

บทที่ 1

บทนำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการครองชีพของมนุษย์ ปัจจุบันปัญหาน้ำเน่าเสีย เป็นปัญหาใหญ่ที่พบมาก ทำให้เกิดปัญหาต่อสภาวะแวดล้อม โดยลักษณะที่เห็นได้ชัดอย่างหนึ่งซึ่ง ทำให้น้ำเสียเป็นที่น่ารังเกียจคือ ความขุ่นหรือสารแขวนลอยในน้ำ ถ้าสามารถกำจัดความขุ่นหรือ สารแขวนลอยออกจากน้ำได้ ก็จะทำให้น้ำมีคุณภาพน้ำใช้ยิ่งขึ้น ความขุ่นของน้ำอาจกำจัดได้ง่าย หรือยาก ทั้งนี้แล้วแต่ขนาดของอนุภาคในน้ำ เช่นความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่ย่อม สามารถกำจัดออกไปได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดเล็ก เป็นต้น โดยความขุ่นที่สร้างปัญหาให้กับแหล่งน้ำ มักเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า “อนุภาคคอลลอยด์” (colloidal particle) เนื่องจากมีขนาด เล็กมากจนไม่สามารถเกิดการนอนก้น (sedimentation) ได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด

ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe(OH)₃ sol)¹⁻⁸ ก็เป็นคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่พบมากใน น้ำบาดาลและแม่น้ำลำคลองที่สร้างปัญหาและสังเกตได้ โดยมีสีน้ำตาลปนแดงปนเปื้อนตามฝ้าย ที่ซักกรีด อ่างล้างภาชนะรวมทั้งภาชนะต่างๆ และทุกที่ที่สัมผัสกับน้ำนั้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก ไอออนของเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายโดยน้ำใต้ดินมายังน้ำผิวดินในสถานะ Fe²⁺ ซึ่งอยู่ในรูปสาร ละลายใส ไม่มีสี จนกระทั่งถูกออกซิไดซ์เป็น Fe³⁺ โดยออกซิเจน ซึ่ง Fe³⁺ นี้จะทำปฏิกิริยากับเบส ในน้ำกลายเป็น Fe(OH)₃ sol ที่มีสีน้ำตาลปนแดงดังกล่าว ด้วยสภาพทางไฟฟ้าเนื่องจากประจุของ Fe(OH)₃ sol ในตัวกลาง จึงทำให้ Fe(OH)₃ sol เกิดการแขวนลอยในน้ำได้ นอกจากนี้ Fe(OH)₃ sol ยังสามารถดูดซับสารอื่นเช่น PO₄³⁻ ในน้ำทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำ เช่น สาหร่าย ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียตามมา

ถ้าอนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานๆ โดยไม่ตกตะกอนเรียก ได้ว่าเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง แต่ในทางสิ่งแวดล้อมทางน้ำจะไม่ต้องทำให้ระบบ คอลลอยด์ในน้ำมีเสถียรภาพสูงเพราะอนุภาคคอลลอยด์ทำให้น้ำขุ่นและสกปรก ดังนั้นจึงต้อง ทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์เพื่อทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดและน้ำหนัก มากขึ้น จนสามารถตกตะกอนได้ กระบวนการในการทำให้คอลลอยด์หลายๆ อนุภาคจับตัวกัน เป็นกลุ่มก้อนเนื่องจากประจุเรียกว่า “การจับก้อน” (coagulation)

1.1 ระบบคอลลอยด์⁹⁻¹⁸

ระบบคอลลอยด์ หมายถึงระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลาง ซึ่งมีสถานะเป็นเนื้อเดียว (homogeneous medium) โดยอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กๆ นี้เรียกว่าตัวถูกกระจาย (dispersed phase) ส่วนสารตัวกลางเรียกว่า “dispersed medium” โดยขนาดอนุภาคคอลลอยด์อยู่ระหว่าง 1 - 1000 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคของตัวถูกละลายในสารละลายแท้ (true solution) แต่เล็กกว่าสารแขวนลอยทั่วไป

ระบบคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวของสารทั้งสามสถานะได้ ดังแสดงในตาราง 1.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบคอลลอยด์ทั้งหมดมีเพียง 8 ประเภทต่างๆ ที่ควรเป็น 9 ประเภท ทั้งนี้เพราะแก๊สไม่สามารถเป็นได้ทั้งตัวกลางและอนุภาคคอลลอยด์ได้ เนื่องจากส่วนผสมของแก๊สทำให้เกิดสารละลายแท้เสมอ

ตาราง 1.1 การจำแนกประเภทของระบบคอลลอยด์ตามสถานะ¹⁰

อนุภาคคอลลอยด์	ตัวกลาง	ระบบคอลลอยด์	ตัวอย่าง
ของแข็ง	ของแข็ง	สารแขวนลอยของแข็ง (solid suspension)	ลูกกวาด พลาสติกสี หินสี
ของแข็ง	ของเหลว	ซอล (sols)	ยาสีฟัน คอลลอยด์อินทรีย์ เช่น Au, AgI, Fe(OH) ₃
ของแข็ง	แก๊ส	แอโรซอลของแข็ง (solid aerosols)	ควัน ฝุ่นละออง
ของเหลว	ของแข็ง	อิมัลชันของแข็ง (solid emulsion)	โอปอล ไข่มุก แก้วสี
ของเหลว	ของเหลว	อิมัลชัน (emulsion)	นํ้านม มายองเนส ยาครีม
ของเหลว	แก๊ส	แอโรซอลของเหลว (liquid aerosol)	หมอก ควัน สเปรย์
แก๊ส	ของแข็ง	โฟมของแข็ง (solid foam)	ขนมปัง โฟมแข็ง
แก๊ส	ของเหลว	โฟม (foam)	ฟองสบู่ วิฟครีม

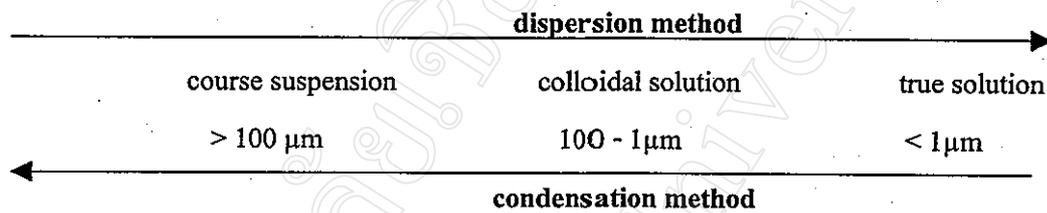
ระบบคอลลอยด์ อาจจำแนกตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวกลางและอนุภาคคอลลอยด์ ได้เป็นสองประเภท ดังนี้

ไลโอโฟบิกคอลลอยด์ (lyophobic colloid) เป็นระบบที่ตัวกลางและอนุภาคคอลลอยด์มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกันและกันน้อย ถ้าตัวกลางเป็นน้ำเรียกว่า ไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์ (hydrophobic colloid) ระบบไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์จึงหมายถึงไลโอโฟบิกคอลลอยด์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำและมีแรงยึดเหนี่ยวกับอนุภาคคอลลอยด์ต่ำ ดังนั้นระบบไลโอโฟบิกคอลลอยด์จึงมักไม่ค่อยคงตัว

ไลโอฟิลิกคอลลอยด์ (lyophilic colloid) เป็นระบบที่ตัวกลางและอนุภาคคอลลอยด์มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกันและกันมาก ถ้าตัวกลางเป็นน้ำ เรียกว่า ไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ (hydrophilic colloid) ระบบไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์จึงหมายถึงไลโอฟิลิกคอลลอยด์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำและมีแรงยึดเหนี่ยวกับอนุภาคคอลลอยด์สูง ในลักษณะนี้อนุภาคคอลลอยด์มักจะดูดซับน้ำเอาไว้ ดังนั้นระบบไลโอฟิลิกคอลลอยด์ จึงคงตัวมากกว่าระบบไลโอโฟบิกคอลลอยด์

1.1.1 การเตรียมสารละลายคอลลอยด์^{11,20,21}

สารละลายคอลลอยด์ชนิดนี้สามารถทำได้สองทางโดยวิธีการกระจาย (dispersion method) หรือวิธีการควบแน่น (condensation method) ดังแผนภาพในรูป 1.1

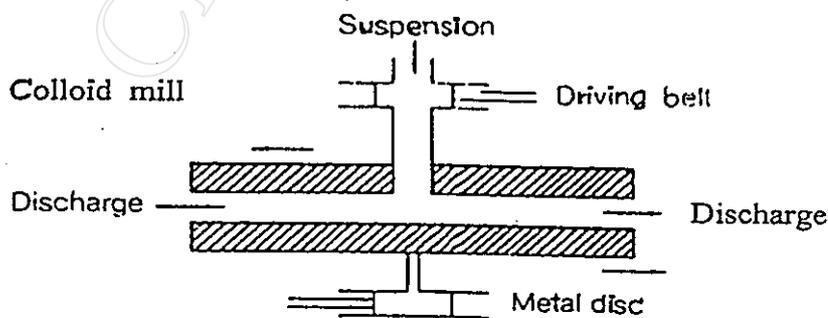


รูป 1.1 แผนภาพแสดงการลดหรือเพิ่มองศาการกระจายในการเตรียมคอลลอยด์

ก. วิธีการกระจาย (dispersion method)

