



3.1 การศึกษาที่ผ่านมา

พัฒนาการของการกวนเร็วในท่อเริ่มจะมีมากขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากความต้องการในการผลิตน้ำประปาด้วยระบบที่ไม่ซับซ้อนและประหยัดค่าลงทุนจากพัฒนาการที่ผ่านมาพบว่า การกวนเร็วในท่อสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานได้จากข้อมูลของการทดลองที่ทำกับแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลในการออกแบบ พารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสม และ สมรรถนะในการใช้งานของการกวนเร็วในท่อที่มีอยู่ยังคงอยู่ในขอบเขตที่จำกัด

Camp (1955) ได้ให้สมการเบื้องต้นสำหรับการคำนวณค่าของความเร็วเกรเดียนท์ของการกวนผล้มโดยการใช้การไหลในท่อไว้ดังนี้ (11,18)

$$G = 172 \left(\frac{f}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{3}{v^2}$$

เมื่อ

G = ความเร็วเกรเดียนท์, วินาที⁻¹

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อของดาร์ซี-ไวส์บาร์ค

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, ฟุต

v = ความเร็วของของเหลวในท่อ, ฟุตต่อวินาที

Vrale และ Jordan (1970) ได้ทำการทดลองอุปกรณ์กวนเร็วประเภทต่างๆ และได้สรุปไว้ว่า เมื่อเปรียบเทียบอุปกรณ์กวนเร็วแบบต่างๆ ด้วยกันแล้ว อุปกรณ์กวนเร็วที่มีลักษณะการไหลแบบปลั๊กโฟลว์ (plug flow) จะมีประสิทธิภาพดีกว่าอุปกรณ์กวนเร็วแบบถังกวนผสมอย่างสมบูรณ์ แต่สิ่งซึ่งต้องทำการพิจารณาอย่างรอบคอบคือต้นทุนเดิมสารรวมตะกอน รายละเอียดของขนาดและความเข้มข้นของความเร็วเกรเดียนท์ที่จะใช้ (4)

Stenquist และ Kauffman (1972) ได้ทำการทดลองการกวนเร็วในท่อ โดยที่ข้างของอัตราการใช้พลังงานที่ทดลองมีลักษณะการไหลแบบอลวน จุดเต็มสารรวมตะกอนจะเป็นรูเจาะบนกริด (grid) โดยใช้ น้ำขุ่นสังเคราะห์จากคาโอลินเป็นน้ำดิบ และ ได้สรุปไว้ว่า จำนวนรูเจาะบนกริดที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงในชั้นส่มาตะกอน ควรมีอย่างน้อย 1 รูต่อพื้นที่ของกริด 1 ตารางนิ้ว นอกจากนี้ยังได้พยายามศึกษาผลของความปั่นป่วนของน้ำต่อการกวนเร็วตามความยาวของท่อ แต่เนื่องจากความซับซ้อนของอุปกรณ์ทำให้น้ำไปประยุกต์ใช้กับงานได้ยาก และมีการสูญเสียหัวน้ำสูง (5)

Delichatsios และ Probststein (1974) ได้ทำการศึกษาการรวมตะกอน (coagulation) ในท่อที่มีลักษณะการไหลแบบอลวน (turbulent) และได้สรุปไว้ว่า การรวมตะกอนของอนุภาคที่ถูกทำลายเล็กน้อยในท่อที่มีการไหลแบบอลวน เมื่อขนาดของอนุภาคเล็กกว่าไมโครเล็กของ Kolmogorov จะแสดงผลให้เห็นด้วยอย่างดีเยี่ยมกับทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายอัตราเร็วของการรวมตะกอน ประสิทธิภาพของการรวมตะกอนสำหรับระบบของอนุภาคที่บางส่วนถูกทำลายเล็กน้อยจะไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการเคลื่อนที่ของอนุภาค เช่น บราวเนียน (Brownian) หรือ ออลวน (turbulent) สำหรับกรณีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าไมโครเล็กของ Kolmogorov พบว่าไม่มีความสำเร็จในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอน เพราะว่าเกิดการแตกตัวอย่างรวดเร็วของฟล็อก (floc) เนื่องจากกาไหลของของเหลวในท่อ (6)

Chao และ Stone (1979) ได้เสนอแนะว่าการกวนเร็วในท่อมีข้อดีเหนือกว่าการกวนเร็วในถังกวนผสม ด้วยเหตุผลที่ว่า เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูก ง่ายในการบำรุงรักษา และเดินระบบ (5)

Guyen และ Benefield (1983) ได้เสนอแนะว่า ในการออกแบบการกวนเร็วเมื่อใช้ท่อเป็นอุปกรณ์กวนเร็ว ควรได้มีการพิจารณาถึงอัตราส่วนของความเร็วของน้ำในท่อ และความเร็วของการไหลของสารรวมตะกอน อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกวนเร็ว และท่อน้ำสารรวมตะกอน (7)

Notthakun (1984) ได้ทำการศึกษาทางเซลล์ศาสตร์ของท่อส่มาตะกอนแบบเวียนขึ้น (spiral flocculator) พบว่าค่าความเร็วเกรเดียนท์จะไม่ขึ้นกับความยาวของท่อ แต่จะขึ้นอยู่กับความเร็ว และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ขนาดของฟล็อกที่เกิดขึ้นที่สภาวะของพารามิเตอร์ต่าง ๆ 1 ต่อกันจะมีขนาดใกล้เคียงกัน (12)

