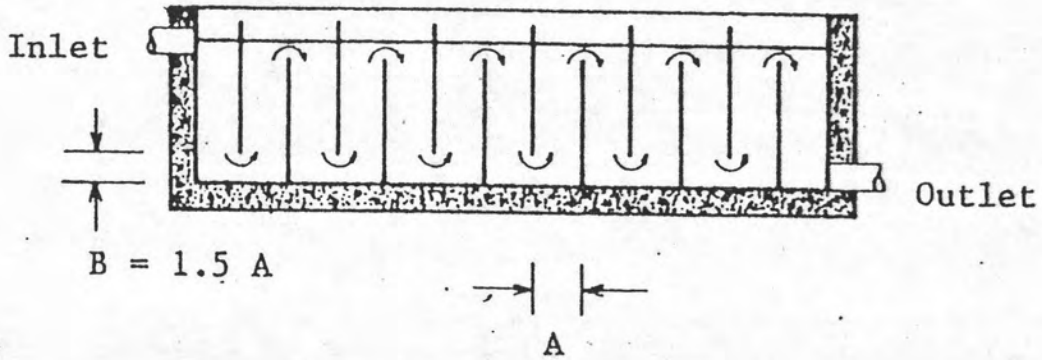
$$\rho = 998 \text{ กก./ม}^3$$



A ต้องไม่น้อยกว่า 0.45 เมตร ความลึกของน้ำ  
 ไม่น้อยกว่า 0.9 เมตร

รูปแปลน

ก. แบบไหลในแนวระนาบ

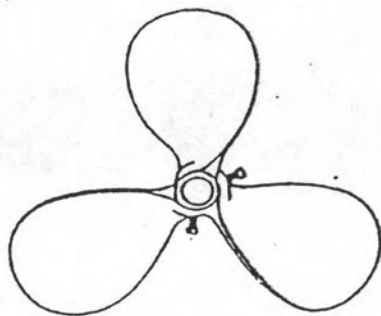


รูปตัด

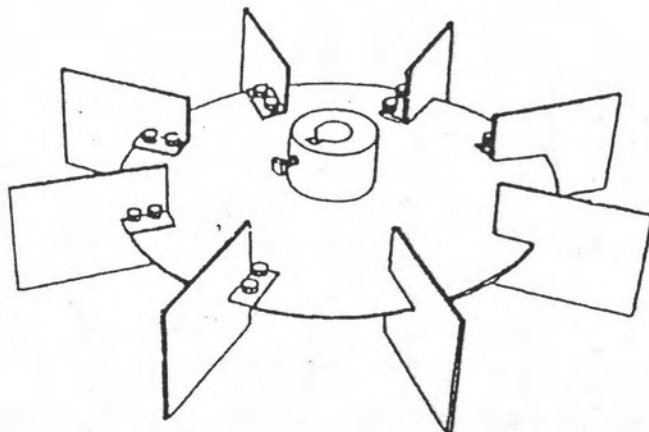
ข. แบบไหลขึ้นบน-ลงล่าง

รูปที่ 2.5 แสดงถึงกวนช้าแบบใช้แผ่นกั้นน้ำ 2 ประเภท

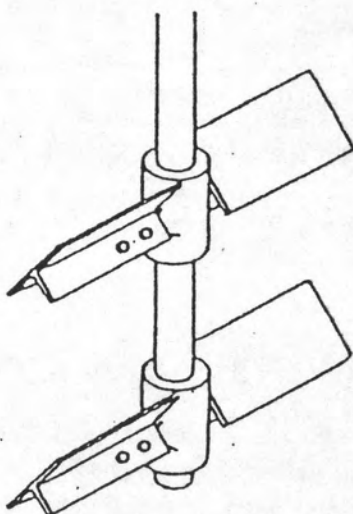




(ก)



(ข)

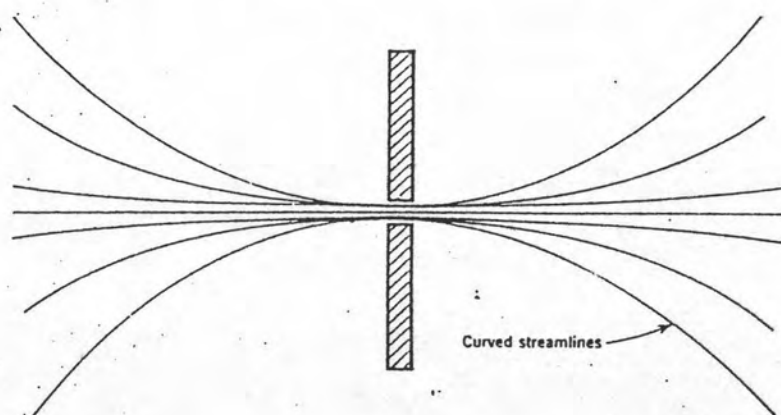


(ค)