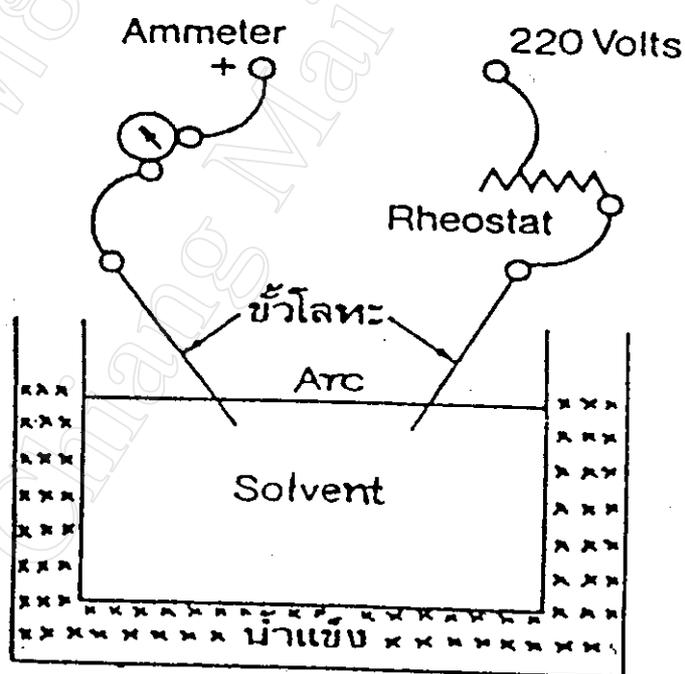
วิธีนี้เป็นการนำสารที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มาทำให้แตกสลายจนได้ขนาดอนุภาคคอลลอยด์ ได้แก่ การบด การกวน การตี เป็นต้น ตัวอย่างของวิธีนี้อาจทำได้ดังนี้

1) การกระจายแบบเชิงกล (mechanical dispersion) เป็นวิธีทำอนุภาคที่หยาบของสารแขวนลอยมีลักษณะละเอียดลง โดยนำไปบดในเครื่องโม่บด ดังรูป 1.2



รูป 1.2 ลักษณะของเครื่องโม่บดคอลลอยด์

2) การกระจายแบบใช้ไฟฟ้า (electro-dispersion)¹⁰ เตรียมโดยนำอาร์คไฟฟ้า (electric arc) ชนิด Bredig's arc ซึ่งอาศัยกระบวนการกลั่นตัวของไอ จากอะตอมของโลหะที่มีขนาดเล็กมาก โดยนำลวดโลหะที่ต้องการเตรียมคอลลอยด์ มาทำเป็นอิเล็กโทรด (electrode) โดยให้ปลายทั้งสองของอิเล็กโทรดต่อกับแบตเตอรี่ (30 - 40 V.D.C) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของอิเล็กโทรดจุ่มอยู่ในน้ำที่มีเบสอยู่เล็กน้อยและมีน้ำแข็งหล่อเย็นอยู่รอบๆ อิเล็กโทรด เมื่อนำอิเล็กโทรดทั้งสองมาแตะ จะเกิดเป็นอาร์คไฟฟ้าขึ้น ความร้อนจากการอาร์คนี้ ทำให้ปลายของลวดโลหะด้านที่สัมผัสกันร้อนจนกลายเป็นไอของโลหะ เกิดเป็นอนุภาคของโลหะขนาดเล็กมากซึ่งจะรวมตัวกันจนกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ของโลหะนั้น แขนงลวดจะจัดกระจายอยู่ในน้ำ ตัวอย่างเช่นนำลวดโลหะต่างๆ เช่น ทองคำ (Au) แพลตินัม (Pt) และซิลเวอร์ (Ag) จุ่มไว้ในน้ำเย็น ความร้อนจำนวนมากของการอาร์ค จะทำให้โลหะนั้นกลายเป็นของแข็งเมื่อได้รับความร้อน เดิมไซเคียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปเล็กน้อยเพื่อให้สารละลายคอลลอยด์อยู่ตัวดังรูป 1.3



รูป 1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำ Bredig's arc

3) การเปลี่ยนตัวทำละลาย เมื่อนำสารละลายแท้ผสมกับตัวทำละลายที่มีจำนวนมากเกินพออีกชนิดหนึ่ง ซึ่งตัวถูกละลายไม่ละลายจะได้สารละลายคอลลอยด์เกิดขึ้น เช่นเมื่อสารละลายแท้ของกำมะถันในอัลกอฮอล์ใส่ลงไปใต้น้ำที่มีปริมาณมากๆ จะได้คอลลอยด์ของกำมะถันเกิดขึ้น

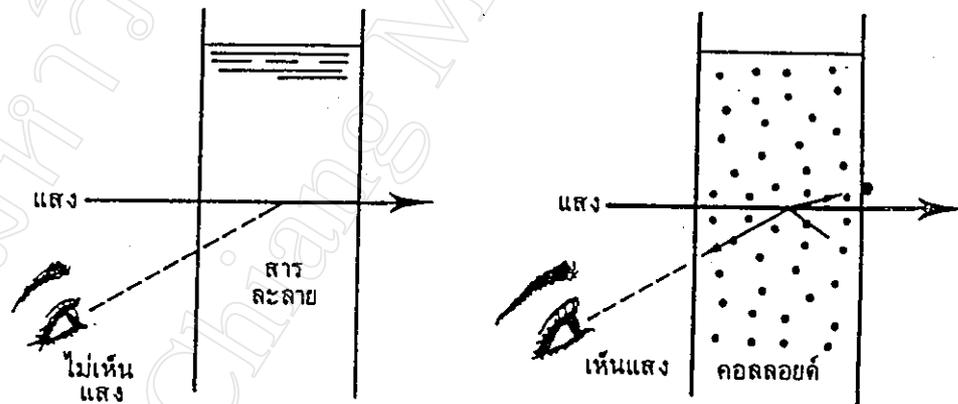
4) การทำให้เย็นจัด (excessive cooling) ตัวอย่างเช่น สารละลายคอลลอยด์ของน้ำแข็งในตัวทำละลายอินทรีย์ (กลอโรฟอร์มหรืออีเธอร์) ได้จากการทำให้โมเลกุลของน้ำในตัวทำละลายแข็งตัวจนเกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้น

1.2 สมบัติของคอลลอยด์²⁰

ระบบคอลลอยด์จัดเป็นเททวิวิหพันธ์ (heterogeneous phase) ที่ประกอบด้วย 2 วัฏภาค คือวัฏภาคที่กระจาย (dispersed phase) และวัฏภาคตัวกลาง (medium phase) อนุภาคคอลลอยด์มีสมบัติที่สำคัญอยู่ 3 ประการ ได้แก่

1.2.1 สมบัติทางแสง (optical properties)^{9, 10, 20}

สมบัติทางแสงเช่น ปรากฏการณ์ทินคอลล (Tyndall effect) เป็นสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของคอลลอยด์ซึ่งเกิดจากการกระเจิงแสง (scattering of light) โดยอนุภาคคอลลอยด์ ดังรูป 1.4



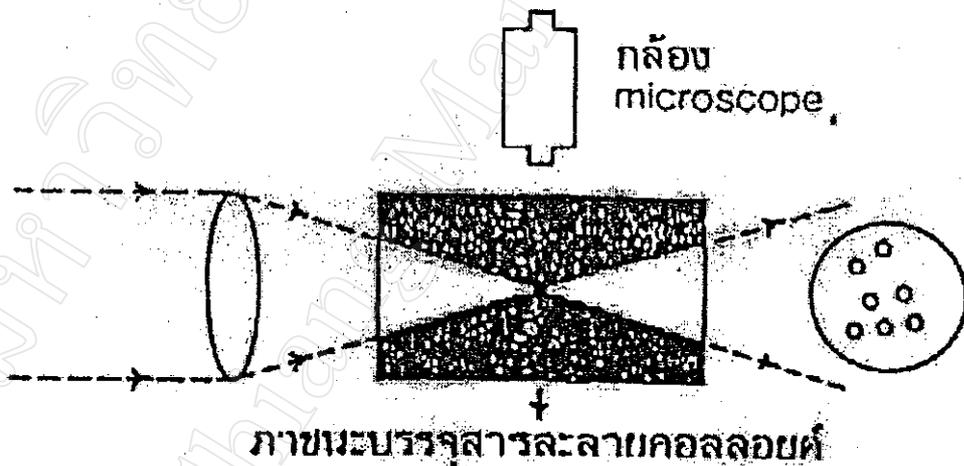
รูป 1.4 ปรากฏการณ์ทินคอลลในคอลลอยด์

เมื่อฉายแสงผ่านสารละลายแท้แสงจะผ่านตลอด แต่ถ้าฉายแสงผ่านระบบคอลลอยด์จะเห็นการกระเจิงของแสง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคต่างๆ ในสารละลายแท้มีขนาดเล็กมาก (~0.5 nm) เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของแสง (ความยาวคลื่นของแสงในช่วงที่เห็นได้ คือ 400-720 nm) จึงไม่เกิดการกระเจิงของแสง แต่ในระบบคอลลอยด์อนุภาคมีขนาดใหญ่และบางชนิดอาจ

ใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสง (1-1,000 nm) จึงเกิดการกระเจิงของแสงขึ้น ดังนั้นจากหลักการกระเจิงแสงของอนุภาคสาร สามารถบ่งชี้ได้ว่าของผสมเป็นสารละลายหรือเป็นคอลลอยด์ และใช้หาหน้าหนักโมเลกุลของโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น พอลิเมอร์หรือโปรตีนได้ และปรากฏการณ์เช่นเดียวกันนี้ ที่พบในชีวิตประจำวันได้แก่การที่ลำแสงพระอาทิตย์ ผ่านรูเล็ก ๆ ไปในห้องมืด อนุภาคของฝุ่นละอองจะกระจายลำแสงทำให้มองเห็นลำแสงได้