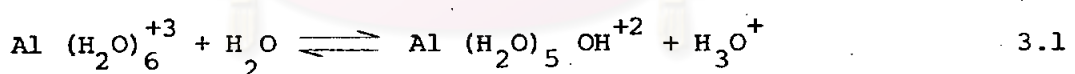
3.2 ทฤษฎีของการกวนเร็ว

การกวนเร็ว เป็นกระบวนการทำลายเสถียรของอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็ก ๆ ในน้ำ และทำให้เริ่มเกาะตัวกันเป็นอนุภาคตะกอนขนาดเล็ก ซึ่งเกิดขึ้นโดยการทำลายแรงผลักรวมกัน และกันที่เกิดเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าผิวของอนุภาคคอลลอยด์เหล่านั้น (8)

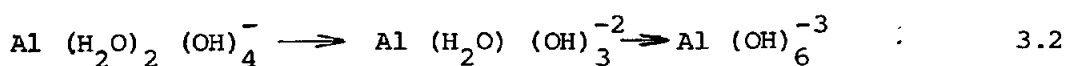
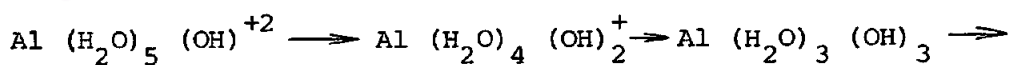
การทำลายเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยการลดประจุไฟฟ้ารอบ ๆ อนุภาคเหล่านั้น ทำได้โดยการเติมสารรวมตะกอน (coagulant) ที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้าม กับประจุไฟฟ้ารอบ ๆ อนุภาคเหล่านั้น สารรวมตะกอนส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กันมีอยู่หลายชนิด เช่น สารส้ม สารโพสโซเลค โตรไลท์ ฯลฯ สารรวมตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่สารส้ม (Aluminum Sulfate)

ปฏิกิริยาเคมีของน้ำเมื่อมีการเติมสารส้มลงไปจะมีความซับซ้อน และไม่คงตัว เนื่องจาก การเกิดของอนุภาคไฮดรอกไซด์ที่ละลายเป็น $Al(OH)_3$ ซึ่งตกผลึกได้

Matijevic และ Rubin (1) พบว่าเมื่อเกลือของอลูมิเนียมละลายน้ำจะได้อนุมูลไฮดรอกไซด์ของ Al^{+3} ล้อมรอบด้วยอนุมูลของน้ำ 6 โมเลกุล และจะรวมตัวกันเป็นสารเชิงซ้อน $Al(H_2O)_6^{+3}$ ซึ่งสารเชิงซ้อนตัวนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ต่อไป และก่อตัวเป็นแบบต่าง ๆ มากมาย ตัวอย่างง่าย ๆ คือ การแทนที่ของอนุมูลไฮดรอกซิลในอนุมูลของน้ำจะได้ปฏิกิริยาไฮดรอลิซิสขั้นแรก ซึ่งมักเกิดขึ้นดังนี้



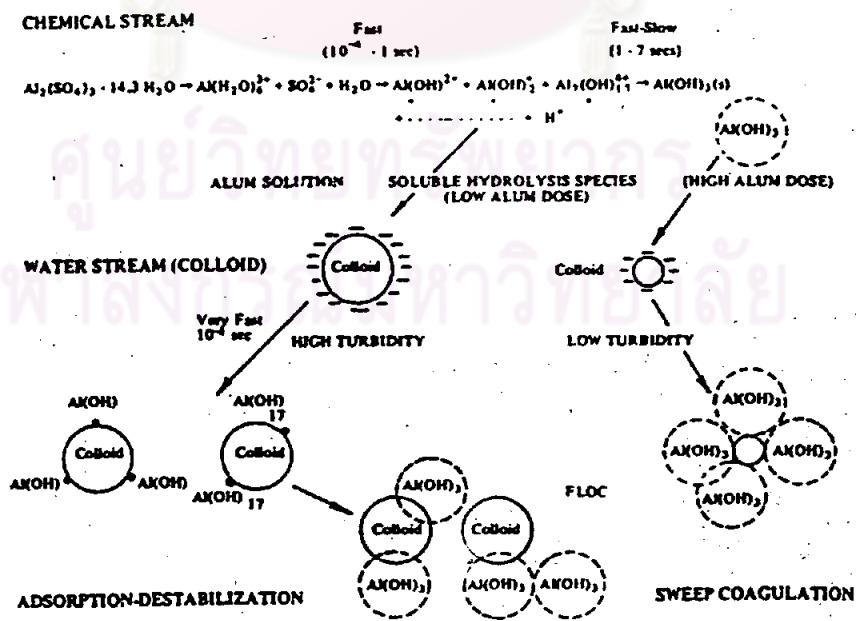
อนุมูล H_3O^+ โดยปรกติแล้วจะเขียนสั้น ๆ เป็น H^+ เมื่อมีการแทนที่อนุมูลของน้ำ โดยอนุมูลไฮดรอกซิล เราพอจะตั้งสมมุติฐานได้ว่าจะเกิดการรวมตัวเป็นแบบของไฮดรอลิซิสที่แตกต่างกันมากมาย ซึ่งอาจมีประจุบวก ประจุลบ หรือเป็นกลางก็ได้