รูปที่ 2.6 แสดงใบพัดแบบต่าง ๆ

ใบพัดรูปร่างต่างๆนี้ จะให้ผลในการสมานตะกอนต่างกัน(มันสิ้น ต้นทุลเวศม์, 2526)

Drobny (1963) ได้ทำการทดลองใช้ใบพัดรูปร่างต่างๆ เพื่อช่วยในการสมานตะกอน และพบว่าใบพัดที่เจาะรูเล็ก ๆ ที่ผิวจะให้ผลดีกว่ารูใหญ่ๆ และจำนวนรูที่มากกว่า จะให้ผลดีกว่าจำนวนน้อย ซึ่งรูที่อยู่บนผิวใบพัดเหล่านี้ เมื่อเวลาทวนน้ำ จะทำให้เกิด ความปั่นป่วนของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มค่า  $G$  ของระบบ



รูปที่ 2.7 แสดงของเหลวเมื่อไหลผ่านรูใบพัด

#### 2.4 การศึกษาที่ผ่านมา

ทฤษฎีการรวมตะกอนได้เริ่มศึกษาโดย Von Smoluchowski ในปี ค.ศ. 1919 และได้รับการดัดแปลงเพิ่มเติมโดย Camp และ Stein ในปี ค.ศ. 1943 กล่าวว่า อัตราการสัมผัสระหว่างอนุภาคแขวนลอยขนาดต่างๆ กัน เมื่อนำมาผสมโดยการกวนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- ก. จำนวนของอนุภาคแต่ละขนาด
- ข. ขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค
- ค. ความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) ของของเหลวซึ่งมีอนุภาคแขวนลอยอยู่

ในปี ค.ศ. 1949 Tolman ได้ศึกษาองค์ประกอบของตะกอนสมาน (floc) พบว่า

- ก. การผสมด้วยเครื่องมือกล (mechanical mixing) จะให้ผลการผสมดีกว่าใช้คูววน (buffled channel)
- ข. ตะกอนสมานที่ได้จะไม่ดี ถ้าการผสมของสารเคมีไม่แผ่กระจายทั่วถึงกัน
- ค. มีปริมาณสารเคมีช่วยสมานตะกอนเพียงค่าเดียว ที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนดีที่สุด ตะกอนสมานที่ได้จากการใช้ปริมาณสารเคมีมาก หรือน้อยเกินไปจะตกตะกอนไม่ดี
- ง. ตะกอนสมานที่มีขนาดเล็ก แต่มีน้ำหนักต่อพื้นที่มากจะตกตะกอนเร็วกว่าตะกอนสมานขนาดใหญ่ แต่มีน้ำหนักต่อพื้นที่น้อย
- จ. ในการสมานตะกอน (flocculation) ถ้าทำให้เกิดกระแสวน (eddies) มากจะได้ผลดี ดังนั้นลักษณะของใบพัดจึงควรแหลมเรียวยาวจะได้ผลดีกว่าใบพัดกว้างแต่สั้น
- ฉ. การทดลองในแบบทดลอง เวลาเก็บกักที่ได้จะเท่ากับเวลาเก็บกักในของจริงคูณด้วยรากที่สองของอัตราส่วนของขนาด (scale ratio) ซึ่งอัตราส่วนของขนาดที่ควรนำมาใช้เท่ากับ 30
- ช. การลัดวงจรในถังสมานตะกอนสามารถวิเคราะห์ได้จาก dispersion index หรืออัตราส่วนของเวลาที่ 90 % ของการไหลผ่านเข้าถึงกับเวลาที่ 10 % แรกของการไหลออกจากถัง ค่าของ dispersion index จะไม่น้อยกว่า 1 สำหรับถังที่ออกแบบดีจะมีค่าระหว่าง 2 - 2.5

ในปี ค.ศ. 1955 Camp ได้วิเคราะห์การออกแบบระบบการกำจัดในหลายๆแบบ และพบว่า การสมานตะกอนจะได้ผลดี เมื่อความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) มีค่าระหว่าง 20-70 วินาที<sup>-1</sup> และผลคูณของระยะเวลากักในถัง ( $t_d$ ) เป็นวินาทีกับค่า  $G$  อยู่