นอกจากนี้พบว่าอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กจนไม่อาจมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่สามารถกระจายแสงและมองเห็นลำแสง และมองเห็นเป็นจุดสว่างหรือเป็นวงกลมของแสง (discs of light) ติดกับพื้นดำเมื่อมองเห็นผ่านโดยใช้กล้องอัลตราไมโครสโคป (ultramicroscope)

ในปี ค.ศ.1903 Zsigmondy ได้ปรับปรุงกล้องชนิดนี้โดยอาศัยหลักการกระจายแสงของอนุภาคคอลลอยด์ การจัดการเครื่องมือ แสดงดังรูป 1.5 ลำแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีกำลังส่องสว่างมาจะถูกโฟกัสโดยเลนส์หลายๆอัน ผ่านเข้าไปในถังบรรจุ sol ใช้กล้องจุลทรรศน์ตั้งได้ฉากกับลำแสงเพื่อมองอนุภาคคอลลอยด์



รูป 1.5 กล้องอัลตราไมโครสโคป

ปฏิกิริยาคัดการกระเจิงแสง ที่เกิดขึ้นในสารละลายคอลลอยด์ สามารถวัดได้จากค่าความขุ่น (turbidity, T) ซึ่งเป็นการวัดอัตราส่วนของความเข้มแสงกระเจิงต่อความเข้มแสงตกกระทบ และค่าความขุ่นที่ได้ยังขึ้นกับ ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบซึ่งอยู่ในรูปของส่วนกลับยกกำลังสี่ $(1/\lambda)^4$ ที่มีต่อความเข้มแสงที่ถูกกระเจิง จะเห็นว่าแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะถูก

กระเจิงได้มากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ในกรณีท้องฟ้าปรากฏแสงสีฟ้าในเวลากลางวัน เนื่องจากแสงอาทิตย์ในช่วงแสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นจะถูกกระเจิงโดยอนุภาคในบรรยากาศมากกว่าแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่า นอกจากนี้ค่าความขุ่น (τ) ยังขึ้นกับความเข้มข้นและมวลโมเลกุลของสารละลายคอลลอยด์ที่ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tau = HCM \quad (1)$$

เมื่อ H เป็นค่าคงที่ ; C เป็นความเข้มข้น ; M เป็นมวลโมเลกุลของคอลลอยด์

เมื่อลำแสงตกกระทบสารละลายใดๆ จะเกิดการหักเห (refraction) การสะท้อน (reflection) การดูดกลืน (absorption) และการส่งผ่าน (transmission) แสงเกิดขึ้น จาก กฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) จะได้ว่า

$$I_t = I_0 \exp(-\epsilon bC) \quad (2)$$

เมื่อ I_0 เป็นความเข้มแสงที่ตกกระทบบนสารละลายที่มีความเข้มข้น $C, \text{ mol dm}^{-3}$, I_t เป็นความเข้มแสงที่ผ่านออกมา, b เป็นระยะที่แสงผ่าน (path length) และ ϵ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient)

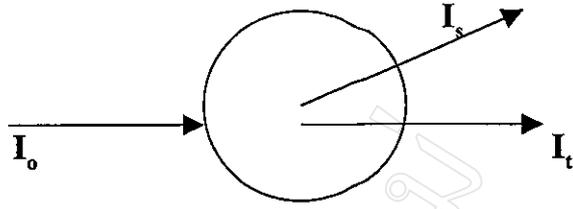
ในกรณีของสารละลายคอลลอยด์พบว่า มีการกระเจิงแสงเกิดขึ้นทุกทิศทางมากกว่าการดูดกลืนแสง โดยความเข้มของการกระเจิงแสง (I_s) มีผลทำให้ความเข้มแสง (I_t) ที่ส่งผ่านออกมามีค่าน้อยลง (โดย $I_s = I_0 - I_t$) เครื่องมือวัดการกระเจิงแสง จะวัดอัตราส่วนของความเข้มแสงผ่าน (transmitted light) ต่อความเข้มแสงเข้า (incident light) เป็น I_t/I_0 โดยที่

$$\epsilon_{\text{abs}} = -\ln \left[\frac{I_t}{I_0} \right] \quad (3)$$

เมื่อ ϵ_{abs} คือ absorbance per unit optical

เนื่องจากการกระเจิงแสงไม่ใช่การดูดกลืนแสง แต่ความเข้มการผ่านแสงเท่ากับความเข้มแสงเริ่มต้น (I_0) ลบด้วยความเข้มการกระเจิงแสงทุกทิศทาง (I_s) ดังรูป 1.6

$$I_t = I_0 - I_s \quad (4)$$



รูป 1.6 การกระเจิงแสง โดยสารละลายคอลลอยด์ (ปริมาณแสงที่ถูกกระเจิงในทิศทางต่างๆ $I_s - I_t$ ในที่นี้แสดงไว้เพียงทิศทางเดียว)

เมื่อรวมสมการ (2) และ (3) จะได้

$$\epsilon_{\text{abs}} = -\ln \left[\frac{I_0 - I_s}{I_0} \right] \quad (5)$$

$$\epsilon_{\text{abs}} = -\ln \left[\frac{1 - I_s}{I_0} \right] \quad (6)$$

$$\epsilon_{\text{abs}} = \frac{I_s}{I_0} \quad (7)$$

เมื่อวัดปริมาณแสงที่ลดลงเนื่องจากการกระเจิงแสง เรียกอัตราส่วน I_s/I_0 นี้ว่าค่าความขุ่น (τ) แทนค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) โดย

$$I_s/I_0 = \sum_{\text{all angles}} \frac{i_s}{i_0} \quad (8)$$

ส่วนค่าการดูดกลืนแสง (A) หาได้จาก

$$A = \epsilon bc = -\log \left[\frac{I_t}{I_0} \right] \quad (9)$$

เมื่อ A คือค่าการดูดกลืนแสง, ϵ คือโมลาร์แอบซอร์ปติวิตี, b คือความหนาของเซลล์ (cm) และ C คือความเข้มข้น (mol/dm^3)

เอาสมการ (2) แทนในสมการ (9) จะได้

$$A = -\log \left[\frac{I_0 - I_s}{I_0} \right] \quad (10)$$

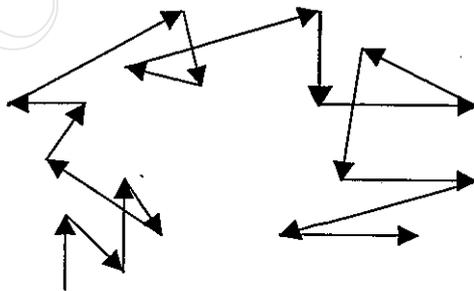
$$A = -\log \left[\frac{1 - I_s}{I_0} \right] \quad (11)$$

$$A = \frac{I_s}{I_0} \quad (12)$$

จะเห็นว่าสมการ (12) เท่ากับสมการ (7) ดังนั้น จึงสามารถวัดค่าความขุ่นในเทอมของการดูดกลืนแสงได้

1.2.2 สมบัติทางจลนศาสตร์ (kinetic properties)^{10,22}

ก. การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) ในปี ค.ศ.1927 Robert Brown นักพฤกษศาสตร์ได้ค้นพบว่า ละอองเกสรดอกไม้อยู่ในน้ำสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะพบในอนุภาคคอลลอยด์ด้วยเมื่อมองด้วยกล้องอัลตราไมโครสโคป การเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นรูปซิกแซก (zig-zag motion) เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการปะทะกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์และโมเลกุลของตัวกลาง (dispersion medium) อย่างไม่ก็ตาม ถึงแม้ว่าอนุภาคจะมีขนาดเล็กเท่าใดก็ตาม การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน อาจทำให้อนุภาคเข้ามาใกล้กัน และมารวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นได้ ถ้ามีแรงดึงดูดอื่นมาช่วยเสริม เช่น มีแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals' force) เกิดขึ้นร่วม ทำให้มีแรงดึงดูดที่มากกว่าแรงผลักรันระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคจะรวมตัวกันได้ เมื่ออนุภาคมีการรวมตัวกันใหญ่ขึ้น โอกาสที่จะตกตะกอน โดยแรงดึงดูดของโลกย่อมเกิดขึ้นได้ และมีผลทำให้การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนลดลงด้วย ซึ่งถ้าพิจารณาการที่ของอนุภาคแบบการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเฉพาะในหนึ่งมิติจะมีลักษณะดังรูป 1.7



รูป 1.7 การเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์แบบ Brownian movement

ข. ความหนืด (viscosity) เป็นการวัดการต้านทานการเคลื่อนที่ของของไหล ต่อแรงเฉือนภายนอก (applied shearing force) ในสารละลายคอลลอยด์ส่วนใหญ่มีความหนืดสูงแม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำเนื่องจากขนาดของอนุภาค จะทำให้การไหลของคอลลอยด์เกิดได้ยากขึ้น การวัดความหนืดเป็นเทคนิคที่ง่ายและถูกที่สุดสำหรับการจำแนกขนาด และรูปร่างของสารโมเลกุลขนาดใหญ่