โดยทั่วไปแล้วอนุมูลของน้ำที่มาอยู่ล้อมรอบอนุมูลโลหะ เรามักจะไม่เขียนกันเช่น $Al(H_2O)_6^{+3}$ เราอาจเขียนแทนได้ว่า Al^{+3} หรือ $Al(H_2O)_5OH^{+2}$ เขียนแทนได้ด้วย $Al(OH)^{+2}$ เป็นต้น

ปฏิกิริยาของการรวมตะกอนจะเป็นความเกี่ยวเนื่องระหว่างผลิตภัณฑ์ของการไฮดรอลิซิสของ Al^{+3} และอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ ประเภทของกระบวนการกวนเร็วซึ่งได้มีการเตรียมการไว้สำหรับปฏิกิริยาของการล่มานตะกอน จะเป็นแบบที่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยา รูปที่ 3-1 แสดงแผนภูมิสรุ่ยของกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการกวนเร็ว

การกวนเร็วในกระบวนการผลิตน้ำประปาด้วยเกลือของอลูมิเนียมจะแยกเป็นกลไกแตกต่างกันได้ 2 กลไก คือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (charge adsorption and neutralization) และ กลไกแบบกวาด (sweep coagulation) กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเกิดจากสารเชิงซ้อนประจุบวก โดยเริ่มจากการดูดติดระหว่างสารดังกล่าวกับผิวของคอลลอยด์ด้วยแรงดึงดูดโตะวาเลนซ์ จากนั้นประจุบวกของสารเชิงซ้อนของอลูมิเนียมจะทำลายประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ลดลง จนแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่า และเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่ลุด



รูปที่ 3-1 แสดงแผนภูมิของกลไกของกระบวนการรวมตะกอน



กลไกแบบกวาดจะ เกิดจาก ผลึกของ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก ตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคง กระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดยลักษณะนี้คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจาก น้ำพร้อม กับผลึกที่รวมตัวกัน เป็นตะกอนขนาดใหญ่ในชั้นส่มานตะกอน และถูกแยกออกจาก น้ำโดยการตกตะกอนต่อไป

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยกลไกแบบดูดติดผิวจะ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก อาจภายในเวลาเศษหนึ่งส่วนพันของวินาที ถ้าไม่เกิดการไฮโดรไลซิสของ Al^{+3} และถ้ามีการไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นบ้างปฏิกิริยา ก็จะเกิดขึ้นภายในเวลา 1 วินาที (9) การรวมตัวของผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ก่อนที่จะ เกิดกลไกแบบกวาดจะ เกิดขึ้นช้ากว่าและจะใช้ เวลาของปฏิกิริยา อยู่ในช่วง 1 ถึง 7 วินาที (10)

เกณฑ์หลักที่ใช้พิจารณา การกวนเร็ว คือการกระจายสาร รวมตะกอนอย่างทั่วถึง เข้ากับ น้ำดิบที่มาผสม เพื่อไม่ให้มีส่วนใดส่วนหนึ่งของน้ำดิบไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ จาก การวิเคราะห์ ของกลไกทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวพบว่า ถ้า เป็นกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุจะเป็นไปได้ ก็ต่อเมื่อสารรวมตะกอนกระจายไปในน้ำดิบอย่างรวดเร็ว ภายในเวลาที่น้อยกว่า 1 วินาทีเท่านั้น ซึ่ง เพื่อที่จะให้สัมมุติฐานดังกล่าวเป็นจริง Hudson และ Wolfner (11) ได้แนะนำให้ใช้ อุปกรณ์กวนเร็วแบบปั่นตัดในท่อ (in-line blenders)

เมื่อพิจารณา กลไกแบบกวาดจะ เห็นว่า เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสจนได้ผลึกของ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะใช้ เวลาประมาณ 1-7 วินาที ดังนั้นจะ เห็นว่า ความจำเป็นในการที่จะ กระจายสารรวมตะกอนให้ผสมกับน้ำดิบอย่างทั่วถึงทันที่ทันใด เหมือนกับกลไกแบบดูดติดผิวและทำลาย ประจุนี้ไม่ค่อนจำเป็นเท่าใดนัก การรวมตะกอนจะ เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ถูกจับโดย ผลึกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

3.3 พารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็ว

ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อข้างต้นพื้นฐานของการกวนเร็วจะเป็นความต้องการของการ กระจายสารรวมตะกอน เข้ากับน้ำดิบอย่างทั่วถึง ซึ่งจะช่วยให้สารรวมตะกอนสัมผัสกับจำนวน ของคอลลอยด์ในปริมาณที่สูงในระยะ เวลาสั้น ๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะควบคุมโดยค่าความเร็ว เกลเดียนท์ที่เพียงพอ ค่าที่เหมาะสมของระดับของพลังงานที่จะจ่ายเข้าไปในอุปกรณ์กวนเร็ว ดูเหมือนว่าจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราเร็วในการแพร่ (diffusion rate) ของสารรวมตะกอนและ

ระดับของความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับ แรงอินเนอเรีย (inertia forces) ซึ่งจะระบุโดยค่า พาวเวอร์นัมเบอร์ (power number) แรงเนื่องจากความหนืดของน้ำ (viscous forces) ซึ่งจะแทนโดยค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold's number) แรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational forces) ซึ่งอธิบายโดยค่า ฟร้าวด์นัมเบอร์ (Froude number) และองค์ประกอบอื่น ๆ

หลักเบื้องต้นของกระบวนการกระจาย (dispersion process) ในปฏิกริยาเคมีของการกวนเร็ว การส่ฆานตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาจะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทแตกต่างกันคือ ประเภทแรกจะเป็นประเภทของกระบวนการกระจายที่ไม่มีการผสมกลับ (irreversible dispersion) ประเภทนี้จะได้แก่ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการกวนเร็ว (flash mixing) ของระบบผลิตน้ำประปา เมื่อใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอน ประเภทที่สองได้แก่ประเภทของกระบวนการกระจายที่มีการผสมกลับได้ (reversible dispersion) ซึ่งจะเป็นประเภทที่อนุภาคสามารถโคเอเลเลซ (coalesce) และจับตัวรวมกันได้อีกครั้งหนึ่งในบริเวณที่มีความเค้นเฉือนต่ำ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นในขั้นตอนของ กระบวนการส่ฆานตะกอน (flocculation) ของระบบผลิตน้ำประปา ประเภทสุดท้ายคือประเภทของ กระบวนการกระจายที่เกิดขึ้นระหว่างสองประเภทดังกล่าว กระบวนการกระจายประเภทนี้จะเกิดในส่ฆาที่เป็นจริงของกระบวนการรวมตะกอนทั่วไป และมักจะเกิดในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่มีการเติมสารช่วยส่ฆารวมตะกอน (14)

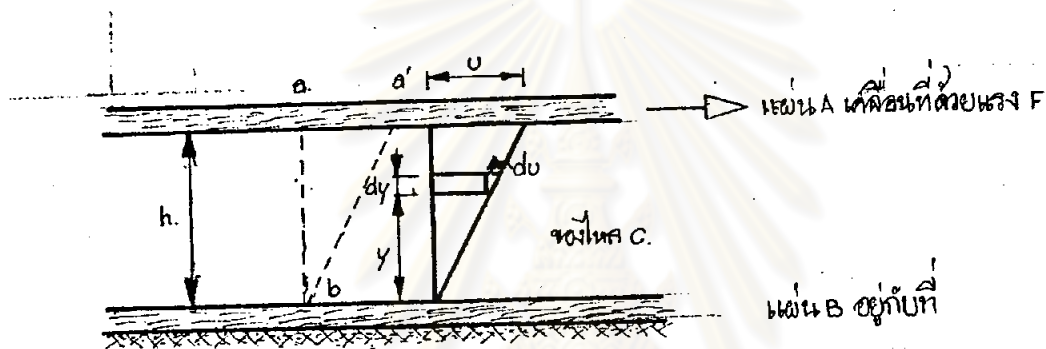
ในวงการของวิศวกรรมสุขาภิบาลค่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ที่ล่ฆิดในการบอกระดับความปั่นป่วนของการกวนเร็วได้แก่ค่าความเร็ว เกร เดียนท์ (G) แต่ในกระบวนการกวนเร็วแล้วอาจมองได้เป็นสองนัยเพราะว่าระดับของพลังงานที่เข้าระบบ ความแตกต่างของ อุณหภูมิการกวนเร็ว ระดับของการล่ฆางจรจะเป็นตัวที่ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกวนเร็ว

พารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็วตัวอื่น ๆ นอกเหนือจากความเร็ว เกร เดียนท์ที่ใช้กัน ได้แก่ พาวเวอร์นัมเบอร์ ฟร้าวด์นัมเบอร์ และ เรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งมักนิยมใช้กันในวงการวิศวกรรมเคมี (14,15)

3.3.1 ความเร็วเกรเดียนท์ (G)

พารามิเตอร์ความเร็วเกรเดียนท์ เป็นพารามิเตอร์บ่งถึงระดับความปั่นป่วนของน้ำ ปรกติแล้วอุปกรณ์กวนเร็วจะต้องสร้างระดับความปั่นป่วนของน้ำให้เพียงพอที่จะเกิดการผสมอย่างทั่วถึงของสารเคมีกับน้ำ

นิยามพื้นฐานของความเร็วเกรเดียนท์มาจากทฤษฎีของความเค้นเฉือน (shearing stress)



รูปที่ 3.2 ข้อกำหนดในการหา นิยามของความเร็วเกรเดียนท์

จากรูปที่ 3-2 จะได้ว่า

$$F = \mu A \frac{U}{h}$$

โดยที่

F = แรงที่กระทำ

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล

A = พื้นที่ผิวสัมผัส

$\frac{U}{h}$ = ความเร็วเชิงมุม (angular velocity)

เมื่อพิจารณารูปที่ 3-2 จะเห็นว่า $\frac{U}{h}$ เป็นความเร็วเชิงมุมของเส้น ab ถ้าเขียนในรูปของอนุพันธ์จะเขียนได้เป็น $\frac{du}{dy}$ ซึ่งเรียกแทนว่าความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient)