ระหว่าง  $2 \times 10^4 - 2 \times 10^5$  และสรุปว่า  $Gt_u$  เป็นตัววัด (parameter) ที่มีประโยชน์สำหรับการออกแบบและควบคุมการทำงานของถังสมานตะกอน

ในปี ค.ศ. 1961 Riddick ได้กล่าวถึงการสมานตะกอนจะมี 3 ขั้นตอนได้แก่

1. การเกิดตะกอนสมานขนาดเล็ก (micro floc)
2. การเก็บอนุภาคคอลลอยด์
3. การสมานกันเป็นก้อนโต

การทำให้เกิดแต่ละขั้นตอนต้องมีภาวะดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ต้องทำให้ค่า Zeta Potential ต่ำเกือบเท่าศูนย์ ขั้นตอนที่ 2 ต้องทำให้เกิดการกวนมากที่สุดเพื่อที่จะให้เกิดการสัมผัสมากที่สุด แต่ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้ตะกอนแตก ขั้นตอนที่ 3 ต้องการเวลาในการกวนหลังจากขั้นตอนที่ 2 เป็นเวลา 7 - 10 นาที จะเกิดตะกอนสมานขนาดใหญ่และตกตะกอนเร็ว

ในปี ค.ศ. 1963 Drohny ได้ทดลองคุณสมบัติและลักษณะของใบพัด โดยพิจารณาปัจจัยดังนี้คือ

- ก. ความขรุขระ (roughness) ของผิวของใบพัด
- ข. ลักษณะของใบพัด
- ค. ความโค้ง (curvature) ของใบพัด
- ง. พื้นที่ของใบพัด
- จ. รูปร่างของใบพัด

จากการวิเคราะห์ตะกอนสมาน ซึ่งเกิดจากการผสมด้วยใบพัดเป็นเวลา 10 นาที และใช้พลังงานคงที่ พบว่า

- ก. ความขรุขระของใบพัดมีส่วนช่วยในการกวน
- ข. ใบพัดที่เจาะรูมีอิทธิพลต่อการสมานตะกอน และรูที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดตะกอนสมานที่ดีได้เร็ว
- ค. ความโค้งของใบพัด (R) มีผลต่อตะกอนสมาน และค่า  $1/R$  มีค่าน้อยจะให้ตะกอนสมานไม่ดีและอาจทำให้ตะกอนสมานแตก

- ง. ไบฟัดควรมีพื้นที่ประมาณ 25 - 33% ของพื้นที่หน้าตัดตามแนวตั้งของถัง
- จ. รูปร่างของไบฟัดที่ทำให้เกิดตะกอนสมานดีที่สุด อยู่ระหว่างไบฟัดแบบไบตั้งและไบฟัดแบบนอนหน้าแคบ แต่อย่างไรก็ตามไบฟัดแบบไบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะให้การสมานตะกอนที่เร็วที่สุด

ในปี ค.ศ.1972 Griffith และ William ได้ศึกษาและนำเอาข้อมูลจากการทดลอง Jar test ไปออกแบบระบบประปาที่ Phoenix Arizona เพื่อที่จะผลิตน้ำประปาให้ประหยัดและมีคุณภาพ จากการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- ก. การนำเอา Jar test เข้ามาใช้มีความสำคัญ ผลของการศึกษาแสดงว่าอาจกำหนดการเติมสารช่วยสมานตะกอนและระยะเวลาในการกวนเพื่อให้ได้คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- ข. น้ำที่ Phoenix ใช้เวลาในการกวนเร็วไม่เกิน 5 วินาที
- ค. การกำจัดความขุ่นจะดีที่สุดเมื่อใส่สารช่วยสมานตะกอนขณะกวนเร็ว ซึ่งจะทำให้สารกระจายอย่างสม่ำเสมอ
- ง. การกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นกับเวลาสมานตะกอนจนถึง 30 - 35 นาที แต่เมื่อเกิน 35 นาที การกำจัดความขุ่นจะคงที่
- จ. ค่าความเร็วเกรเดียนท์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำดิบ ถ้าใช้ความเร็วเกรเดียนท์ถูกต้องจะทำให้การกำจัดความขุ่นดีที่สุด

ในปี ค.ศ.1880 เริ่มมีการใช้ถัง Solid Contact Clarifier ที่รู้จักกันในนามของถัง Dortmund สร้างขึ้นโดย Mueller-Nahnsen มีลักษณะเป็นรูปกรวยหรือปิรามิดหงาย จัดให้น้ำไหลเข้าถังทางด้านล่าง

ในปี ค.ศ.1892 Archbutt และ Deelay ได้สร้างระบบ Accelerated Precipitation ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนผสม สารเคมีและส่วนตะกอน