ในปี ค.ศ. 1906 ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้แสดงให้เห็นว่าความหนืดของสารละลายสัมพันธ์กับขนาด และมวลโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายดังสมการ

$$[\eta] = K [\bar{M}_v]^a \quad (13)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากการทดลอง ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย
 a เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับรูปร่างและรูปทรงเรขาคณิตของตัวถูกละลาย
 \bar{M}_v เป็นมวลโมเลกุลเฉลี่ยของความหนืดของตัวถูกละลาย

ค. การแพร่ (diffusion) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ โดยการเคลื่อนย้ายอนุภาคเพื่อให้ระบบมีความเข้มข้นเท่ากันทั้งระบบ โดยการแพร่จะเกิดจากด้านที่มีความเข้มข้นมากไปยังด้านที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าเสมอ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก thermal motion ของโมเลกุล ขณะเกิดการแพร่ของอนุภาคจากสารละลายเข้มข้น (C_1) ผ่านพื้นที่ (A) ไปยังสารละลายเข้มข้น (C_2) จะเกิดฟลักซ์ของการเคลื่อนที่ (flux, J) ของการเคลื่อนที่ ซึ่ง J แปรผันตรงกับเกรเดียนต์ (gradient) ของความเข้มข้นที่ระยะใดๆ

$$J \propto \frac{dC}{dX} = -D \frac{dC}{dX} \quad (14)$$

เมื่อ D เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) ซึ่งจาก Stoke's law มีค่าเท่ากับ

$$D = \frac{kT}{f} \quad (15)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่โบลท์ซมานน์ (Boltzmann's constant) และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์
 f คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (frictional coefficient) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$f = 6 \eta r \quad (16)$$

โดยที่ η คือ ความหนืดของสารละลาย และ r คือ รัศมีของอนุภาค

ง. การนอนก้น (sedimentation) หลักการง่ายๆ ของวิธีนี้คือ การนำสารละลายคอลลอยด์ใส่ในหลอดทดลองตั้งทิ้งไว้ หรือนำไปเหวี่ยงในเครื่องเหวี่ยงด้วยความเร็วเชิงมุมที่คงที่ จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ลงสู่ก้นหลอดทดลองตามแรงโน้มถ่วงของโลก ที่สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของกลุ่มคอลลอยด์เหล่านี้ได้ โดยอาศัยสมบัติทางแสงของสารละลายที่อาจทำได้หลายวิธีคือ

- การนอนก้นโดยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational sedimentation) เกิดขึ้นจากการที่อนุภาคที่เคลื่อนที่แบบบราวเนียน เกิดการชนกัน (collision) และมีอันตรกิริยาทำให้เกิดการรวมตัวกันและเคลื่อนที่ลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก สำหรับอนุภาคที่มีมวล m พบว่าขนาดของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้น ขึ้นกับมวลและแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากจะเกิดแรงหนีศูนย์กลางแล้วยังพบว่ามีความพยุงตัว (bouyancy) ของอนุภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวทำละลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำเกิดขึ้นด้วย ขนาดของแรงพยุงตัวนี้น้อยกว่าขนาดของแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคสู่ก้นหลอดทดลอง

- การนอนก้นโดยแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal sedimentation) ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบกับ การนอนก้น โดยแรงโน้มถ่วงของโลกกับการเหวี่ยงสารละลายคอลลอยด์ในเครื่องเหวี่ยงด้วยความเร็วคงที่ พบว่ามีแรงหนีศูนย์กลางเกิดขึ้นบนอนุภาคที่มีมวล (m) เช่นเดียวกัน แต่ขนาดของแรงขึ้นกับมวลและความเร่งเชิงมุมของการเหวี่ยง

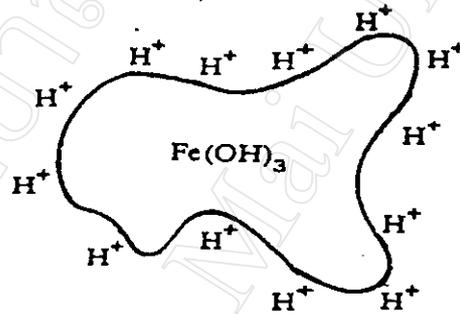
1.2.3 สมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties)²¹

อนุภาคของสารละลายคอลลอยด์บางประเภทมีประจุไฟฟ้าอยู่ที่ผิว ซึ่งอาจเป็นบวกหรือลบ ส่วนตัวกลางจะมีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และมีจำนวนประจุเท่ากันจึงทำให้สารละลายคอลลอยด์เป็นกลาง ประจุเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการคงตัวของระบบคอลลอยด์ เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุเหมือนกันจึงผลักกันและจะไม่รวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นสารละลายคอลลอยด์จึงอยู่ตัวและไม่ตกตะกอน อนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบได้แก่ As_2S_3 , อนุภาคทองคำ เงินและแพลตินัม ส่วนอนุภาคที่มีประจุบวกได้แก่อนุภาคของ ferric hydroxide, aluminium hydroxide เป็นต้น ซึ่งประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาคคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นได้ 4 แบบ ดังนี้

ก. การแตกตัวเป็นไอออน (direct ionization) เช่น โปรตีนที่อยู่ในสารละลายจะมีทั้งประจุบวก ($-NH_4^+$) และประจุลบ ($-COO^-$) ในโมเลกุลเรียกว่า amphoteric electrolytes ส่วนอนุภาคคอลลอยด์ของสารละลายโปรตีนอาจเป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ (monomolecule) หรือโมเลกุลใหญ่ (polymolecule) ก็ได้ การที่โปรตีนมีประจุบวกหรือลบขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายที่มีผลต่อค่า pI

ของโปรตีนนั้นเช่น ถ้า pH มีค่ามากกว่า pI ของโปรตีน อนุภาคโปรตีนในสารละลายคอลลอยด์จะมีประจุลบ หรือถ้า pH มีค่าน้อยกว่า pI ของโปรตีน อนุภาคของโปรตีนจะมีประจุบวกเท่ากับประจุลบมีผลทำให้ประจรรวมสุทธิ (net charge) เท่ากับศูนย์ เรียกว่า Zwitter ion

ข. การดูดซับไอออน (ion adsorption) อนุภาคคอลลอยด์บางชนิดสามารถดูดซับไอออนจากสารละลายไว้ที่ผิวได้ การมีประจุโดยวิธีนี้อนุภาคคอลลอยด์จะมีประจุบวกหรือลบขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่ถูกดูดซับ (selective adsorption) อยู่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์นั้น เช่น อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดูดซับ H^+ ไว้ที่ผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูป 1.8

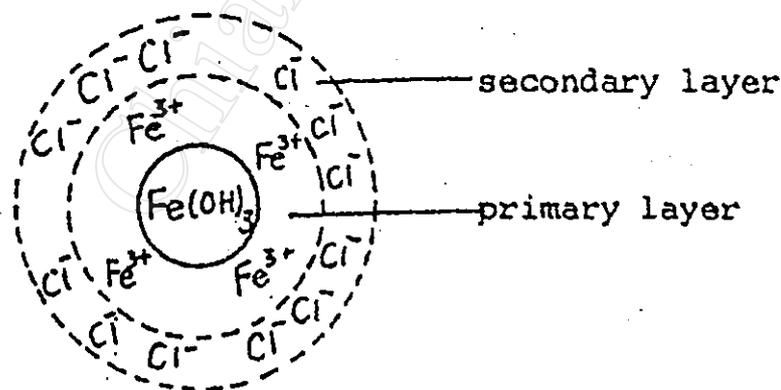


รูป 1.8 ระบบคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่เสถียรโดยการดูดซับ H^+ ไว้ที่ผิวของอนุภาค

ค. การดูดซับและการจัดตัวของไดโพล (adsorption and orientation of dipoles) ถ้าโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จะทำให้เกิดประจุบนผิวของอนุภาค ส่วนจะเป็นประจุชนิดใดขึ้นอยู่กับการจัดตัวของอนุภาค โมเลกุลเข้าที่หาอนุภาคคอลลอยด์ และความสามารถในการเกิดสภาพขั้ว (polarizability) โมเลกุลที่จับกับอนุภาคคอลลอยด์ เช่น ถ้าประจุบวกจัดตัวเข้า และถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาค ส่วนที่มีประจุลบ จะจัดตัวออกแวนลอยอยู่ในตัวกลาง ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีประจุลบ ในทางตรงกันข้าม

ถ้าประจุลบจัดตัวและถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ประจุบวกก็จะจัดตัวออก
 แขนงลอยอยู่ในตัวกลาง ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีประจุบวก อนุภาคคอลลอยด์มีอัตราส่วนพื้นผิว
 (surface area) ต่อมวลมากที่สุด ตัวอย่างเช่น เกลือแกง 1 กรัม โมลหนัก 58 กรัม เมื่อทำให้มี
 ลักษณะเป็นรูปลูกบาศก์ จะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 54 ตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาแบ่งให้เป็น
 ลูกบาศก์ ที่มีขนาดเท่าอนุภาคคอลลอยด์ 10 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวทั้งหมด 16,000 ตารางเมตร
 ซึ่งในหนึ่งลูกบาศก์ หรือ 1 อนุภาค จะมีอนุภาคเกลือแกงอยู่ประมาณ 20,000 อนุภาค จะเห็นได้ว่า
 อนุภาคอยู่ในขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ จะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นถึงสามล้านเท่าและมีแรงดึงดูด
 เพิ่มขึ้นถึงสามล้านเท่าด้วย