สมการที่ 3.3 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

โดย

$$\tau = \text{ความเค้นเฉือน}$$

ถ้าให้ G เป็นสัญลักษณ์แทนความเร็วเกรเดียนท์ ซึ่งค่า G เป็นค่าที่นิยามมาจากค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) (21) ส่วนค่าของ $\frac{du}{dy}$ เป็นค่าอัตราสูงสุดของการเปลี่ยนความเร็วในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของความเร็ว

Camp และ Stein (13,21) ได้ทำการพิจารณาการเปลี่ยนมุมใน 3 มิติของหน่วยเล็ก ๆ ของน้ำ เนื่องจากแรงเฉือนที่ระนาบผิวต่าง ๆ และได้ให้สมการค่าเฉลี่ยกำลังสองไว้ดังนี้

$$G_p^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad 3.5$$

โดยที่

$$\begin{aligned} G_p &= \text{ความเร็วเกรเดียนท์สัมบูรณ์ ณ จุดที่พิจารณา} \\ u, v, w &= \text{ตัวประกอบของความเร็วตามแกน } x, y, z \text{ ตามลำดับ ณ จุดที่พิจารณา} \end{aligned}$$

Camp และ Stein (13) ยังได้เล่นอวาล์วสมการนี้ใช้ได้ทั้งในสภาวะของการไหลชนิดราบเรียบ (laminar) และชนิดอลวน (turbulent) แต่อย่างไรก็ตามยังได้ระบุถึงความยุ่งยากในการที่จะประยุกต์ใช้สมการนี้เมื่อสภาวะของการไหลมีลักษณะการไหลเป็นชนิดอลวน

โดยทั่วไปแล้ว เราจะพิจารณาความเร็ว เกรตียนทึในอุปกรณักรวนเร็วในรูปขนาด ภายใตลักรวที่มึกรนเข้ระบบอย่งตอเนื่อง ค้ค่าเฉลี่ยของความเร็ว เกรตียนทึจะมีความ สัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของพลังงานที่เข้ระบบตอหน่วยปริมาตร ซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.6$$

โดยที่

P = พลังงานที่เข้ระบบ

V = ปริมาตรของอุปกรณักรวนเร็ว

G = ความเร็ว เกรตียนทึ

3.3.2 เวลาักน้ำ (T)

พารามิเตอร์ เวลาักน้ำเป็นพารามิเตอร์บ่งถึง เวลาผลมซึ่งหมายถึง เวลาสัมพัทธ์ระหว่างลักรเคมีและอนุภาคคอลลอยด์ซึ่ง เป็นต้นเหตุของความขุ่น เนื่องจากรปฏิกิริยา ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้นรวดเร็วมาก ในทางปฏิบัติมักถือว่า เวลาผลมจะเป็นเวลาที่น้ำอยู่ในอุปกรณักรวนเร็ว

การหาค่าของ เวลาักน้ำ คำนวณได้จากสมการ

$$T = \frac{V}{Q} \quad 3.7$$

เมื่อ

T = เวลาักน้ำ

V = ปริมาตรของน้ำในอุปกรณักรวนเร็ว

Q = อัตราการไหลของน้ำผ่านอุปกรณักรวนเร็ว

3.4 การประยุกต์พารามิเตอร์ควบคุมการกรวนเร็ว เข้กับการกรวนเร็วในท่อ

การกรวนเร็วเมื่อใช้ท่อเป็นอุปกรณักรวนเร็วจะมีรูปแบบของกรไหลแตกต่างไปจาก ถังกรวนผลม การกรวนผลมในท่อสัคเป็นการกรวนผลมโดยใช้พลังงานชลค่าลักร ลักรวนการกรวนผลม ในถังกรวนเป็นการกรวนผลมโดยใช้เครื่่องมือกร ความแตกต่างในพื้นฐานดัง กล่าววทำให้สมการใน

การคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ แตกต่างกันไปด้วย

3.4.1 ความเร็วเกรเดียนท์ (G)

จากสมการที่ 3.6 ซึ่งเป็นสมการคำนวณหาค่าของความเร็วเกรเดียนท์ได้แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วเกรเดียนท์ว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับรากที่สองของพลังงานที่เข้าระบบ และแปรผกผันกับรากที่สองของปริมาณของ อุณหภูมิความเร็วและความหนืดลัมบ์ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์

$$G = \left(\frac{P}{\mu V}\right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.6$$

จะเห็นได้ว่าในอุปกรณ์กวนเร็วแบบใด ๆ ก็ตามซึ่งหาค่าของปริมาณควบคุมได้ การคำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนท์จะเป็นการแทนค่าพลังงานที่เข้าระบบลงไป ในสมการที่ 3.6 เท่านั้น