ในปี ค.ศ.1983 Charles H. Spaulding ได้ปรับปรุงระบบ โดยรวมส่วนของการรวมตะกอน การสมานตะกอนและการตกตะกอนไว้ในถังเดียวกัน แล้วเรียกถังแบบนี้ว่า Precipitator



ประมาณปี ค.ศ. 1965 MILLER, D.G.; WEST, J.T. และ ROBINSON, M. ได้ศึกษาการทำงานของ Floc Blanket Clarifier การทดลองนี้ได้นำน้ำดิบจากแม่น้ำเทมส์ลုပ်ไปที่ถึงสูง เพื่อจ่ายลงมาได้ด้วยแรงดันน้ำคงที่ ผ่านอุปกรณ์กวนเร็วผสมสารล่อมกับน้ำดิบปริมาณสารล่อมหาจากการทำ Jar Test จากนั้นน้ำจากอุปกรณ์กวนเร็วจึงเข้าอุปกรณ์ทดลองที่ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 นิ้ว ยาว 14 ฟุต จำนวน 4 ชุด อุปกรณ์แต่ละชุดจะทำงานไปพร้อมๆ กัน โดยมีการแปรค่าตัวแปรที่ทำการศึกษา เพื่อลดผลกระทบจากความแปรผันของคุณภาพน้ำดิบในช่วงสั้นๆ

จากการทดลองได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาอิทธิพลของความเร็วน้ำไหลขึ้น โดยทำการทดลองที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 1.83-6.10 ม./ชม. ผลการทดลองสรุปได้ว่า การเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นจะทำให้ความขุ่นและปริมาณ AI ในน้ำออกจากถังเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการกำจัดสารเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นยังทำให้มีของแข็งแขวนลอยหลุดออกไปจากถังเพิ่มขึ้น (floc carry over) ซึ่งสรุปว่าเกิดจากความเร็วน้ำไหลขึ้นมากกว่า ความเร็วการตกตะกอนของส่วนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นในชั้นตะกอน และเกิดจากความปั่นป่วนในชั้นตะกอนมากขึ้น ทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กมีจำนวนมากขึ้น จากการศึกษาที่ยังแสดงให้เห็นว่า ขีดจำกัดของความเร็วน้ำไหลขึ้นขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำออกจากถังตกตะกอนซึ่งจะตกตะกอน ซึ่งจะไปเป็นภาระต่อการทำงานของเครื่องกรองมากกว่าความมีเสถียรภาพของชั้นตะกอน นอกจากนี้สภาพแวดล้อมทางเคมี ลักษณะน้ำดิบ flocculant aids ที่ใช้ยังมีผลต่อลักษณะของชั้นตะกอน ซึ่งจะส่งผลต่อถึงขีดจำกัด หรือ ความสามารถของถังตกตะกอนอีกด้วย

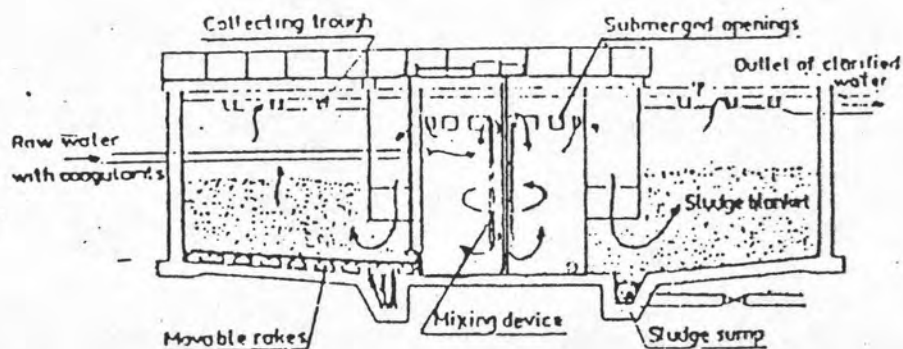
2. ศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของชั้นตะกอน โดยทำการทดลองที่ความหนาของชั้นตะกอน 1-2.7 ม. ผลการทดลองสรุปได้ว่าของแข็งแขวนลอยที่หลุดไปกับน้ำออกจากถัง ความขุ่น และ AI จะลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นตะกอน

3. ศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นน้ำใส โดยทำการทดลองที่ความหนาชั้นน้ำใสตั้งแต่ 0-1.2 ม. ผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่ความหนาของชั้นน้ำใส มากกว่า 5 ซม. ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปไม่ขึ้นกับความหนาของชั้นน้ำใส และพบว่าที่ความหนาของชั้นน้ำใสประมาณ 5 ซม. นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ AI เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