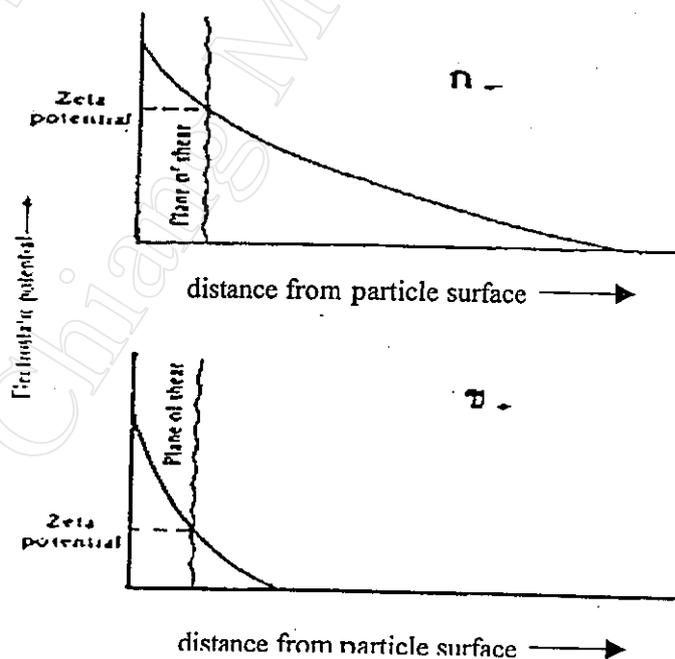
ง. ชั้นชั้นของประจุ (electrical double layer) ของอนุภาคคอลลอยด์^{12,22} เป็นการ
 อธิบายสมบัติของอนุภาคคอลลอยด์ ที่มีประจุอยู่ที่ผิว โดยอธิบายความสัมพันธ์ของประจุบนผิว
 ของอนุภาคคอลลอยด์กับชั้นของประจุตรงข้ามว่า มีประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดูดซับ
 ประจุตรงข้ามจากตัวกลางทำให้เกิดชั้นชั้นเคลื่อนที่ (diffuse layer) ของประจุเพิ่มมาอีกทีหนึ่ง
 ประจุที่อยู่ด้านใน (ประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์) จะกลายเป็นประจุที่ไม่เคลื่อนที่ (fixed
 layer) ส่วนประจุที่อยู่ด้านนอกสุดจะเป็นประจุที่เคลื่อนที่ได้ (mobile layer) ความสามารถในการ
 เคลื่อนที่ของประจุจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อประจุห่างจากผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มมากขึ้น ถ้าผิว
 ของอนุภาคคอลลอยด์มีประจุบวก ชั้นของประจุที่เคลื่อนที่ได้ก็จะเป็นประจุลบ ไอออนลบนี้เรียก
 ว่าไอออนล้อมรอบ (counter ion) ดังรูป 1.9



รูป 1.9 ชั้นชั้นของประจุของอนุภาคคอลลอยด์

ความหนาแน่นของไอออนลบจะสูงสุดในบริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์และลดน้อยไปตามระยะห่างจากอนุภาค ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบวกของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป ณ ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์ ทำให้การกระจายตัวของไอออนบวกและลบเป็นไปตามปกติ โดยไอออนลบชั้นในสุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เพราะไอออนลบมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุด (ซึ่งขึ้นกับขนาดของไอออน) คล้ายมีเปลือกทรงกลมบางที่มีความหนาเท่ากับ Ω กั้นขวางอยู่ เปลือกหรือชั้นบางนี้เรียกว่าชั้นสเตอร์น (Stern layer) และถือว่าเป็นชั้นใน

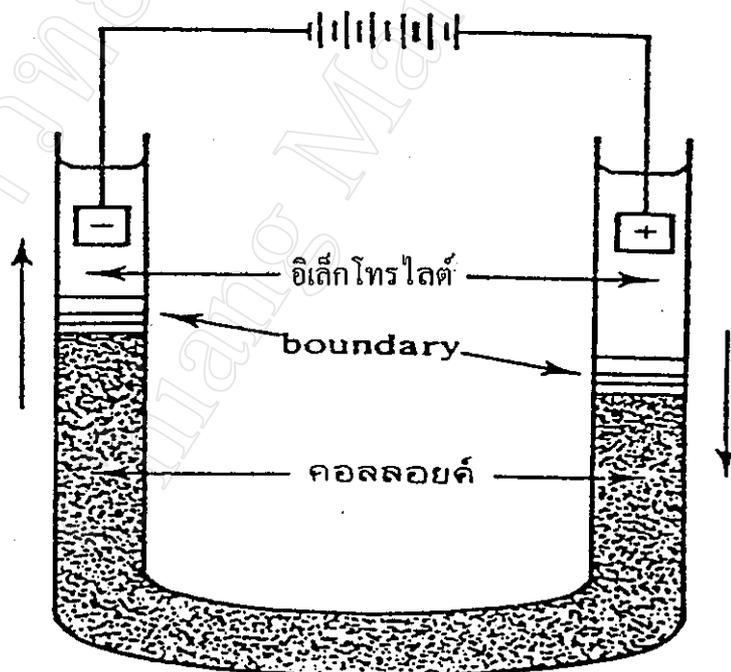
ศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นในมีค่าเท่ากับ Stern potential ส่วนเปลือกชั้นนอกมีชื่อเรียกว่าชั้นกระจาย (diffuse layer) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นใน ไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์) ขนาดของประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ หรือศักย์ไฟฟ้าของเน็ตสไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถวัดที่จุดอื่นซึ่งไม่ใช่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ โดยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ในสนามไฟฟ้า และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้เรียกว่าศักย์ซีตา (zeta potential, ζ) ดังรูป 1.10



รูป 1.10 ศักย์ซีตาที่ระยะต่างๆ จากผิวอนุภาค

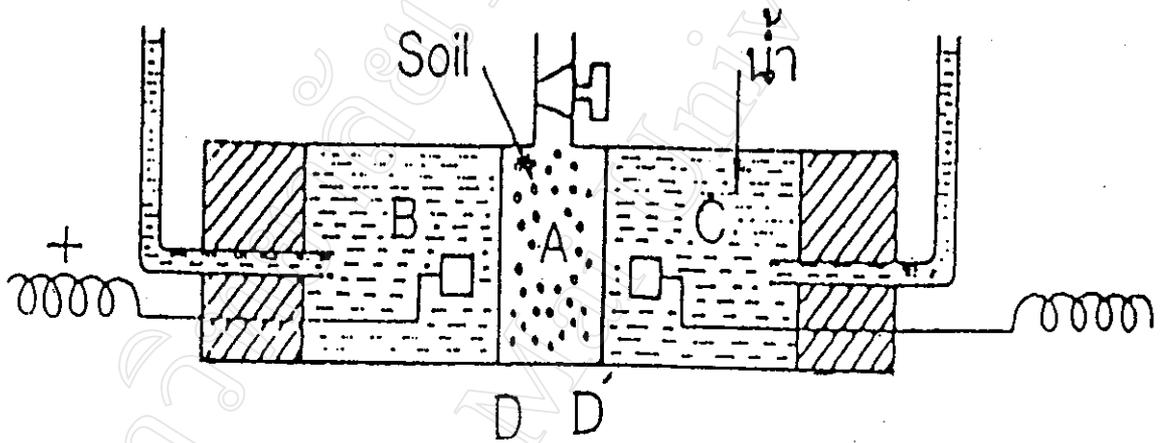
ซึ่งการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำได้โดยเทคนิค ดังนี้

ก. อิเล็กโทรโฟรีซิส (electrophoresis) เป็นการศึกษาถึงการเคลื่อนย้ายของไอออน ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก เพื่อใช้ในการศึกษาขนาด และรูปร่างของอนุภาค กระบวนการอิเล็กโทรโฟรีซิสไม่ขึ้นกับมวลโมเลกุล แต่ขึ้นกับประจุของตัวถูกละลายและเป็นเทคนิคที่ใช้แยกสารออกจากของผสม เช่น แยกกรดอะมิโนออกจากโปรตีน เป็นต้น ดังนั้นสมบัติของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าจึงแสดงแสดงโดยปรากฏการณ์ อิเล็กโทรโฟรีซิสได้ ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ไปยังขั้วลบหรือขั้วบวกภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า สารละลายคอลลอยด์บรรจุอยู่ในรูปถ้วยซึ่งมีขั้วทำด้วยทองคำขาว เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป อนุภาคคอลลอยด์ที่ประจุจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วที่มีประจุตรงกันข้าม เช่น ถ้าบรรจุ arsenius sulphide sol ลงไปในหลอดรูปถ้วย อนุภาคคอลลอยด์จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ดังนั้น ถ้าสังเกตทิศทางของอนุภาคคอลลอยด์ในสนามไฟฟ้า ก็จะทราบของประจุคอลลอยด์ได้ ดังรูป 1.11



รูป 1.11 อุปกรณ์สำหรับการทำอิเล็กโทรโฟรีซิส

ข. อิเล็กโทรออสโมซิส (electroosmosis) เป็นเทคนิคทางไฟฟ้าอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้หา ค่าศักย์ซีตา (ζ) ในระบบคอลลอยด์จากการติดตามการเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย โดยผ่านสารละลายเข้าไปในอิเล็กโทรออสโมมิเตอร์ (electroosmometer) เนื่องจากตัวกลางมีประจุไฟฟ้าด้วย ถ้าอนุภาคคอลลอยด์อยู่นิ่ง ตัวกลางจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วที่มีประจุตรงข้าม ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า “อิเล็กโทรออสโมซิส” เครื่องมืออย่างง่าย ดังรูป 1.12