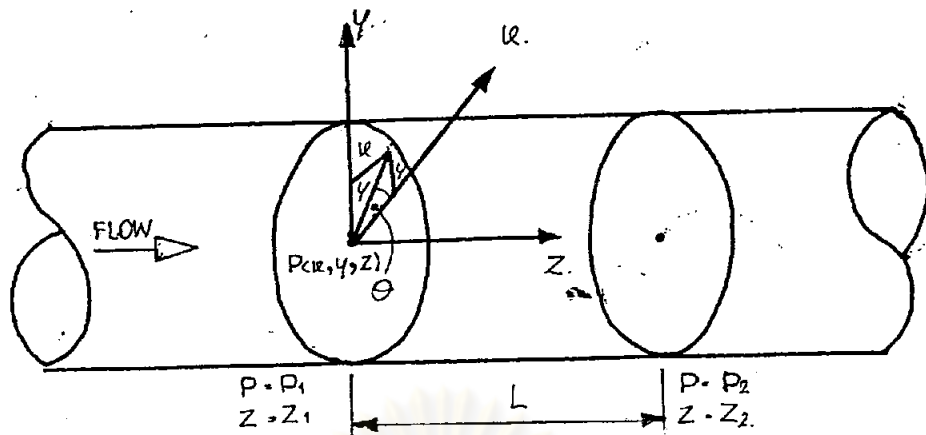
เนื่องจาก ลักษณะของแบบของการไหลในท่อแบ่ง โดยรวมแยกออกได้เป็นสองประเภท (19) คือการไหลแบบราบเรียบ (laminar) และการไหลแบบอลวน (turbulent) ซึ่งสมการในการหาค่าของพลังงานของการไหลของทั้งสองประเภทจะแตกต่างกัน ดังนั้นการหาค่าของความเร็วเกรเดียนท์ของการกวนเนื่องจากการไหลภายในท่อจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบดังนี้ (17,19,20,35)

3.4.1.1 สำหรับลักษณะการไหลในท่อเป็นแบบราบเรียบ (laminar)

สภาวะการไหลแบบราบเรียบจะอยู่ในช่วงที่ค่าของ เรย์โนลด์นัมเบอร์น้อยกว่า 2,000 (19,35)

สำหรับแบบของการไหลในท่อที่เป็นแบบราบเรียบสภาวะของการไหลจะอยู่ภายใต้สภาวะการไหลแบบ Poiseuille (12) ความเร็วเกรเดียนท์ในท่อจะไม่เท่ากันตลอดหน้าตัดจะมีลักษณะการกระจายของความเร็วเกรเดียนท์เป็นรูปพาราโบลา ค่าของความเร็วเกรเดียนท์จะมีค่ามากที่สุดที่ผิวของท่อและจะลดลงจนเป็นศูนย์ที่บริเวณแกนกลางของท่อ

ค่าของความดันลดตามความยาวของท่อภายใต้การไหลแบบราบเรียบจะคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 นิยามในการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วเกรเดียนท์

จากรูปที่ 3.3 ถ้าให้ U เป็นความเร็วของของเหลวที่จุด $P(x, y, z)$ เนื่องจากสภาพของการไหลเป็นไปตามแกน z เพียงแกนเดียว ถ้าให้ u, v, w เป็นองค์ประกอบของความเร็วในแกน x, y, z ตามลำดับ จะเขียนความสัมพันธ์ของ U ได้ดังนี้

$$U = U(0, 0, w) \quad 3.8$$

ลักษณะของการไหลเป็นการไหลแบบคงที่ (steady flow) ดังนั้นจากสมการต่อเนื่องของการไหล (continuity equation) จะได้ว่า

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 + 0 + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 3.9$$

สมการของ Navier - Stokes (15) สำหรับของไหลที่ไม่ยุบตัว (incompressible fluid)

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 U \quad 3.10$$

โดยที่

p = ความดันของของไหล

เนื่องจากสถานะของการไหลเป็นแบบคงที่ ฉะนั้น

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{(บ. 7)} \quad U &= w \frac{\partial U}{\partial z} \\ &= \vec{k} w \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{aligned}$$

ฉะนั้นสมการที่ 3.10 จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$-\frac{1}{\rho} \nabla^2 p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 U = 0 \quad 3.11$$

หรือ

$$-\nabla^2 p + \mu \nabla^2 U = 0 \quad 3.12$$

สมการที่ 3.12 แยกออกได้เป็น 3 สมการต่อไปนี้คือ

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad 3.13(a)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad 3.13(b)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \nabla^2 w \quad 3.13(c)$$

จากสมการที่ 3.13 (a) และ 3.13 (b)

$$p = p(z) \quad 3.14$$

เขียนสมการที่ 3.13 (c) ใหม่ โดยอาศัยสมการที่ 3.9 และ 3.14 จะได้ว่า

$$\frac{dp}{dz} = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad 3.15$$



จากรูปที่ 3.3 จะได้ว่า

$$z = z \quad 3.16$$

$$x = r \cos \theta \quad 3.17$$

$$y = r \sin \theta \quad 3.18$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad 3.19$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad 3.20$$

เปลี่ยนความสัมพันธ์ในระนาบ x, y, z ของสมการที่ 3.15 ให้มาอยู่ในระนาบ r, θ, z (ดูการพิสูจน์ในรายการคำนวณที่ ผ.7) จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} \quad 3.21$$

เนื่องจากความสัมพันธ์รอบแกน z ฉะนั้น $\partial^2 w / \partial \theta^2 = 0$ สมการที่ 3.21 จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{d^2 w}{d r^2} + \frac{1}{r} \frac{d w}{d r} = \frac{1}{\mu} \frac{d p}{d z} \quad 3.22$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{d r} \left(r \frac{d w}{d r} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{d p}{d z} \quad 3.23$$