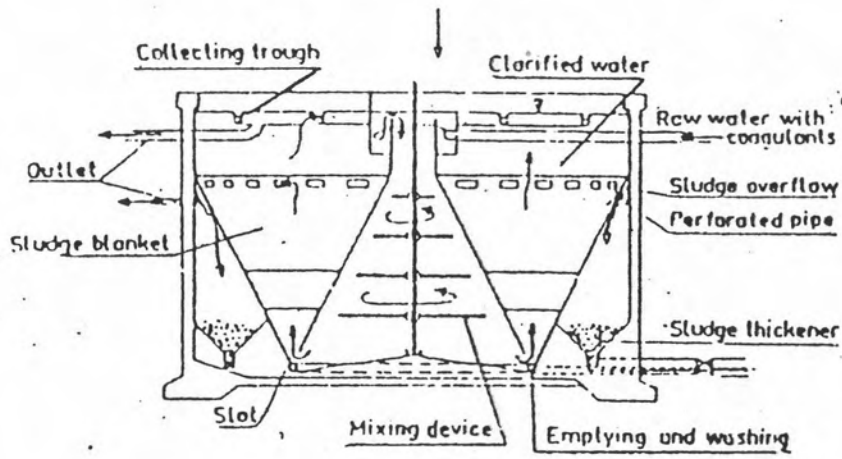
ในปี ค.ศ. 1967 Tesarik ได้กล่าวถึงถึงโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์ เมื่อเทียบกับถังตกตะกอนแบบธรรมดา ถังแบบนี้มีข้อดีหลายประการเช่นระยะเวลาเก็บกักน้ำในถังสั้นประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง การลงทุนก่อสร้างน้อยกว่าถังตกตะกอนแบบธรรมดาประมาณ 5 % และสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพดีกว่า แต่ถึงโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์ต้องการความละเอียดในการควบคุมและความถูกต้องในการผสมสารเคมีกับน้ำดิบ นอกจากนี้ยังแบ่งประเภทของถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์ ดังนี้

1. ถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์ แบบ Mechanically Agitated bed
2. ถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Hydraulically Fluidized bed
3. ถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Sludge Circulation
4. ถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Unsteady Discharge
5. ถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Hopper Bottom Hydraulically

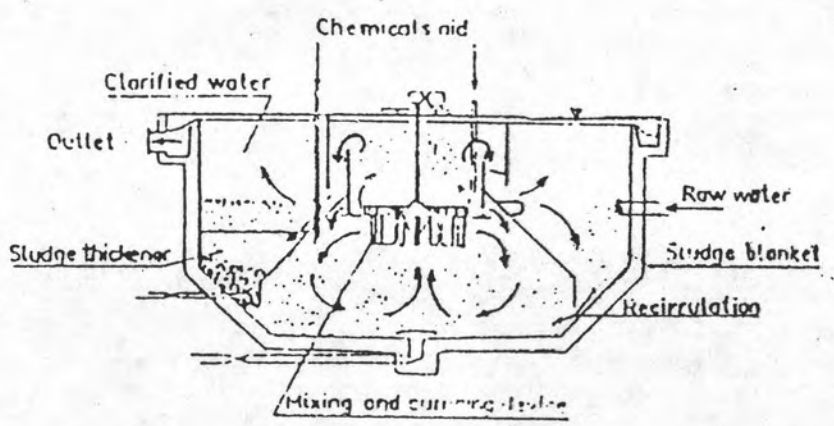
Fluidized



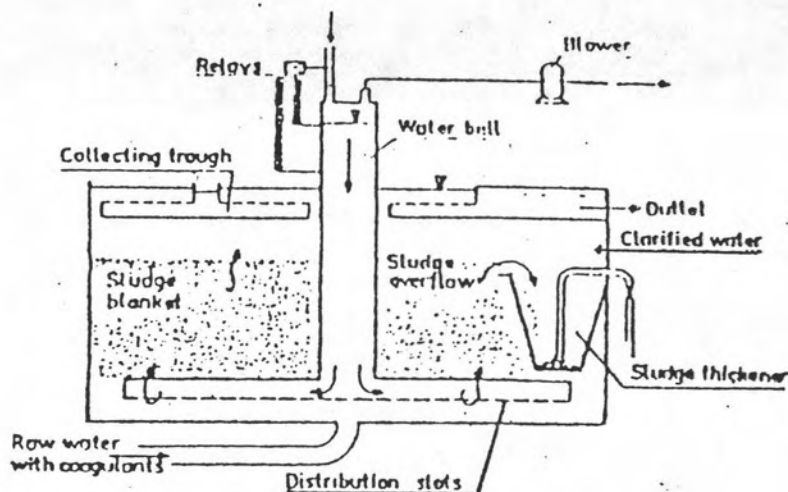
รูปที่ 2.8 ถังโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Mechanically Agitated bed



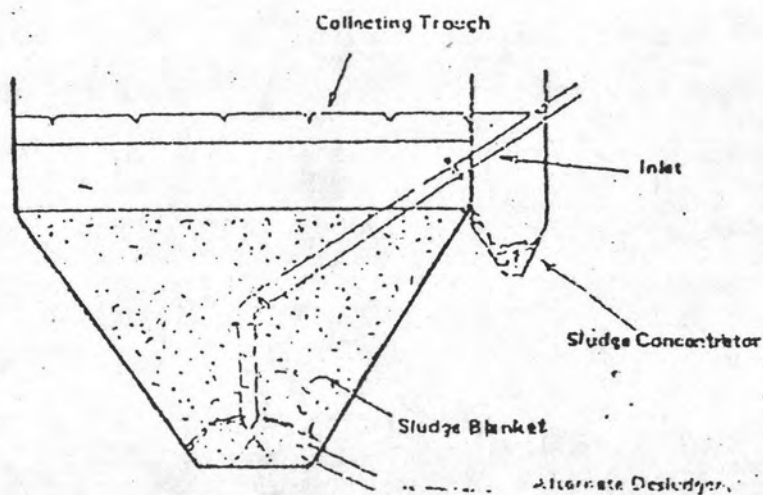
รูปที่ 2.9 ถังโซลิตคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Hydraulically Fluidized bed



รูปที่ 2.10 ถังโซลิตคอนแทคแคลรีไฟเออร์แบบ Sludge Circulation



รูปที่ 2.11 ถังโซลิตคอนแทคแคลริไฟเออร์แบบ Unsteady Discharge



รูปที่ 2.12 ถังโซลิตคอนแทคแคลริไฟเออร์แบบ Hopper Bottom Hydraulic Fluidized

ในปี พ.ศ.2514 เขาวุฒ พรพิมลเทพ ได้ศึกษาหลักเกณฑ์ทำงานของถังตกตะกอนขนาดจริงที่โรงกรองน้ำธนบุรี กรุงเทพมหานคร ลักษณะของถังตกตะกอนเป็น Solid Contact Clarifier แบบที่มีการหมุนเวียนตะกอนที่เรียกกันว่า Accelerator ปริมาณน้ำดิบไหลเข้าถังในอัตรา 1,300-1,900 ลบม./ชม. มีการทดลองทำ Jar Test เพื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับเติมลงผสมน้ำดิบก่อนผ่านเข้าถังตกตะกอน

การทดลองได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของถัง ตัวแปรที่ศึกษาคือความเร็วรอบใบพัด ความลึกชั้นตะกอน ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน และอัตราการไหลขึ้น ส่วนของการทำงานของถังที่ศึกษาคือ ค่าความขุ่นของส่วนน้ำใสที่ได้จากถังตกตะกอน มีขอบเขตและผลการทดลองดังนี้

1. ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบใบพัดทำการทดลองที่อัตราการไหลขึ้น 2.75 และ 3.92  $\text{m}^3/\text{m}^2 - \text{ชม.}$  ความลึกชั้นตะกอน 1.50 ม. แปรค่าความเร็วรอบใบพัดที่ 3, 3.5, 4, 4.5, 5 รอบ/นาที ผลการทดลองสรุปว่า ค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 3-4 รอบ/นาที

2. ศึกษาอิทธิพลของความลึกชั้นตะกอน ทำการทดลองที่อัตราการไหลขึ้น 2.75, 3.02, 3.53 และ 3.92  $\text{m}^3/\text{m}^2 - \text{ชม.}$  ความเร็วรอบใบพัดที่ 3, 3.5 และ 4 รอบ/นาที แปรค่าความลึกชั้นตะกอน (วัดจากผิวน้ำใสถึงชั้นตะกอน) ตั้งแต่ 1.0-2.25 ม. (โดยการปรับอัตราการทิ้งตะกอนออกจากถัง) ผลการทดลองสรุปว่า ค่าความลึกชั้นตะกอนระหว่าง 1.50 - 1.85 ม. จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดี ถ้าความลึกชั้นตะกอนน้อยกว่า 1.0 ม. จะมีตะกอนเล็กหลุดปนออกมากับน้ำใสด้วย (floc carry over)

3. ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน ทำการทดลองที่อัตราการไหลขึ้น 2.75, 3.53 และ 3.92  $\text{m}^3/\text{m}^2 - \text{ชม.}$  ความเร็วรอบใบพัดที่ 3, 3.5 และ 4 รอบ/นาที แปรค่าความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอนระหว่าง 2-50 % (โดยการปรับช่วงเวลาที่ย่อยตะกอนทิ้งออกจากถัง) ผลการทดลองสรุปว่า ค่าความเข้มข้นตะกอนระหว่าง 15-25 % จะให้ผลดี คือ ความขุ่นน้ำใสอยู่ในช่วง 1.7 - 3.5 JTU. ถ้าค่าความเข้มข้นของตะกอนมากกว่า 30% จะทำให้ความขุ่นในน้ำออกจากถังมากขึ้น



4. ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลขึ้น ทำการทดลองที่ความลึกชั้นตะกอน 1.5, 1.8 และ 2.0 ม. ความเร็วรอบใบพัด 3 และ 4 รอบ/นาที แปรค่าอัตราการไหลขึ้นที่ 2.75, 3.14, 3.53, 3.92 และ 4.23  $\text{m}^3/\text{m}^2$ -ชม. ผลการทดลองสรุปว่า การเพิ่มอัตราการไหลขึ้นจะทำให้น้ำออกจากถังมีความขุ่นเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลขึ้นอย่างฉับพลัน จะทำให้ชั้นตะกอนแตก และมีตะกอนฟุ้งกระจายหลุดปนไปกับส่วนตะกอนน้ำใสได้

ในปี พ.ศ.2522 วีระ อินทรกุล ได้ศึกษาการทำงานของถังตกตะกอนแบบโซลิคคอนแทคแคลรีไฟเออร์ ที่ใช้แผ่นขนานเอียง โดยใช้เครื่องมือการทดลองชนิดต้นแบบติดตั้งที่โรงกรองน้ำสามเสน การประปานครหลวง กรุงเทพมหานคร มีสภาพแวดล้อมของการทดลอง ดังนี้

1. ใช้น้ำดิบจากคลองประปาสามเสนมีความขุ่น 19 - 20 JTU. (เฉลี่ย 55 JTU.)
2. ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยในน้ำดิบอยู่ระหว่าง 25-132 มก./ล. (เฉลี่ย 64.23 มก./ล.)
3. ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมหาจากการทำ Jar Test มีค่าตั้งแต่ 25-90 มก./ล. (เฉลี่ย 46.55 มก./ล.)
4. ค่าความเป็นด่างของน้ำดิบอยู่ระหว่าง 46 - 98 มก./ล. (เฉลี่ย 82.72 มก./ล.)
5. ค่าความกระด้างของน้ำดิบ อยู่ระหว่าง 78 - 112 มก./ล.  $\text{CaCO}_3$  (เฉลี่ย 94.19 มก./ล.  $\text{CaCO}_3$ )
6. ค่า PH ของน้ำดิบ อยู่ระหว่าง 6.7-8.3 (เฉลี่ยประมาณ 7.49)
7. อัตราน้ำล้นถังที่ใช้คือ 9.77, 7.32, 4.88 และ 2.44  $\text{m}^3/\text{m}^2$ -ชม.

นอกจากนี้ ยังได้แปรค่าระยะห่างแผ่นขนานเอียง มุมเอียงของแผ่นขนาน และการติดตั้ง ดีเฟลคเตอร์ ซึ่งจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดในที่นี้ เนื่องจากไม่เป็นตัวแปรที่จะทำการศึกษาในการวิจัยนี้

### ผลการทดลองของ วีระ สรุปลัดตั้งนี้

1. ประสิทธิภาพการทำงานของถัง จะเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราการน้ำล้นถึงในช่วงอัตราการน้ำล้นตั้งแต่  $4.88-9.77 \text{ ม}^3/\text{ม}^2$  - ชม. กล่าวคือประสิทธิภาพการทำงานของถังขึ้น อัตราการน้ำล้นต่ำลง แต่ถ้าอัตราการน้ำล้นต่ำกว่า  $4.88 \text{ ม}^3/\text{ม}^2$  - ชม. ประสิทธิภาพการทำงานของถังจะเริ่มคงที่

2. ได้ศึกษาปริมาณอนุภาคแขวนลอยในถัง พบว่า เมื่ออัตราการน้ำล้นสูงตั้งแต่  $4.88-9.77 \text{ ม}^3/\text{ม}^2$  - ชม. ปริมาณอนุภาคแขวนลอยในระดับ  $0.5-1 \text{ ม.}$  จากกันถังจะใกล้เคียงกัน และที่ระดับกันถังจะมีปริมาณอนุภาคแขวนลอยน้อยมาก ทั้งนี้เพราะในช่วงนี้การรวมตัวของฟlocsยังไม่เกิดขึ้น ถ้าใช้ตะกอนน้ำล้นต่ำ คือ  $2.44 \text{ ม}^3/\text{ม}^2$  - ชม. หรือต่ำกว่าจะมีปริมาณตะกอนมาก เนื่องจากความเร็วแนวตั้งของน้ำต่ำ ไม่สามารถพองอนุภาคแขวนลอยในชั้นตะกอนได้ ตะกอนจะตกลงและเริ่มเข้าสู่สภาวะการอัดตัว (Zone of Compression)

ในปี พ.ศ.2524 นิคาล ขยันสำราจ ได้ศึกษาการทำงานของถังโซลิดคอนแทคแคลริไฟเออร์ ที่ใช้กระเบื้องลอนคู่กับทราย การทดลองใช้อุปกรณ์ชนิดต้นแบบขนาดกว้าง  $0.50 \text{ ม.}$  ยาว  $0.60 - 1.90 \text{ ม.}$  สูงทั้งหมด  $1.70 \text{ ม.}$  ติดตั้งที่โรงกรองน้ำสามเสน การประปานครหลวง กรุงเทพมหานคร มีสภาพแวดล้อมของการทดลองดังนี้

1. ใช้น้ำดิบจากคลองประปาสามเสนมีค่าความขุ่น  $21-115 \text{ NTU}$ . (เฉลี่ย  $53.6 \text{ NTU}$ )
2. ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบ อยู่ระหว่าง  $8.96 \text{ มก./ล.}$  (เฉลี่ย  $37.4 \text{ มก./ล.}$ )
3. ค่าความเป็นด่างของน้ำดิบอยู่ระหว่าง  $56-100 \text{ มก./ล.}$  (เฉลี่ย  $76.3 \text{ มก./ล.}$ )
4. ค่าความกระด้างของน้ำดิบ อยู่ระหว่าง  $66-124 \text{ มก./ล. CaCO}_3$  (เฉลี่ย  $78.5 \text{ มก./ล. CaCO}_3$ )
5. ค่า pH ของน้ำดิบอยู่ระหว่าง  $6.9-8.62$  (เฉลี่ยประมาณ  $7.57$ )
6. อุณหภูมิของน้ำ อยู่ระหว่าง  $28-31.5^\circ \text{C}$  (เฉลี่ย  $29^\circ \text{C}$ )
7. ปริมาณสารส้มที่ใช้หาจากการทำ Jar Test

8. อัตราน้ำล้นที่ใช้คือ 1.7, 3.4, 6.8, 10.2 และ 12.6  $\text{ม}^3/\text{ม}^2\text{-ชม}$ .
9. ความหนาแน่นของชั้นตะกอน คือ 1.00 ม.

นอกจากนี้ยังได้แปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายและความลึกของทรายที่ใช้เป็นตัวกลาง ลักษณะการวางแผ่นกระเบื้องบนานซึ่งจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดในที่นี้ เนื่องจากไม่เป็นตัวแปรที่จะทำการศึกษาในการวิจัยนี้

จากผลการทดลองของ พิศาล สรูปได้ดังนี้

1. เมื่อไม่ใช้ทรายเป็นตัวกลาง ความขุ่นน้ำดิบระหว่าง 30-54 NTU ปริมาณของแข็งแขวนลอยระหว่าง 12-54 มก./ล. และมุมเอียงแผ่นกระเบื้องที่ 45, 60, 70 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราน้ำล้น 1.7-6.8  $\text{ม}^3/\text{ม}^2\text{-ชม}$ . แต่เมื่อเพิ่มอัตราน้ำล้นไปอีก ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลง

2. ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในชั้นตะกอนจะลดลงเมื่อ อัตราน้ำล้นสูงขึ้น ถ้ามุมเอียงแผ่นกระเบื้องเป็น  $60^\circ$  และ  $75^\circ$  ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยจะมีค่าสม่ำเสมอทุกระดับชั้นตะกอน แต่ที่มุมเอียงกระเบื้อง  $45^\circ$  ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยจะมากที่สุดในช่วงระดับชั้นตะกอน 0.20 - 0.50 ม. ต่อจากนั้นค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจะลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงระดับ 1.00 ม.