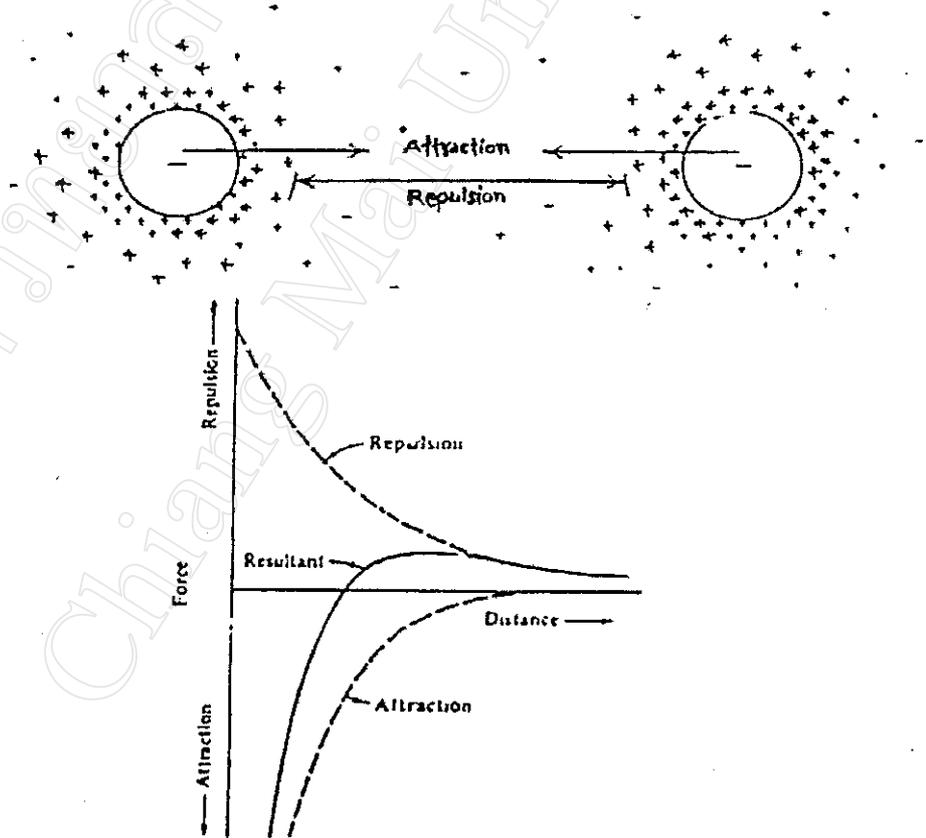


รูป 1.12 อุปกรณ์สำหรับการทำอิเล็กโทรออสโมซิส

ซึ่งบรรจุส่วนที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ใน A ซึ่งแบ่งแยกจาก B และ C โดยมีแผ่นเยื่อ (dialysing membrane) D และ D' ในส่วน B และ C บรรจุน้ำจนถึงระดับที่กำหนดไว้ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า เข้าไปที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ใกล้เยื่อ D และ D' สังเกตดูระดับของเหลวใน B และ C จะเห็นว่าระดับของเหลวจะลดลงข้างหนึ่งและจะเพิ่มอีกข้างหนึ่ง เนื่องจากการไหลของน้ำผ่านเยื่อ D และ D' ทิศทางการไหลของน้ำขึ้นอยู่กับประจุของคอลลอยด์ สำหรับ sol ที่มีประจุบวก ตัวกลางจะมีประจุลบ และการไหลจะไหลจาก C ไปยัง B สำหรับสารละลายคอลลอยด์ที่มีประจุลบ ด้าน C จะมีระดับสูงขึ้น

1.3 เสถียรภาพของคอลลอยด์^{9, 10, 12, 22, 23}

ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ ดังได้กล่าวแล้วว่าคอลลอยด์นั้นถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในเวลาสั้น เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวจากน้ำก็ถือว่าเสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป ด้วยเหตุนี้เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคจะต้องสูงกว่าแรงดึงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อน (coagulation) ระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือศักย์ซีตา (zeta potential) ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังแสดงในรูป 1.13



รูป 1.13 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ⁵

จะเห็นได้ว่าแรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักร์ต่อเมื่อ อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ๆ แต่โดยปกติแล้วแรงผลักร์ซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าเหมือนกันที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ จะผลักร์กันและไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาใกล้กันจนเกิดการรวมตัวเข้าหากันและเกิดเป็นอนุภาคใหญ่ จะเห็นว่าอาจจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจัดกระจายอยู่นั้นรวมตัวหรือจับรวมกันเป็นก้อนได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่ม pH ของสารละลายคอลลอยด์ หรือการใส่สารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น อิเล็กโทรไลต์ลงไป

สารละลายคอลลอยด์ ที่มีความแรงไอออน (ionic strength) สูงๆ จะเกิดบรรยากาศไอออนที่หนาแน่น เป็นผลให้ความหนาของชั้นซันชันมีค่าต่ำ ส่งผลให้แรงผลักร์มีค่าน้อยมาก ทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากขึ้น จนเกิดการจับก้อนและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขึ้นในระบบคอลลอยด์ การเพิ่มความแรงของไอออน สามารถทำได้โดยการเติมไอออนที่มีสภาพประจุสูง เรียกว่า flocculating agent ตามกฎของซูลซ์ฮาร์ดตี (Schulze-Hardy rule) ที่ว่า การเกิดการจับก้อนของคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำจะมีประสิทธิภาพสูงนั้น ขึ้นอยู่กับวาเลนซี (valency) ของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของตัวกลาง ดังนั้นเมื่อเติมไอออนที่มีประจุนิดตรงข้ามที่มีค่าประจุมากๆ อนุภาคของคอลลอยด์จะจับไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ทำให้เกิดประจุที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง อนุภาคที่เป็นกลางนี้จะเกิดการจับก้อนและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลสุดท้ายจะตกตะกอนออกมา การรวมตัวเป็นก้อนของ sol ที่มีประจุลบ เช่น As_2O_3 นั้น Al^{3+} จะให้มีผลดีมากกว่า Ba^{2+} หรือ Na^+ และการรวมตัวกันเป็นก้อนของ sol ที่มีประจุบวก เช่น ferric hydroxide นั้น PO_4^{3-} จะให้มีผลดีมากกว่า SO_4^{2-} หรือ Cl^- โดยที่ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่จำเป็นในการเกิดการจับก้อน เรียกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการจับก้อน (critical coagulation concentration, CCC) จะเห็นว่าอิทธิพลหลักของชั้นซันชันประจุคือ การทำให้เกิดเสถียรภาพทางจลนพลศาสตร์ในระบบ ซึ่งถูกทำลายได้เฉพาะเมื่อเกิดการชนด้วยพลังงานพอเพียงที่สามารถทำลายชั้นซันชันของไอออน นอกจากนี้ยังอาจถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิสูงซึ่งจะเห็นได้จากการตกตะกอนเมื่อถูกทำให้ร้อน อิทธิพลของชั้นซันชันประจุยังช่วยปกป้องอนุภาคอื่นๆ ในกรณีที่ไอออนบางชนิด ไม่ได้ถูกแยกออกในกระบวนการทำให้สารบริสุทธิ์โดยกระบวนการไดอะไลซิส

การวัดเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์อาจทำได้โดย การหาเศษส่วนเสถียรภาพ (stability ratio, W) จากการสร้างและการแก้สมการสำหรับการชนกันของอนุภาคเนื่องจากการแพร่ (diffusive collision) ตามทฤษฎีเสถียรภาพคอลลอยด์ของสโมลูชาวสกีและฟุคส์ (Smoluchowski - Fuchs) โดยที่เศษส่วนเสถียรภาพ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคที่เกิด

การแพร่ (rate of diffusion - controlled interparticle collision) ต่ออัตราการชนกันระหว่างอนุภาคที่มีอันตรกิริยาต่อกัน (rate of interaction - force - controlled interparticle collision)

$$W = \frac{\text{อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคที่เกิดการแพร่}}{\text{อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคที่มีอันตรกิริยาต่อกัน}} \quad (17)$$

ถ้าสมมติว่าการชนกันระหว่างสองอนุภาค ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคที่ชนกัน อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคที่เกิดการแพร่ จะสอดคล้องกับการจับก้อนแบบที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (rapid หรือ fast coagulation rate, f) คือ ทุกๆ ครั้งที่มีการชนกันแล้วเกิดการจับก้อนขึ้นนั่นเอง เนื่องจากการแพร่ที่เกิดขึ้นที่เป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน จะถูกซ่อนไว้โดยตัวกั้นพลังงาน (energy barrier)

ส่วนอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคที่มีอันตรกิริยาต่อกัน จะสอดคล้องกับการจับก้อนแบบที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ (slow coagulation rate, s) คือทุกๆ ครั้งที่มีการชนกันไม่ทำให้เกิดการจับก้อนทั้งหมด) ซึ่งสามารถหาอัตราการจับก้อนที่เร็วสุด (f) และอัตราการจับก้อนที่ช้า (s) ได้จากกราฟที่พล็อตระหว่างค่า $\log [\text{electrolyte}]$ กับ initial rate of coagulation แล้วหาเศษส่วนเสถียรภาพจากสมการดังนี้

$$W = \frac{\text{อัตราการจับก้อนที่เร็วสุด}}{\text{อัตราการจับก้อนที่ช้า}} \quad (18)$$

$$= \frac{f}{s} \quad (19)$$

ดังนั้น ถ้า W มีค่ามาก หมายความว่า จะเกิดคิสเพอร์ชันซึ่งส่งผลให้เกิดการจับก้อนอย่างช้า ๆ แต่ถ้า W มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่าการจับก้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