อินทิเกรต

$$r \frac{d w}{d r} = \frac{r}{2\mu} \frac{d p}{d z} + A \quad 3.24$$

โดยที่

$A =$ ค่าคงที่ของการอินทิเกรต

สมการที่ 3.24 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{d w}{d r} = \frac{r}{2\mu} \frac{d p}{d z} + \frac{A}{r} \quad 3.25$$

อินทิเกรต

$$w = \frac{r^2 dp}{4\mu dz} + A \log r + \beta \quad 3.26$$

โดยที่

$$\beta = \text{ค่าคงที่ของการอินทิเกรต}$$

ที่ $r = 0$ ความเร็วที่แกนกลางของท่อสามารถหาค่าได้ ฉะนั้น เทอม

$$A \log r = 0$$

$$w = \frac{r^2}{4\mu} \frac{dp}{dz} + \beta \quad 3.27$$

$$\text{ที่ } r = R \text{ (ผนังท่อ) } w = 0$$

$$\beta = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{dp}{dz} \quad 3.28$$

สมการที่ 3.27 เขียนใหม่ได้ว่า

$$w = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} (r^2 - R^2) \quad 3.29$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่จุดใด ๆ และความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ

แสดงสมการต่อไปนี้ (32)

$$w = 2 \bar{w} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad 3.30$$

โดยที่

$$\bar{w} = \text{ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ}$$

แทนสมการที่ 3.30 ในสมการที่ 3.29 จะได้ว่า

$$\bar{w} = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dp}{dz} \quad 3.31$$

อินทิเกรตจากหน้าตัด 1 ถึงหน้าตัด 2 ให้ $p = p_1$ ที่จุด $z = z_1$ และ
 $p = p_2$ ที่จุด z_2 และ $z_2 - z_1 = L$ จะได้

$$\bar{w} (z_2 - z_1) = -\frac{R^2}{8\mu} (p_2 - p_1) \quad 3.32$$

เรียก $p_1 - p_2$ ว่าความดันลด และเขียนแทนด้วย Δp สมการที่ 3.32
 จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$\Delta p = \frac{8\mu \bar{w} L}{R^2} \quad 3.33$$

เขียนในเทอมของ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (D) และแทนความเร็วเฉลี่ยของท่อ
 \bar{w} ด้วย v จะได้ว่า

$$\Delta p = \frac{32 \mu v L}{D^2} \quad 3.34$$

โดยที่

- Δp = ความดันลด, นิวตัน ต่อ ตารางเมตร
- μ = ความหนืดสัมบูรณ์, กิโลกรัม ต่อ เมตร ต่อวินาที
- v = ความเร็วเฉลี่ย, เมตร ต่อวินาที
- L = ความยาวของท่อ, เมตร
- D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, เมตร

จากสมการของความดันลดหาค่าพลังงานเข้าระบบได้จาก (33)

พลังงาน = อัตราการไหล x ความดันลด

$$P = \frac{\pi}{4} D^2 (v) \times \frac{32 \mu v L}{D^2}$$

$$P = 32 \frac{\pi}{4} \mu v^2 L \quad 3.35$$

แทนค่า P ในสมการที่ 3.6 จะได้

$$G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{32 \frac{\pi}{4} \mu v^2 L}{\frac{\pi}{4} D^2 L \mu} \right)$$

$$G = 5.66 \frac{v}{D}$$

3.36

สมการที่ 3.36 เป็นสมการคำนวณหาค่าความเร็วกระแสน้ำ เมื่อลักษณะของการไหลเป็นแบบราบเรียบ หรือ ค่าเรย์โนลด์ส์มีเบอร์ น้อยกว่า 2000

3.4.1.2 สำหรับลักษณะการไหลในท่อเป็นแบบอลวน (turbulent)

สภาวะการไหลแบบอลวนจะอยู่ในช่วงที่ค่าของ เรย์โนลด์ส์มีเบอร์มากกว่า 4000 (19,35) สำหรับช่วงที่อัตราการไหลมีค่า เรย์โนลด์ส์มีเบอร์ 2000-4000 จะเป็นช่วงเปลี่ยนสภาพ (transition zone) การเปลี่ยนแปลงของการไหลในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพของท่อและการไหล

สำหรับการไหลที่เป็นแบบอลวน ค่าของพลังงานที่ต้องใช้ไป

ในการไหลจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (20)

$$P = \rho Q g H$$

โดยที่

P = พลังงานที่ใช้ไปในการไหล, วัตต์

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร

Q = อัตราการไหลของน้ำในท่อ ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที

g = ค่าคงที่ของแรงแม่เหล็ก, เมตร ต่อ วินาที ต่อวินาที

H = ค่าหัวน้ำสูญเสียเนื่องจากการไหล, เมตร

$$H = \frac{fL}{D} \frac{v^2}{2g}$$

3.38

โดยที่

f = แฟคเตอร์ของความเสียดทาน

การไหลแบบอลวน ค่า f นิยมใช้สมการของ

Colebrook (15) ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\epsilon}{D} + \frac{9.35}{N_{re} \sqrt{f}} \right) \quad 3.39$$