นอกจาก W เป็นตัวบอกเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้ว ยังเป็นฟังก์ชันของสมบัติของคิสเพอร์ชันที่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแรง (strength) ของแรงที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและตัวกั้นพลังงานที่จะกั้นการจับก้อนอีกด้วย ค่าของ W อาจหาได้จากการทดลองวัดอัตราของการจับก้อน ซึ่งพบว่าค่าของ W ที่ความเข้มข้น C ใด ๆ อาจเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\log W = K_1 \log C + K_2 \quad (20)$$

จากนั้นนำค่า $\log W$ มาพล็อตกับ $\log [\text{electrolyte}]$ แล้วหา CCC จากจุดตัดกันของเส้นกราฟที่เป็น อัตราการจับก้อนที่ช้ากับอัตราการจับก้อนที่เร็วสุด

1.4 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์⁵

ดังได้กล่าวไปแล้วว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักรวมและแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลักรวมเกิดจากศักย์ไฟฟ้าซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนแรงดึงดูดเป็น van der Waals force ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและของโมเลกุล แรงผลักรวมซึ่งมากกว่าแรงดึงดูดทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ถ้าแรงดึงดูดสูงกว่าแรงผลักรวมอนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ และไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ ดังนี้

ก. การลดความหนาของชั้นซ้อนประจุ (diffuse layer)

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวนเคาน์เตอร์ไอออน (Counter Ion) ในชั้นซ้อนประจุ ผลที่เกิดขึ้นคือ ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ศักย์ซีตาลลดลงตามไปด้วย (ดูรูป 1.14) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่าง ๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจาย (ซึ่งเท่ากับลดศักย์ซีตาล) ไม่เท่ากัน ปรากฏว่าไอออนที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 1, 2, และ 3 มีอำนาจดังกล่าวเป็นสัดส่วน 1:10:1000 ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น Al^{3+} จะให้ผลดีกว่า Ca^{2+} ถึง 1000 เท่า (ดูรูป 1.14) ข้อสังเกตที่ควรตระหนักคือไอออนบวกต่าง ๆ ดังกล่าวมิได้ดำรงอยู่ในน้ำอย่างอิสระ เนื่องจากไอออนบวกเหล่านี้ มักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ เช่น Al^{3+} มีน้ำ 6 โมเลกุลจับกันอยู่ เรียกว่าสารประกอบเชิงซ้อนของน้ำ (hydration) และควรเขียนให้ถูกต้องดังนี้ คือ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ อย่างไรก็ตามการเขียนสูตรโมเลกุลของน้ำ โดยถือว่าเป็นที่เข้าใจกันแล้ว การที่ Al^{3+} หรือโลหะอื่น ๆ มีน้ำจับรวมอยู่ด้วยเป็นข้อเสียเพราะจะทำให้ไอออนบวก (ของโลหะ) ไม่สามารถดูดซับผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนเกราะป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับไอออนบวก ไอออนบวกต่าง ๆ จึงออกันอยู่ในชั้นซ้อนประจุและไม่สามารถทำลายประจุลบของคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร การลดโมเลกุลของน้ำในสารประกอบชอนน้ำ ช่วยทำให้ไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ หรือ $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_4^+$ สามารถเกาะติดบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้ แต่ $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ ไม่สามารถกระทำได้ ด้วยเหตุนี้รูป 1.14 (ค) จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ หรือ $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ หรือสารเชิงซ้อนอื่น ๆ

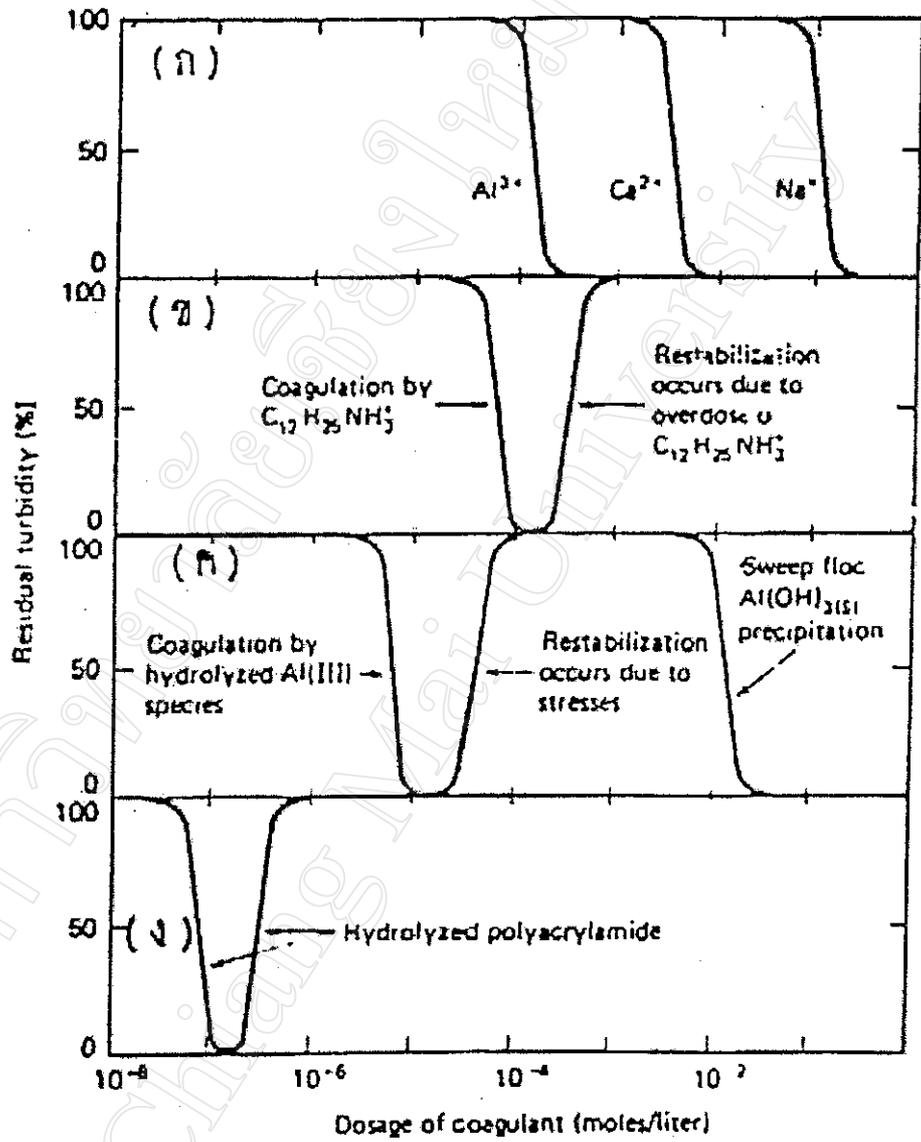
ใช้ปริมาณน้อยกว่า Al^{3+} ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายการเติมสารละลายของเกลือต่าง ๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้ คือ ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นซ้อนประจุ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์ และไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (charge reversal) (ดูจากรูป 1.14 ก. เปรียบเทียบกับรูป 1.14 ข - ง.)

ข. การทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (กลไกแบบดูดซับบนผิว) (adsorption charge neutralization) สารเคมีบางหมู่สามารถดูดซับบนผิว (adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับของคอลลอยด์ การดูดซับผิวจะมีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดซับบนผิวนี้นี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก (ซึ่งไอออนต่างประจุหรือ counter ion อยู่ในชั้นกระจายโดยไม่ดูดซับผิวของอนุภาคคอลลอยด์) 3 ประการ ดังนี้

ประการแรกกลไกแบบดูดซับผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ ยก ตัวอย่างเช่น โดเดซิล-แอมโมเนียมไอออน (dodecylammonium ion ; $C_{12}H_{25}NH_3^+$) ซึ่งสามารถดูดซับผิวของคอลลอยด์ประจุลบของเงินไอโอไดด์ (AgI) เป็นสารช่วยในจับก้อนที่ดีเมื่อใช้ในปริมาณประมาณ 6×10^{-5} mol dm⁻³ แต่ต้องใช้ Na^+ สูงถึง 0.1 mol dm⁻³ หรือมากกว่า จึงจะได้ผลเท่ากัน (ดูรูป 1.14 ก. และ ข.) สารประกอบเชิงซ้อนของ $Al(III)$ และ $Fe(III)$ ก็สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดซับผิวเช่นกัน และยังใช้ในปริมาณต่ำกว่า dodecylammonium อีกด้วย (ดูรูป 1.14 ก.)

ประการที่สอง การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดซับผิว เป็นเชิงปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric) กล่าวคือ ปริมาณของสารช่วยในการจับก้อนที่ใช้เพิ่มหรือลด ตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ (ที่ถูกควรเป็นพื้นที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์) แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่เป็นเชิงปริมาณสัมพันธ์ (ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว)

ประการสุดท้าย กลไกแบบดูดซับผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (charge reversal) ทั้งนี้โดยการใช้สารช่วยในจับก้อนมากเกินไป ยกตัวอย่างเช่น เมื่อใช้ dodecylammonium พอเหมาะทำให้เกิดการจับก้อนได้ดีที่สุด (ความขุ่นเหลือน้อยที่สุด) แต่เมื่อเติม dodecylammonium มากกว่าระดับที่เหมาะสม เสถียรภาพของคอลลอยด์จะฟื้นขึ้นมา



รูป 1.14 การเปรียบเทียบปริมาณสารช่วยในการจับก้อน (coagulant) ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพ ของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ

ใหม่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงประจุคอลลอยด์เกิดขึ้น (ดูรูป 1.14 ข.) กลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุเป็นตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า จำนวนไอออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกกำจัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ ไอออนต่างประจุ (สารช่วยในการจับก้อน) ส่วนที่เติมมากเกินไปจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้นไม่ว่าจะใช้สารช่วยในการจับก้อนมากเท่าใดการเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้าม จะไม่สามารถเกิดขึ้นถ้าสารช่วยในการจับก้อน ไม่สามารถดูดซับบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ข้อที่ควรสังเกตเกี่ยวกับ charge reversal ของกลไกแบบจุดคิดผิวคือ การที่ไอออนต่างประจุสามารถดูดคิดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม ย่อมแสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนต่างประจุกับอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้ รูป 1.14 ค. ด้านซ้าย ก็เป็นตัวอย่างของกลไกแบบจุดคิดผิวที่ทำให้ คอลลอยด์ ประจุลบกลายเป็นประจุบวกเมื่อใช้สารส้ม (เป็นสารช่วยในการจับก้อน) มากเกินไป รูป 1.14 ง. ก็เป็นอีกกรณีหนึ่งที่มี charge reversal เกิดขึ้น และจะได้กล่าวต่อไป

ค. การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่พอเพียง จะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึกลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ อาจถือว่าการเพิ่มขนาดหรือนำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ สารช่วยในการจับก้อนดังเช่น สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เฟอร์ริกคลอไรด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาว สามารถทำให้เกิดการจับก้อนได้โดยการสร้าง $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Mg(OH)_2$ และ $CaCO_3$ ซึ่งล้วนแต่เป็นตะกอน (precipitate) ที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้มักเรียกว่าเป็น sweep floc coagulation หรือ sweep coagulation

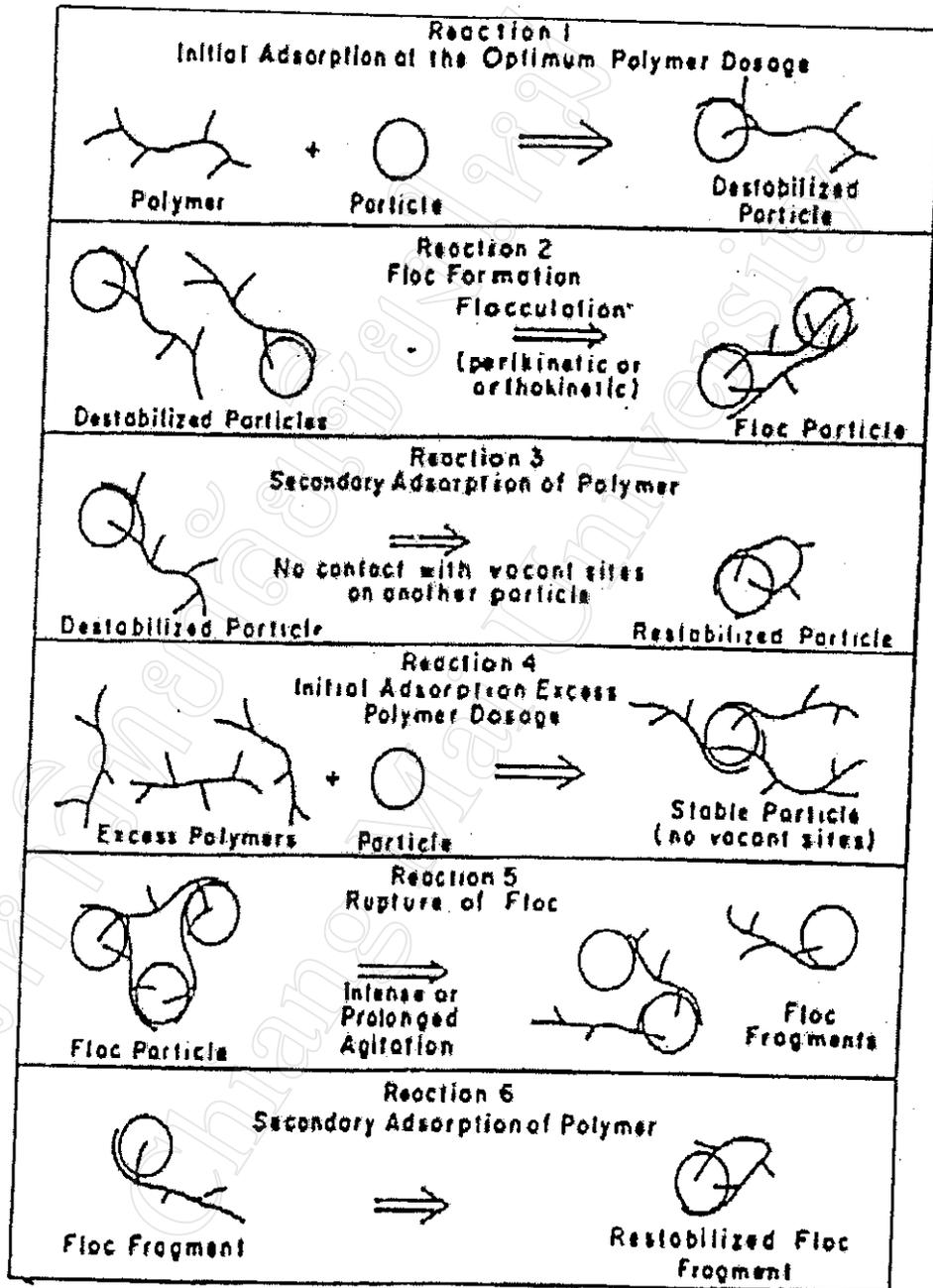
กลไกที่ใช้ผลึกสารประกอบในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรกคือ ปริมาณสารช่วยในการจับก้อนที่เหมาะสม (optimum dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม การจับก้อนอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้สารช่วยในการจับก้อนปริมาณสูง ก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก เนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของ อนุภาคคอลลอยด์ การจับก้อนจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ศักย์ซีตาคามีค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามพีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกแบบนี้ เนื่องจากมีความสัมพันธ์

ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่าง ๆ สารช่วยในการจับก้อน แต่ละตัวจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน การจับก้อนที่เกิดขึ้นในระบบประปามีการใช้กลไกแบบ sweep coagulation ไม่ว่าจะใช้สารส้มหรือสารประกอบเหล็กเป็นสารช่วยในการจับก้อนก็ตาม รูป 1.14 ค. ด้านขวา เป็นการจับก้อนที่เกิดขึ้นโดยใช้ $Al(OH)_3$ และถือว่าเป็นกลไกแบบที่สามนี้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ต้องใช้สารส้มมากกว่ากลไกแบบที่สอง

ง. การใช้สารอินทรีย์พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (polymer bridging)

สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง, เซลลูโลส, น้ำตาลบางชนิดและโปรตีนบางชนิดรวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถใช้เป็นสารช่วยในการจับก้อนในการกำจัดคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าประจำตัวอาจเป็นบวก, ลบ, หรือไม่มีประจุเลยก็ได้ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ต่าง ๆ ดังกล่าวไม่อาจอธิบายได้ด้วยกลไกที่กล่าวมาแล้วทั้งสามแบบแต่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองที่เรียกว่า polymer bridging (ดูรูป 1.15) ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารพอลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 1 ของรูป 1.15 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของพอลิเมอร์และคอลลอยด์หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของพอลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีพอลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ดูปฏิกิริยาที่ 2) การต่อเชื่อมด้วยพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นได้ครบเท่าที่มีพอลิเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของพอลิเมอร์ไม่มีที่จะเกาะจับบนอนุภาคอื่น (ไม่ว่าจะด้วยเหตุผลใดก็ตาม) ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม (ดูปฏิกิริยาที่ 3) ทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาค สำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารพอลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่ง จนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง เรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particle) การใช้พอลิเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะพอลิเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของพอลิเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น ๆ (ดูปฏิกิริยาที่ 4) อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ

การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไป ก็ก่อผลเสียได้ เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วน ๆ (ดูปฏิกิริยาที่ 5) และอาจทำให้ปลายอิสระของพอลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม (ดูปฏิกิริยาที่ 6) เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่อีก



รูป 1.15 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยพอลิเมอร์

1.5 วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ และสภาพกรด-เบสที่มีต่อเสถียรภาพของไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃) ซอล โดยการติดตามการจับก้อนของ Fe(OH)₃ ซึ่งเป็นไดโอฟบิกซอลที่พบมากในแม่น้ำลำคลอง ด้วยวิธีวัดค่าความขุ่น และวิธีวัดค่าการนำไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ได้แก่ ชนิดโมโนวาเลนต์ KNO₃, KBr, KCl, NaNO₃, NH₄NO₃ ชนิดไดวาเลนต์ Mg(NO₃)₂, K₂SO₄ และชนิดไตรวาเลนต์ K₃PO₄