โดยที่

$\frac{\epsilon}{D}$ = ความหยาบสัมพัทธ์ รูปที่ ผ. 1

ϵ = ค่าแสดงคุณสมบัติของความหยาบของ วัสดุท่อ รูปที่ ผ.1

N_{re} = ค่าเรย์โนลด์ส์ เบอร์

สมการที่ 3.37 เขียนใหม่ได้เป็น

$$P = \rho Q g f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad 3.40$$

แทนค่า P ลงในสมการที่ 3.6 จะได้

$$G = \left(\frac{P}{\rho v} \right)^2 \frac{1}{2}$$

$$= \left(\frac{\rho Q f L v^2}{2 \rho v D} \right)^2 \frac{1}{2}$$

$$= \left(\frac{\rho f L v^2}{2 \mu D} \right)^2 \frac{1}{2}$$

$$= \left(\frac{\rho f L v v^2}{2 \mu L D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$G = \left(\frac{\rho}{2 \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{f}{D} \right)^{\frac{1}{2}} v^{\frac{3}{2}} \quad 3.41$$

ในการหาค่าไหลแบบอลวนนี้พบว่า ค่า f ขึ้นอยู่กับ

เรย์โนลด์นัมเบอร์ (N_{re}) และค่าความหยาบสัมพัทธ์ (ϵ/D) Wood (31) ได้ดัดแปลงสมการที่ 3.39 เพื่อสะดวกในการประยุกต์ใช้ในงานคำนวณโดยได้ให้สมการหาค่า f ไว้ดังนี้

$$f = a + b N_{re}^{-c} \quad 3.42$$

โดยที่

$$a = 0.094 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.225} + 0.53 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)$$

$$b = 88 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.44}$$

$$c = 1.62 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.134}$$

สมการนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อค่า ϵ/D อยู่ในช่วง 10^{-5} ถึง 4×10^{-2} และ N_{re} อยู่ในช่วง 5×10^3 ถึง 10^8 ซึ่งแม้ว่าช่วงที่ใช้ได้จะแคบกว่าสมการที่ 3.39 คือ N_{re} อยู่ในช่วงเดียวกัน แต่ ϵ/D Colebrook ได้ให้ช่วงไว้ระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-2} แต่มีความสะดวกในการใช้งานคำนวณมากกว่าสมการที่ 3.39 ถ้าแทนค่า f ลงในสมการที่ 3.41

$$G = \frac{\left(\frac{\rho}{2 \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(0.53 \frac{\epsilon}{D} + 0.094 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.225} + 88 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.44} N_{re}^{-1.62 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.134}} \right)^{\frac{1}{2}}}{D^{1/2}} v^{\frac{3}{2}}$$

3.43

สมการที่ 3.43 สามารถใช้คำนวณค่า G ในท่อได้ทันทีเนื่องจาก ρ และ μ เป็นค่าคงที่ของสมบัติน้ำ ถ้ารู้ชนิดของท่อที่ใช้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และ อัตราการไหลที่ต้องการ จะเห็นได้ว่าค่า G ของท่อไม่ขึ้นกับความยาวของท่อ แต่ขึ้นกับความเร็ว และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ แต่อย่างไรก็ดี ค่า ϵ ที่ได้จากคู่มือออกแบบ หรือ ตำรับตำรา อาจมีการคลาดเคลื่อนได้จาก ϵ ของท่อจริงบ้าง เนื่องจากคุณภาพในการผลิต ก่อนจะใช้สมการที่ 3.43 ควรได้แน่ใจเสียก่อนว่าค่า ϵ ใกล้เคียง กับท่อของผู้ผลิตที่จะนำมาใช้

จากสมการที่ 3.37 เราอาจเขียนความสัมพันธ์ของ G ในเทอมของหัวน้ำสูญเสียได้ดังนี้

$$P = \rho Q g H$$

$$G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$G = \frac{(\rho Q g H)^{\frac{1}{2}}}{\mu V}$$

$$G = \left(\frac{g H}{\nu T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.44$$

โดยที่

$$\nu = \text{ความหนืดจลน์} = \mu / \rho$$

$$T = \text{เวลากักน้ำ} = V / Q$$

สมการที่ 3.44 สามารถใช้คำนวณค่า G ในท่อได้ ถ้ารู้ค่าหัวน้ำสูญเสีย และเวลากักน้ำของท่อทวนเร็ว สมการนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการประเมินค่า G ของท่อที่ต่อเป็นระบบทวนเร็วอยู่แล้ว ซึ่งทำได้โดยการวัดค่าหัวน้ำสูญเสีย

สมการที่ 3.44 อาจเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ และ H/L ได้ดังต่อไปนี้

สมการที่ 3.44 อาจเขียนให้อยู่ในรูปของ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ และ H/L ได้ดังต่อไปนี้

$$G = \left(\frac{g}{v} H/L \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.45$$

โดยที่

$$T = L/v$$

3.4.2 เวลาพักน้ำ (T)

เวลาพักน้ำของอุปกรณ์กวนเร็วแบบต่าง ๆ สามารถที่จะหาได้จาก

สมการที่ 3.7 สำหรับเวลาพักน้ำ สำหรับการกวนเร็วในท่ออาจหาได้จาก

$$T = \frac{L}{v} \quad 3.46$$

โดยที่

$$L = \text{ความยาวของท่อ}$$

$$v = \text{ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย