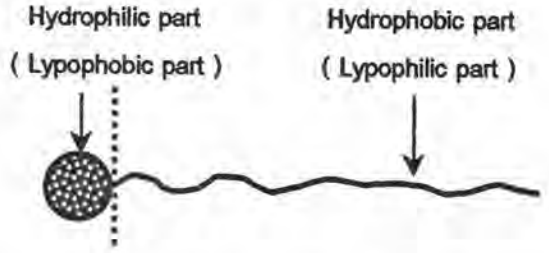
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (surfactant) เป็นคำย่อของ surface active agent เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดซับพื้นผิวระหว่างเฟส ทำให้แรงตึงผิว (surface tension) ของสารละลายลดต่ำลง สารลดแรงตึงผิวมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำมัน (lypophobic) เป็นส่วนหัว และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือส่วนที่ชอบน้ำมัน (lypophilic) เป็นส่วนหาง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่ชอบน้ำจะละลายน้ำได้ ส่วนหางเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ซึ่งจะเป็นสายโซ่ยาว สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ ไฮโดรคาร์บอน ฟลูออโรคาร์บอน และสารพอลิเมอร์พวกซิลิโคน (Rosen, 1989)



รูปที่ 2.1 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)

นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวยังสามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ตามธรรมชาติของส่วนหัวคือ แคทอิออนิก (cationic surfactant) แอนอิออนิก (anionic surfactant) นอนอิออนิก (nonionic surfactant) และสวิตเตอร์อิออนิก (zwitterionic surfactant)

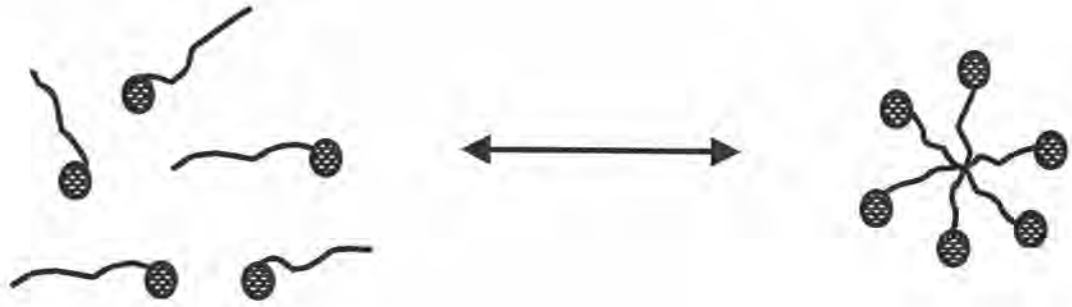
2.1.1 แอนอิออนิก ส่วนหัวเป็นประจุลบ เช่น $RCOOSO_3^-Na^+$ (alkylbenzene sulfonate)

2.1.2 แคทอิออนิก ส่วนหัวเป็นประจุบวก เช่น $RNH_3^+Cl^-$ (salt of a long-chain amine), $RN(CH_3)_3^+Cl^-$ (quaternary ammonium chloride)

2.1.3 นอนอิออนิก ส่วนหัวไม่มีประจุ เช่น $RCOOCH_2CHOHCH_2OH$ (monoglyceride of long-chain fatty acid), $RC_6H_4(OC_2H_4)_xOH$ (polyoxyethylenated alkylphenol)

2.1.4 สวิตเตอร์อิออนิก ส่วนหัวมีทั้งประจุลบและประจุบวก เช่น $RN^+H_2CH_2COO^-$ (long-chain amino acid), $RN^+(CH_3)_2CH_2CH_2SO_3^-$ (sulfobetaine)

ที่ความเข้มข้นสูงเพียงพอในสารละลาย โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในรูปของไมเซลล์ (Micelles) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

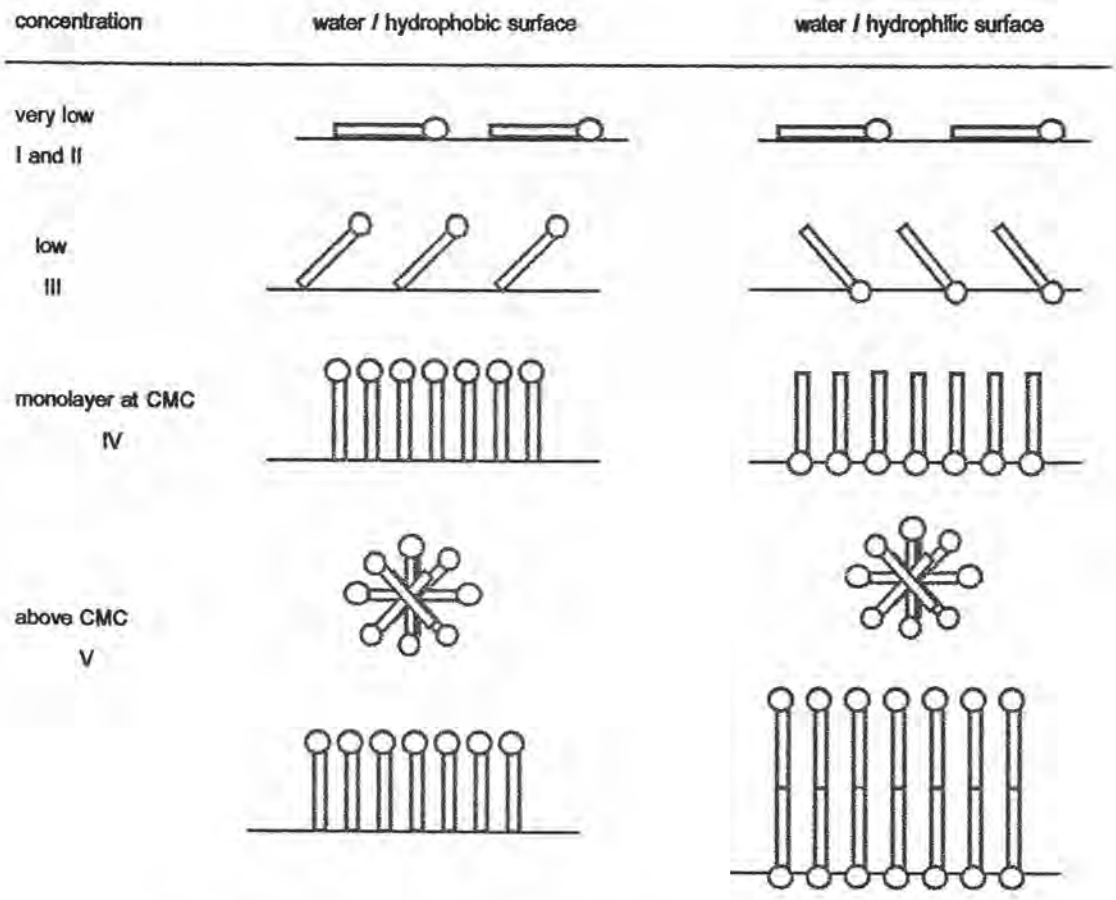


รูปที่ 2.2 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมเซลล์ (Rosen, 1989)

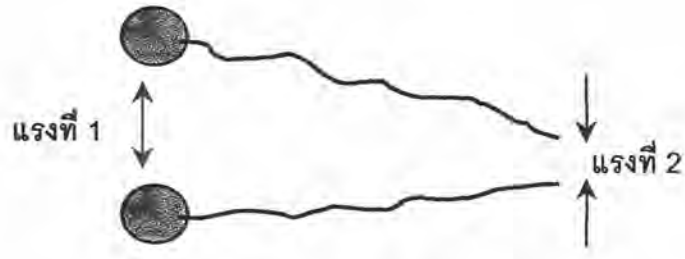
2.2 การดูดซับและความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์

การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของแข็ง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (I และ II) โมเลกุลจะวางตัวในแนวระนาบบนพื้นผิว ขณะที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น (III) จำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะไม่มีที่ว่างเพียงพอสำหรับโมเลกุลที่จะจัดวางตัวในแนวระนาบ ดังนั้นมันจะเริ่มเรียงตัวใหม่ การเรียงตัวขึ้นกับธรรมชาติของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่ ถ้ามีโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวอยู่เพียงพอก็จะเรียงตัวอยู่ในรูปแบบชั้นของโมเลกุล (unimolecular layer) ซึ่งที่ความเข้มข้นนี้จะสำคัญและเป็นที่รู้จักในชื่อของ "ความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC)" ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่าความเข้มข้นที่ซีเอ็มซี (V และเหนือ IV) พื้นผิวที่ชอบน้ำจะมีมากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่จะสามารถเรียงตัวเป็นโครงสร้างบนพื้นผิวของของแข็ง ยิ่งกว่านี้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายจะเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า ไมเซลล์ (Porter,1995)

อิทธิพลที่มีผลทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มซึ่งเรียกว่า ไมเซลล์ มาจากแรงที่ 1 เป็นแรงทางไฟฟ้า (electrostatic force) เกิดขึ้นที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะเกิดแรงผลัก (repulsion) เนื่องจากส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีประจุเดียวกัน ถ้าส่วนหัวมีความเป็นขั้วมากจะทำให้การเกิดไมเซลล์ยากขึ้นด้วย ดังนั้นสารประเภทนอนไอออนิกซึ่งไม่มีประจุจึงเกิดไมเซลล์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ แรงที่ 2 เป็นแรงไฮโดรโฟบิก (hydrophobic force) เกิดที่ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว การดึงส่วนหางเข้าหากันนั้นซับซ้อนมาก เกิดจากเอนโทรปีและเอนทาลปีที่เปลี่ยนไป เมื่อสารลดแรงตึงผิว



รูปที่ 2.3 การดูดซับและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Porter, 1995)



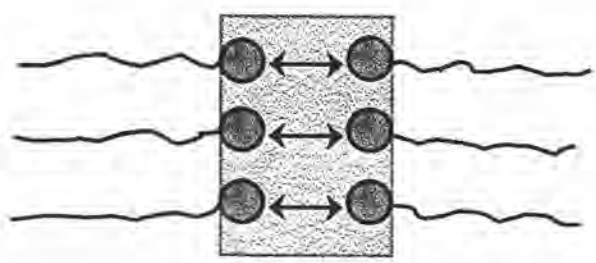
รูปที่ 2.4 แรงระหว่างโมเลกุลในสารละลาย (Clint, 1992)

ละลายในน้ำ ส่วนหางซึ่งไม่ชอบน้ำจึงพยายามที่จะมารวมกัน รูปที่ 2.4 แสดงแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

เมื่อความเข้มข้นต่ำๆ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่ห่างกัน แรงทั้ง 2 จะมีน้อย ความเข้มข้นที่มากขึ้นจะทำให้โมเลกุลเกิดแรงทั้ง 2 มากขึ้น ถ้ากรณีที่แรงที่ 1 มากกว่าแรงที่ 2 มากๆ โมเลกุลจะไม่รวมตัวกันไม่ว่าความเข้มข้นจะมากขึ้นเพียงใด และจะกระจายตัวเป็นสารแขวนลอยในน้ำ ถ้าส่วนหาง

สั้น โมเลกุลละลายน้ำได้มากขึ้น ในกรณีกลับกัน ถ้าแรงที่ 2 มากกว่าแรงที่ 1 มากๆ โมเลกุลจะรวมตัวกันง่าย แต่ไม่ละลายน้ำ และมีค่าซีเอ็มซีต่ำจนไม่อาจวัดค่าได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงทั้ง 2 และโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวจึงมีผลต่อค่าซีเอ็มซี

ความคงตัวของฟอง (foam stability) คือ การที่ฟองจะไม่แตกง่าย ทั้งนี้เกิดจากความมีขั้วของน้ำจะดึงส่วนหัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวซึ่งชอบน้ำเข้ามาละลายในน้ำ ในขณะที่ส่วนหัวที่มีประจุเหมือนกันจะมีแรงผลักกัน จึงเป็นเหตุให้ฟองอากาศมีความคงตัว ดังนั้นถ้าส่วนหัวไม่มีประจุก็จะไม่มีแรงผลักซึ่งจะทำให้ฟองมีความคงตัวต่ำ ทั้งนี้ความคงตัวจึงขึ้นกับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวด้วย รูปที่ 2.5 แสดงผลของประจุของส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อความคงตัวของฟอง



รูปที่ 2.5 ความคงตัวของฟอง (Davies และRideal, 1963)

การเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างก๊าซ และของเหลว ภายใต้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงๆ สามารถอธิบายในเชิงปริมาณโดยสมการของ Gibbs (Gibbs,1928)

$$\frac{\tau}{C} = \frac{-1 d\gamma}{RT\, dC}$$

เมื่อ τ คือ พื้นที่ผิวที่มากเกินพอของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (โมล / ลบ ซม)

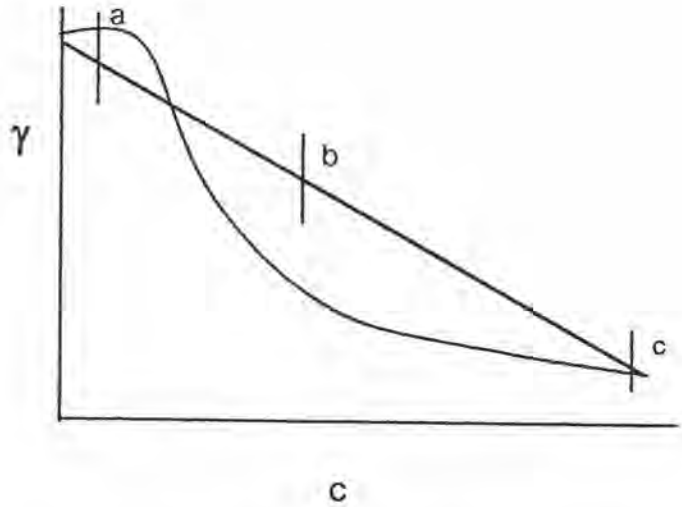
γ คือ ค่าแรงตึงผิว (มิลลินิวตัน / เมตร)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

τ/C ใช้ในการพิจารณาแฟคเตอร์การกระจายตัว ส่วนค่าของ $d\gamma/dC$ สามารถหาได้จากความชันของกราฟ γ–C กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิว (γ) และความเข้มข้นของสารละลายของ

สารลดแรงตึงผิว (C) แสดงดังรูปที่ 2.6 ในเขตของความเข้มข้นต่ำมากๆ คือ ที่ต่ำกว่าจุด a การดูดซับจะเกิดขึ้นเล็กน้อย โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวต่อพื้นผิวมีจำนวนน้อย และค่าแรงตึงผิวเข้าใกล้ค่าแรงตึงผิวของตัวทำละลายบริสุทธิ์ ที่ความเข้มข้นช่วงกลาง (ระหว่าง a และ b) ค่าแรงตึงผิวจะลดลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโดยค่าแรงตึงผิวอยู่ในช่วง 10^{-7} ถึง 10^{-3} นิวตัน/เมตร ขึ้นกับสภาวะต่างๆ ในช่วงที่ความเข้มข้นของการเกิดไมเซลล์ และที่จุด b ความชันจะเข้าใกล้ศูนย์ ที่ขอบเขตนี้จะเกิดไมเซลล์ (Yoshiyuki และ Ehg, 1979)



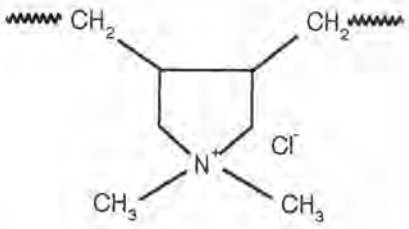
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Gibbs, 1928)

2.3 สารพอลิอิเล็คโทรไลต์

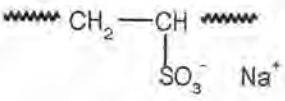
สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ (polyelectrolyte, PE) เป็นสารพอลิเมอร์ หรือสารแมโครโมเลกุล (macromolecule) ซึ่งประกอบด้วยอิออนขนาดใหญ่ ที่มีกลุ่มของประจุบวกหรือประจุลบเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ และมีเคาน์เตอร์อิออน (counterion) ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ช่วยในการทำให้ประจุเป็นกลาง (electroneutrality) สารพอลิอิเล็คโทรไลต์โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟเนต (sulfonate) ฟอสเฟต (phosphate) คาร์บอกซีเลต (carboxylate) ไพริดิเนียม (pyridinium) หรือกลุ่มพันธะเปปไทด์ (peptide bonding) ที่มีประจุต่อเข้าด้วยกันเป็นสายยาว (Dautzenberg, 1994)

สารพอลิอิเล็คโทรไลต์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะของแมโครอิออน คือ

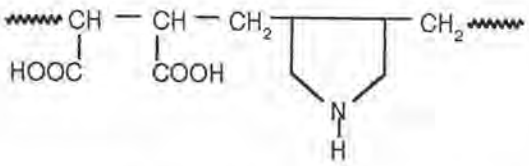
2.3.1 แคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ (cationic polyelectrolyte) เป็นพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีแมโครอิออนเป็นประจุบวก ซึ่งจะแสดงสมบัติความเป็นเบส เช่น polyquaternium-6 (polymer of dimethyldiallyl ammonium chloride)



2.3.2 แอนอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ (anionic polyelectrolyte) เป็นพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีแมโครอิออนเป็นประจุลบ ซึ่งจะแสดงสมบัติความเป็นกรด เช่น polyvinyl-sulfonate



2.3.3 แอมโฟเทอริกพอลิอิเล็คโทรไลต์ (amphoteric polyelectrolyte) เป็นพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบในโมเลกุล เช่น maleic acid-diallylamine copolymer



นอกจากนี้ยังมีสารพวกนอนอิออนิกพอลิเมอร์ (nonionic polymer) ซึ่งเป็นสารแมโครโมเลกุลที่ไม่มีประจุ เช่น polyvinyl alcohol หรือแม้แต่สารแมโครโมเลกุลในธรรมชาติ เช่น โปรตีน และดีเอ็นเอ

สารแมโครโมเลกุลจะเป็นสารพอลิอิเล็คโทรไลต์เมื่ออยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง เช่น น้ำ แล้วเคาน์เตอร์อิออนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นสารพอลิอิเล็คโทรไลต์จึงอาจแบ่งเป็นกรดและเบสได้ ซึ่งถ้าประจุของแมโครอิออนขึ้นกับค่าพีเอชจะเรียกว่าเป็น weak polyelectrolyte แต่ถ้าไม่ขึ้นกับค่าพีเอชจะเป็น strong polyelectrolyte (Fleer, 1993)

เนื่องจากสารพอลิอิเล็คโทรไลต์สามารถละลายน้ำ นำไฟฟ้า และมีความสามารถที่จะจับอิออนที่มีประจุตรงกันข้ามได้ดี ดังนั้นจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

จากคุณสมบัติที่ดีหลายประการของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ จะเห็นว่าได้มีการนำสารพอลิอิเล็คโทรไลต์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารน้ำมันปนเปื้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเกิดระหว่างแมโครอิออนของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ กับสารที่มีประจุตรงกันข้าม เช่น สารอนินทรีย์เคาน์เตอร์อิออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก แมโครอิออน สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ (ionic surfactants) อนุภาคคอลลอยด์ และการดูดซับบนพื้นผิวของของแข็ง

ตารางที่ 2.1 การนำสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Dautzenberg, 1994)

Industrial area	Product or process example
Film and textile industry	Viscose process Antistatic agents Textile sizes
Paper industry	Retention aids Paper sizes and coating
Water and effluent processing	Flocculants Sludge dewatering PE-based membranes
Chemical industry	PE-based membranes Supporting materials Processing aids
Mining industry	Flocculants
Petrol industry	Oilwell drilling aids Oil recovery aids
Building industry	Concrete processing additives Pigment dispergants
Nutrition	Natural PE-based thickening and gelling agents
Cosmetics industry	Antistatic agents Gelling agents
Medicine and pharmacy	Tablet coating Blood compatibility enhancement

1) ปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็คโทรไลต์กับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ

ที่เหนือจุดซีเอ็มซี สารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในลักษณะเป็นไมเซลล์ และจะแสดงพฤติกรรมชอบสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีประจุตรงกันข้าม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ โดยที่ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะมีอิทธิพลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโมเลกุลทั้งสอง ปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ และสารลดแรงตึงผิวจะเกิดจากการรวมกันของแรงไฮโดรโฟบิกในไมเซลล์และแรงทางไฟฟ้า (electrostatic binding) กับส่วนที่มีประจุของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ (Dautzenberg, 1994) และส่วนไฮโดรโฟบิกในโมเลกุลของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ และในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Winnik และคณะ, 1996)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ในกระบวนการฟล้อคคูเลชัน (Dautzenberg, 1994)

Component to be flocculated	Flocculant
Humic acids in surface water	Cationic polyelectrolyte
Silica hydrosol	Anionic polyelectrolyte
Dyes	$Al(NO_3)_3$ + Cationic polyelectrolyte
Oil from refinery effluents	Cationic polyelectrolyte
Oil from oil water emulsions	Cationic polyelectrolyte
Lubricating oil from wastewater	Anionic polyelectrolyte
Water from oil/water emulsions	Anionic and cationic polyelectrolyte
Surfactants from effluents (flocculating flotation)	Anionic polyelectrolyte
Suspended quartz	Anionic polyelectrolyte polyamines

ในกรณีที่เป็นสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ชนิดนอนอิออนิกหรือ uncharged polymer เช่น hydroxyethyl cellulose จะไม่เกิดปฏิกิริยากับ ionic surfactants อย่างไรก็ตาม สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารทั้งสองชนิดได้ โดยการปรับปรุงโครงสร้างของสารพอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุด้วยการเพิ่มส่วนที่มีประจุ (ionic groups) หรือส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก จะได้สารชนิดใหม่ที่เรียกว่า hydrophobically modified polymer ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารลดแรงตึงผิวได้ด้วยแรงทางไฟฟ้า หรือแรงไฮโดรโฟบิก เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า mixed micelles (Kastner และคณะ, 1996 และ Bolto และคณะ,1996)

2) ปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็คโทรไลต์กับอนุภาคที่มีประจุ

การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็คโทรไลต์กับอนุภาคที่มีประจุตรงกันข้าม เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ต่างๆ คือ stabilization, ordering, flocculation และ coacervation โดยทั่วไปจะใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ชนิดแอนอิออนิกในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ การเกิดแรงทางไฟฟ้าระหว่างสารพอลิอิเล็คโทรไลต์กับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุ จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นฟล้อคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (bridging flocculation) ซึ่งสารพอลิอิเล็คโทรไลต์จะทำหน้าที่เป็นดิสเพอซิ่งเอเจนต์ (dispersing agent) และตัวทำให้เสถียร (stabilizer) ในระบบคอลลอยด์ โดยจะไปเพิ่มความหนืด (viscosity) ทำให้อนุภาคที่แขวนลอยเกิดการรวมตัวกันง่ายขึ้น (Dautzenberg, 1994)

2.4 การประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ในการแยกเฟส

โดยทั่วไปการทำให้อนุภาคแขวนลอยหรืออิมัลชันแยกออกจากน้ำ สามารถใช้วิธีการทำให้ตกตะกอน (sedimentation) แต่ถ้าอนุภาคนั้นมีประจุ จะสามารถใช้การเติมสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีประจุตรงกันข้ามเข้าช่วย โดยเกิดแรงกระทำทางไฟฟ้า (Coulombic interaction) ระหว่างประจุบวกและประจุลบ ซึ่งมีแรงไฮโดรโฟบิกและพันธะไฮโดรเจน (H-bond) เป็นแรงผลักดัน อนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่ในน้ำมีประจุลบ ดังนั้นสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่นำมาประยุกต์ใช้จึงเป็นชนิดแคทไอออนิก (Dautzenberg, 1994) โดยมีการนำไปใช้ใน 2 ลักษณะ คือ

1. การทำให้น้ำใสขึ้น โดยเติมสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ แล้วแยกส่วนที่เป็นฟล็อคออกมาโดยการทำให้ลอยหรือตกตะกอน

2. การดึงน้ำออกจากตะกอนสลัดจ์ (sludge dewatering) เพื่อเพิ่มปริมาณของแข็ง (solid content) และลดปริมาณน้ำ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการขนถ่ายและกำจัดสลัดจ์ในขั้นต่อไป

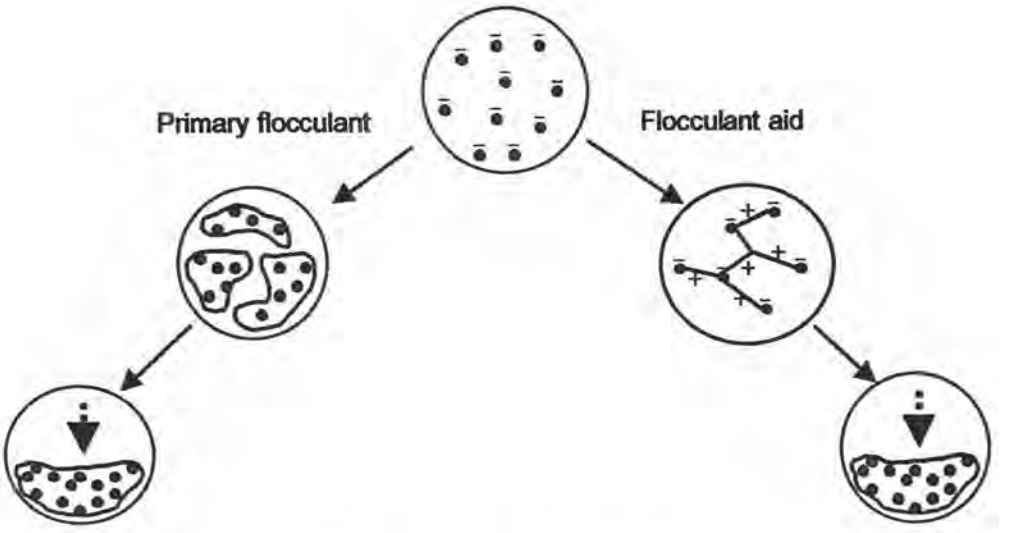
2.4.1 การใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ในการเกิดโคแอกกูเลชันและฟล็อคคูเลชัน

โดยปกติอนุภาคคอลลอยด์จะไม่รวมตัวกันเนื่องจากมีแรงผลักทางไฟฟ้า ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงเกี่ยวข้องกับการลดแรงผลักทางไฟฟ้า ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้ และกระบวนการฟล็อคคูเลชัน จะเป็นการสร้างสารประกอบที่มีขนาดใหญ่เชื่อมต่อกันเป็นร่างแหด้วยพันธะเคมี ซึ่งเรียกว่า floc networks (Manahan, 1994)

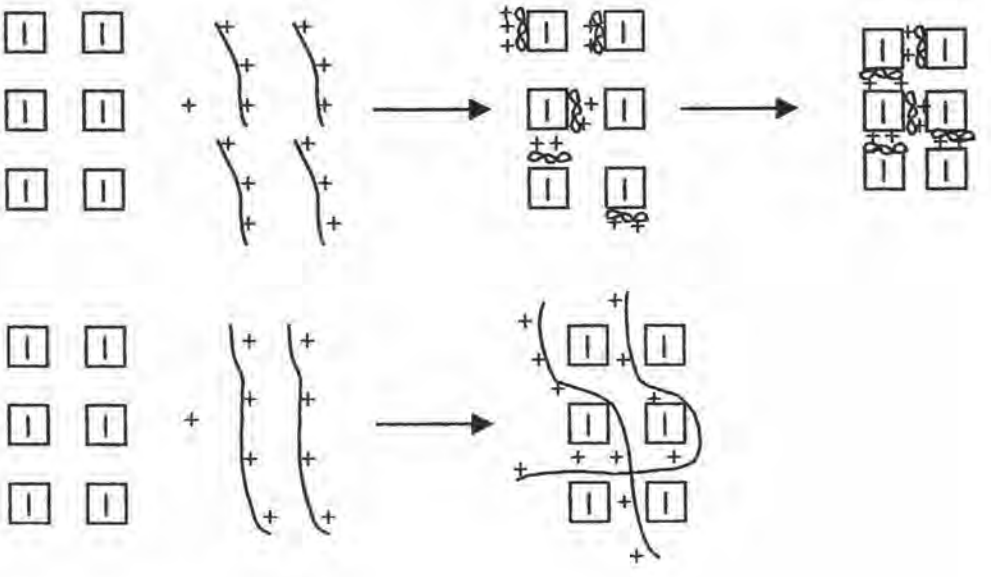
หลักการนำสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ไปใช้เป็นสารช่วยในการเกิดการรวมตัวหรือฟล็อคคูแลนท์ (flocculant) ในการแยกอนุภาคคอลลอยด์จากน้ำ มี 2 แนวทาง คือ

1) ใช้เป็น primary flocculant ซึ่งจะเกิดฟล็อคที่สามารถตกตะกอนได้เร็ว ทำให้แยกพวกคอลลอยด์ออกไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2) ใช้เป็นตัวช่วยให้เกิดการรวมตัวกัน (flocculant aid) คือ เป็นตัวเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ด้วยแรงทางไฟฟ้า หรือแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular force) ทำให้เกิดเป็นฟล็อคขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย กลไกการเกิดฟล็อคคูเลชันอาจเป็นแบบ patch หรือ mosaic flocculation โดยประจุของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์จะไปทำให้ประจุบางส่วนบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง นอกจากนี้ flocculant aid ยังสามารถใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ primary flocculant ได้อีกด้วย กลไกการทำงานของ flocculant aid แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การทำงานของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็น primary flocculant และ flocculant aid (Dautzenberg, 1994)



รูปที่ 2.8 กลไกการทำงานของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่เป็น flocculant aid แบบ bridging (รูปบน) และ patch flocculation (รูปล่าง) (Dautzenberg, 1994)

โดยปกติจะใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ชนิดแคทไอออนิกเป็นฟล้อคคูแลนท์ แต่ในบางกรณีอาจใช้ชนิดแอนไอออนิกในการทำให้อนุภาคที่มีประจุลบเกิดการรวมตัวกัน ตัวอย่างที่เกิดในระบบชีวภาพ ได้แก่ การเกาะติดกันของเนื้อเยื่อเซล การรวมกลุ่มของเซลแบคทีเรีย และปฏิกิริยาระหว่างแอนติบอดีและแอนติเจน (Monahan, 1994) กระบวนการฟล้อคคูเลชันที่ใช้สารแอนไอออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์นี้ จะ

เกิดได้ง่ายขึ้นเมื่อมีอิออนของโลหะในปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ โดยจะสร้างพันธะเชื่อมระหว่างประจุบวกของโลหะกับประจุลบของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ และประจุลบบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์

2.4.2 การใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ในการดึงน้ำออกจากตะกอนสลัดจ์

ตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัดชีวภาพ ก่อนจะนำไปกำจัดนั้น จำเป็นต้องรีดน้ำออกเพื่อลดปริมาตร โดยได้มีการทดลองใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์เป็นฟล้อคคูแลนท์ พบว่าจะได้ตะกอนสลัดจ์ที่มี % solid content มากขึ้น เมื่อใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ชนิดประจุบวก Gehr และ Henry (1982) ได้ศึกษาการดึงน้ำออกจากตะกอนสลัดจ์ด้วยกระบวนการทำให้ลอย

ปริมาณของฟล้อคคูแลนท์ที่เหมาะสมไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์และองค์ประกอบของตะกอนเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปริมาณของแข็ง และสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นวิกฤตของสารพอลิเมอร์ (critical polymer concentration, C*) ซึ่งหาได้จาก viscometry และ light scattering ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดเริ่มของการเปลี่ยนโครงสร้างของสายพอลิเมอร์

Kulicke และคณะ (1993) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ระบบโมโนฟล้อคคูเลชัน (monoflocculation) คือ ใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์เพียงชนิดเดียว กับระบบการใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์สองชนิด (dual flocculation) ที่มีลำดับการใช้แคทอิออนิก-แอนอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ หรือแอนอิออนิก-แคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ โดยได้ข้อสรุปว่าระบบ dual flocculation ที่ใช้แคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ แล้วตามด้วยแอนอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับสภาพกากตะกอนสลัดจ์ นอกจากนี้ความเป็นพิษของสารแคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำยังลดลง เพราะเกิดพันธะทางไฟฟ้ากับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำและสารแอนอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์

2.4.3 การใช้สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ในการแยกเฟสระหว่างน้ำและน้ำมัน

การแยกเฟสของเหลว-ของเหลวออกจากกัน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนลดความเสถียรของระบบคอลลอยด์ (thermal destabilization) การใช้ ultrafiltration ผ่านเยื่อเมมเบรนที่เหมาะสม การใช้กระบวนการ classical acid emulsion splitting และการเติมสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่เหมาะสม ซึ่งมักจะเป็นชนิดแคทอิออนิก สองวิธีหลังนี้เป็นการอาศัยกระบวนการ chemical deactivation ของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมอิมัลชันซึ่งมักเป็นชนิดแอนอิออนิกและนอนอิออนิก โดยวิธี emulsion splitting จะใช้กรดแก่ในการทำให้เกิด surfactant deactivation ในขณะที่แรงทางไฟฟ้าจะไปทำลายอิมัลชันเมื่อมีการเติมสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ โดยส่วนใหญ่สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนอิออนิก หรือบางกรณีอาจใช้รวมกับนอนอิออนิก ถูกใช้เป็น emulsifier ดังนั้นสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ชนิดแคทอิออนิกที่มีความหนาแน่นของประจุสูงเพียงพอ และมีมวลไม่ต่ำเกินไปนัก จึงเป็นที่ต้องการใน

กระบวนการนี้เพื่อจับประจุที่ตรงกันข้าม ดังนั้นในบางกรณีอาจใช้ทั้งสองระบบคู่กันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกเฟสให้ดียิ่งขึ้น (Rosen, 1989)

2.5 ปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็คโทรไลต์และสารลดแรงตึงผิว

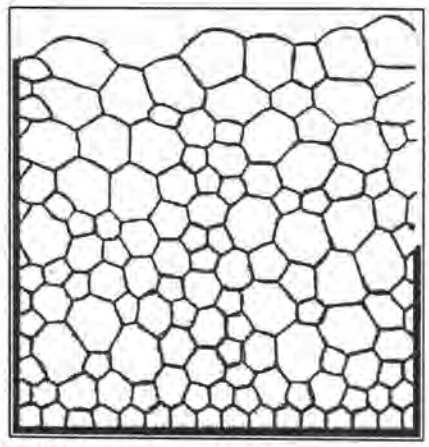
สารประกอบแมโครโมเลกุล เช่น พอลิเมอร์สังเคราะห์ โปรตีน แป้ง และอนุพันธ์ของเซลลูโลส สามารถทำปฏิกิริยากับสารลดแรงตึงผิว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะถูกดูดซับอยู่บนสารแมโครโมเลกุลด้วยแรงทางไฟฟ้าและแรงไฮโดรโฟบิก การเติมสารแมโครโมเลกุลที่มีโครงสร้างเหมาะสมลงในสารละลายของสารลดแรงตึงผิว สามารถเพิ่ม solubilization power ได้ เช่น สารลดแรงตึงผิวโซเดียมอัลคิลซัลเฟตที่มีจำนวนคาร์บอน 10-16 อะตอม ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าจุดซีเอ็มซี จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ serum albumin ทำให้สามารถละลายสารพวกที่เป็น oil-soluble azo dye และ isooctane ได้ (Rosen, 1989)

โดยทั่วไปสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกมาก จะทำให้การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนสายพอลิอิเล็คโทรไลต์มากขึ้น เนื่องจากส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิกของสารแมโครโมเลกุลสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้พันธะระหว่างสารลดแรงตึงผิวและสารพอลิอิเล็คโทรไลต์อ่อนลง

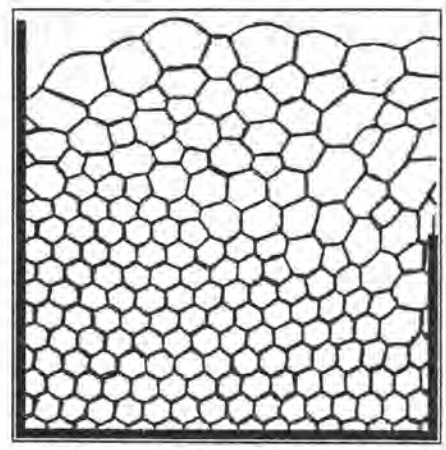
2.6 หลักการทำให้เป็นฟองลอย

หลักการทำให้เป็นฟองลอยหรือระบบฟองลอย (froth flotation) คือ กระบวนการที่ใช้แยกอนุภาคของแข็งหรือของเหลวจากชั้นของเหลว การแยกจะเกิดจากการเป่าฟองก๊าซ (ปกติใช้อากาศ)ไปในชั้นของเหลว ฟองก๊าซจะไปจับกับอนุภาค และแรงยก (buoyant force) ของฟองก๊าซที่จับกับอนุภาคจะมากเพียงพอทำให้อนุภาคลอยขึ้นสู่ผิวบน การลอยขึ้นของอนุภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว เช่น น้ำมัน จะเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าของเหลว (Tantayakom, 1997)

หลักการในการทำให้ลอยถูกนำมาใช้ในการแยกแร่ และแยกเซลล์แบคทีเรีย (bacterial separation) ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อใช้แยกสารแขวนลอยและน้ำมัน หลักการทำให้ลอยนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สารแขวนลอยมีขนาดเล็ก หลักการคือ การแยกอนุภาคที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกออกจากน้ำหรือส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิก โดยใช้สารลดแรงตึงผิว โดยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะมีผลต่อลักษณะของฟองอากาศ คือ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำ ฟองจะมีขนาดใหญ่ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้น ฟองจะมีขนาดเล็กและกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารที่เป็นไฮโดรโฟบิก (Cilliers, 1997) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



Bubble structure, low surfacant concentration

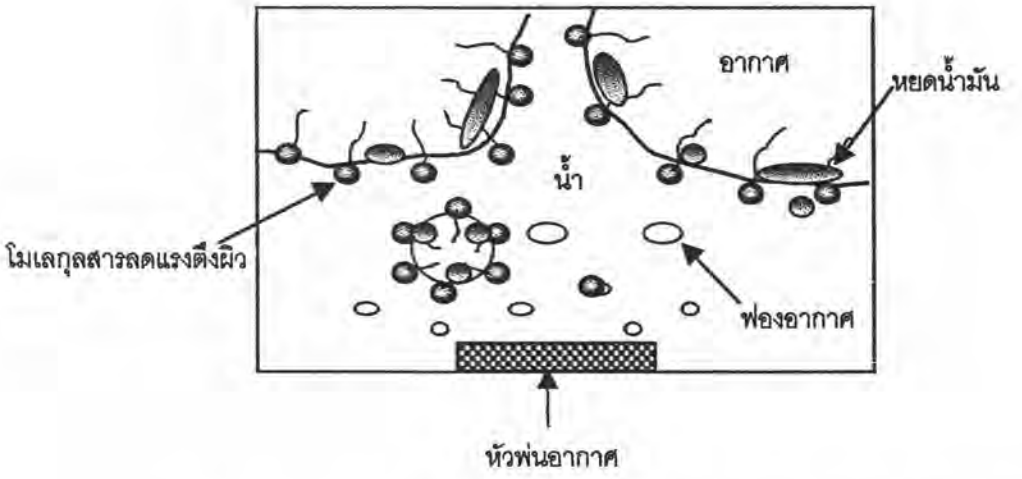


Bubble structure, high surfacant concentration

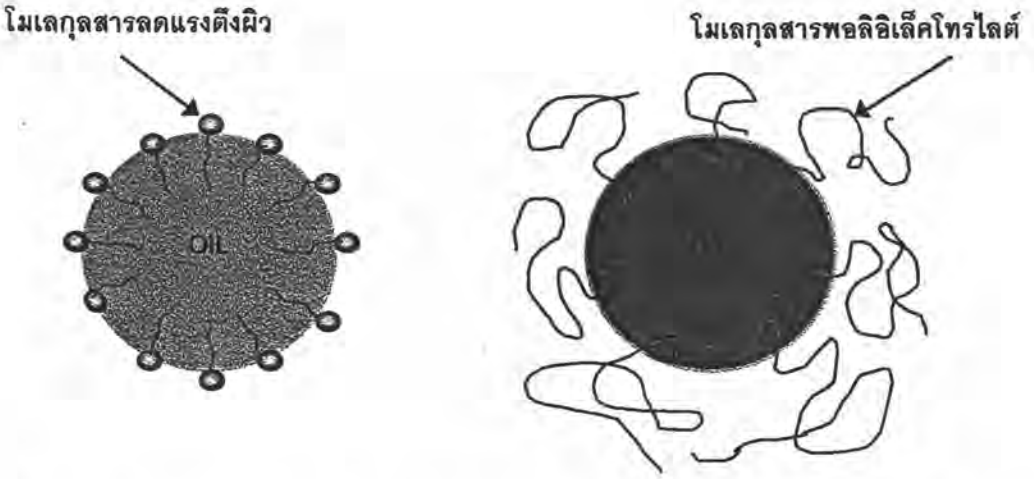
รูปที่ 2.9 ลักษณะของฟองที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างกัน(Cilliers, 1997)

ในการทำให้ลอยโดยฟนอากาศลงไปในสารละลาย จะสามารถกำจัดอนุภาคได้ โดยอนุภาคจะเกาะติดกับฟองอากาศ โดยฟองอากาสจะลอยเป็นฟองขึ้นมาบนผิวน้ำ การเติมสารลดแรงตึงผิวจะช่วยทำให้ค่าแรงตึงผิวของสารละลายลดต่ำลง ทำให้เกิดฟองอากาศได้ง่ายขึ้นและโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะไปเกาะรวมตัวระหว่างผิวน้ำและอากาศเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำจะชี้ออกสู่อากาศ ในขณะที่ส่วนหัวจะอยู่ในชั้นน้ำ ในกรณีที่มีอนุภาคสารน้ำมันอยู่ในสารละลาย โมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะไปเกาะที่บริเวณอนุภาคน้ำมัน โดยหันส่วนหางของโมเลกุลเข้าหาอนุภาคน้ำมัน ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันลอยขึ้นมาพร้อมกับฟองอากาศและโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว ส่วนในกรณีที่ใช้เป็นสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ โมเลกุลสารพอลิอิเล็คโทรไลต์จะไปเกาะบนอนุภาคน้ำมัน เกิดการรวมตัวเป็นฟล้อคที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเป่าอากาศเข้าไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะไปพยุงให้ฟล้อคลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งเรียกกระบวนการที่เกิดนี้ว่า floc flotation (Dobiáš, 1993) ลักษณะการเกาะตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวหรือสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ กับอนุภาคน้ำมัน แสดงไว้ในรูปที่ 2.11

ประสิทธิภาพของระบบฟองลอยอาจเพิ่มสูงได้โดยเติมสารเคมีช่วย เช่น อลูมินัม เกลือเฟอร์ริก และแอคติเวเตดซิลิกา โดยสารเหล่านี้ที่เติมลงไปสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงอนุภาคเข้าด้วยกัน และในการทำเช่นนี้จะทำให้โครงสร้างง่ายต่อการถูกจับด้วยฟองอากาศ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำหน้าที่จับอนุภาคเข้าด้วยกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้สามารถถูกจับด้วยฟองอากาศง่ายขึ้น และลอยตัวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Tantayakom, 1997)



รูปที่ 2.10 กระบวนการทำให้เป็นฟองลอย (Dean และ Lemlich, 1965)



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกาะตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวหรือสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ กับอนุภาคน้ำมัน (Evans และ Wennerstrom, 1994)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sylvester และคณะ (1980) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย อัตราการไหลของอากาศ ขนาดของฟองอากาศ ขนาดของหยดน้ำมัน ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการแยกน้ำมัน โดยขนาดของหยดน้ำมันและฟองอากาศมีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำเสียไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน

Mular และ Bhappu (1980) ได้ศึกษาการพัฒนาระบบฟรอทโฟลเทชันมาใช้ในกระบวนการแยกแร่ เช่น การแยกแร่สังกะสี ทองแดง โปแตส เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้แยกถ่านหินในน้ำเสีย และทำให้แร่ต่างๆมีความเข้มข้นสูงขึ้น

Ityokumbul และคณะ (1988) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์อัตราการทำให้ลอยของการนำบิทูเมนกลับมาใช้ใหม่จากหางน้ำมันทราย (oil sand tailings) ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าอัตราการแยกขึ้นกับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไป

Kubota และคณะ (1990) ได้ศึกษาการกำจัดอนุภาคออกจากตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยใช้การทำให้เป็นฟองลอย และสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนอิออนิก โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการแบบจำลองการชนกันทางไฮโดรไดนามิกอย่างง่ายๆ พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับการทำนายจากสมการแบบจำลอง จากการวัดกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปยังฟองอากาศและอนุภาค โดยใช้วิธีอิเล็กโตรฟอรีซิส (electrophoresis method) และ energy barrier ระหว่างอนุภาคและผิวของฟองก๊าซ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างมาก

Pal และ Masliyah (1990) ได้ทำการทดลองแยกน้ำมันออกจากสารละลายอิมัลชันน้ำมันในน้ำ โดยใช้โฟลเทชันแบบคอลัมน์ ความเข้มข้นของน้ำมันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.25-8.0 โดยปริมาตร การแยกน้ำมันจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันที่ป้อนขาเข้าเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการแยก การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของก๊าซจะก่อให้เกิดการแยกน้ำมันเพิ่มขึ้น

Watanabe, Yamanouchi และ Nagata (1991) ได้ทำการศึกษาทดลองบำบัดน้ำเสียจากเรือสินค้าซึ่งประกอบด้วยสารแขวนลอย 59% สารน้ำมันจำพวกน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในปริมาณค่อนข้างสูงถึง 370-1,080 มก/ล และสารซักฟอก ด้วยวิธี oil flocculation และ froth flotation โดยใช้ nonionic surfactant พบว่าระบบสามารถแยกอนุภาคน้ำมันและของแข็งขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ได้สูงถึง 90% นอกจากนี้ได้พบว่าประสิทธิภาพการแยกสารน้ำมันยังขึ้นอยู่กับการผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รวมทั้งสารต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสารซักฟอก

Matis และ Mavros (1991) ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพของระบบฟรอทโฟลเทชันว่าขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคที่ต้องการแยก โดยจากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาพบว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ (ultrafine) จะก่อปัญหาในกระบวนการแยกแร่ และจากงานวิจัยของ Fuerstenau (1980) ได้แสดงให้เห็นว่า การนำกลับแร่จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่ออนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 ไมครอน ขนาดของฟองอากาศ ซึ่งพบว่าฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพสูง และยังมี selectivity ที่ดีกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ และชนิดของสารลดแรงตึงผิว นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงระบบฟรอทโฟลเทชันแบบคอลัมน์ว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบฟรอทโฟลเทชันแบบที่ใช้เป็นถังกวนมีใบพัดกวาดฟองออก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่ต้องการแยกสามารถอยู่ในคอลัมน์ได้ยาวนาน และถูกฟองอากาศยกขึ้นไปที่สุด

Tóth และคณะ (1991) ได้ศึกษาวิธีการนำกลับสารน้ำมันโดยวิธีทางเคมี ในประเทศแถบยุโรปตะวันออกและรัสเซีย โดยไม่ได้คำนึงด้านเศรษฐศาสตร์ ว่าสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนำกลับน้ำมันทางเคมีที่นิยม ได้แก่ สารพอลิเมอร์ สารลดแรงตึงผิว และอัลคาไลน์ โดยที่การใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นวิธีที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้กันมากที่สุด ถึงแม้จะเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดก็ตาม

คณะวิจัยของ BHP และ CSIRO (1992) ประเทศออสเตรเลียได้ทำการวิจัยพัฒนาระบบฟรอทโฟลเทชัน เพื่อนำมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ โดยมีการทดลองระดับนำร่องในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นเหล็กและท่อเหล็ก ซึ่งมีปริมาณน้ำมันสูง พบว่าระบบฟรอทโฟลเทชันสามารถกำจัดน้ำมันได้สูงถึง 98% นอกจากนี้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Garcia และ Martinez-Tarazona (1993) ได้ศึกษาการนำระบบฟรอทโฟลเทชันมาใช้ในการกำจัดโลหะชนิดต่างๆออกจากถ่านหิน เช่น As, Cu, Pb, Hg, Cr เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะในถ่านหินนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่าง โดยค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3-7

Chin (1994) ได้ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันซึ่งประกอบด้วย API oil separatorตามด้วยระบบ DAF และระบบชีวภาพแบบ extended aeration โดยสารน้ำมันมากกว่า 85% และของแข็งที่ตกตะกอนได้ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดโดยระบบ API oil separator จากขั้นตอนนี้จะเหลือน้ำมันอยู่ประมาณ 104-680 มก/ล ซึ่งจะถูกบำบัดต่อโดยการทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมี และการทำให้ลอยแบบความดันสูง (DAF) ซึ่งสามารถกำจัดน้ำมันได้มากกว่า 80% โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล้อคคูเลชัน ได้แก่ สารส้ม (alum) ปูนขาว (lime) และสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ หลังจากผ่านกระบวนการ DAF ก็จะถูกบำบัดต่อด้วย once-through aerated lagoon ที่เวลาเก็บกัก 30 นาที ซึ่งจะเหลือน้ำมันประมาณ 16 มก/ล แต่ค่าซีโอดีและบีโอดียังสูงถึง 177 และ 19 มก/ล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในน้ำมีสารที่ยากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในระบบชีวภาพ

Koutlemani และคณะ (1994) ได้นำเทคนิคของระบบฟองลอยมาใช้ในการนำกลับของอิออนของโคบอลท์จากสารละลายในสภาวะที่เป็นกรด โดยคอลัมน์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 8 ซม และสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ โดเดคซิลเอมีน (dodecylamine) เซทิลไพริดิเนียมคลอไรด์ (cetyl pyridiniumchloride) และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) จากผลการทดลองพบว่า SDS ให้ประสิทธิภาพในการนำกลับสูงสุด แต่จะก่อปัญหาเนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นซึ่งมีน้ำปนมาด้วยจะแยกน้ำออกได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเป่าอากาศต่อปริมาตรของคอลัมน์ มีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไปและขนาดของคอลัมน์ด้วย หลังจากนั้นในปี 1995 คณะผู้วิจัยได้ศึกษาการนำกลับอิออนของโคบอลท์โดยระบบ dispersed-air flotation ในสภาวะที่เป็นกรด โดยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เซทิลไทรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) เซทิลไพริดิเนียมคลอไรด์ (CPC) และโดเดคซิลเอมีน (dodecylamine) ซึ่งพบว่าโดเดคซิลเอมีนให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงสุด และยังพบว่ากระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเป่าอากาศด้วย

ซึ่งการเป่าอากาศที่เหมาะสมจะสัมพันธ์กับค่าความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.1 ซม/วินาที โดยจะประสิทธิภาพการนำกลับสูงสุด แต่ถ้าเพิ่มอัตราการเป่าอากาศมากกว่านี้ จะทำให้ประสิทธิภาพการนำกลับลดลง

Gulyas และ Reich (1995) ได้ศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมัน ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนและฟีนอล โดยได้แนะนำให้ใช้กระบวนการทำให้ลอยในขั้นตอนก่อนการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งสามารถกำจัดสารพวกอัลเคน อะโรมาติก และฟีนอลออกไปได้ส่วนใหญ่ โดยไม่ก่อปัญหากับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการตะกอนเร่ง

Wungrattanasopon และคณะ (1996) ทำการศึกษาเพื่อหาชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และปริมาณเกลือแกงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเทอร์เชียรีบิวทิลฟีนอล (TBP) โดยใช้ระบบโฟมโฟลเทชัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าประมาณความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ แต่ถ้าเติมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวเป็นไมเซลล์ซึ่งจะแข่งขันกับฟองในการจับสาร TBP ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาร TBP ลดลง เมื่อมีการเติมเกลือแกงส่งผลให้ประสิทธิภาพกำจัดของสารลดแรงตึงผิวลดลง ในขณะที่จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสาร TBP ยังสูง แต่ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ต้องเติมลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวลดต่ำลง เมื่อเติมเกลือแกงเพิ่มขึ้น

Bolto และคณะ (1996) ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันในรูปอิมัลชัน โดยระบบฟองลอยโดยใช้แคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงกว่า 95% และถ้าใช้พอลิอิเล็คโทรไลต์ที่ปรับคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก พบว่าจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองกับน้ำเสียประเภทอื่น ซึ่งพบว่าแคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์นี้เหมาะสมในการช่วยแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย และค่าความเป็นกรดด่างที่สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงกว่าในกรณีค่าความเป็นกรดด่างต่ำ นอกจากนี้ยังได้พบว่าการใช้สารแคทอิออนิกพอลิอิเล็คโทรไลต์ร่วมกับ SDS จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกสารแขวนลอย น้ำมัน และสีเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Gray และคณะ (1997) ได้ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของประจุของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่มีต่อการลอยของอิมัลชันของสารน้ำมันในสารละลายอิเล็คโทรไลต์ พบว่าการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อฟล็อคมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่า สารพอลิอิเล็คโทรไลต์ช่วยในการทำให้ลอยโดยการเพิ่มขนาดของฟล็อค ประสิทธิภาพการลอยจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของประจุของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ นอกจากนี้ปริมาณของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ยังมีผลต่อระบบการทำให้ลอย โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็คโทรไลต์สูง จะลดประสิทธิภาพการทำให้ลอย และจะมีผลมากที่สุดเมื่ออนุภาคน้ำมันและสารพอลิอิเล็คโทรไลต์มีความหนาแน่นของประจุต่ำ การเพิ่มความเข้มข้นของสารอิเล็คโทรไลต์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการลอยลดลง เนื่องจากการเกิด electrostatic shielding ทำให้ฟล็อคมีขนาดเล็กลง ในขณะที่แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคสารน้ำมันเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการรวมตัวแบบ patch flocculation

Zhu และคณะ (1997) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นโลหะซึ่งน้ำเสียประกอบด้วยไขมันและ mineral oil เป็นส่วนใหญ่ โดยการใช้สารพอลิเมอร์ในการกำจัดไขมัน น้ำมันและสารแขวนลอย โดยแบ่งการใช้งานเป็น 2 ระบบ คือ ระบบสารพอลิเมอร์เดี่ยว (single polymer system) ซึ่งใช้เฉพาะชนิดแคทอิออนิกเป็นโคแอกกูแลนท์ และระบบสารพอลิเมอร์คู่ (dual polymer system) ซึ่งใช้ชนิดแคทอิออนิกในการทำลายอิมัลชัน และชนิดแอนอิออนิกในการเพิ่มการเกิดโคแอกกูเลชัน พบว่าทั้งสองระบบให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ไขมันและสารแขวนลอยสูงถึง 99% จากน้ำเสียที่มีน้ำมันอยู่ในช่วง 1,080-3,271 มก/ล และสารแขวนลอยในปริมาณ 200-1,500 มก/ล

Pongstabadee (1998) ทำการศึกษาการกำจัดออร์โธไดคลอโรเบนซีนออกจากน้ำโดยทำการศึกษาการเกิดไมโครอิมัลชันของสารลดแรงตึงผิว ในการเกิดสภาวะวินเซอร์แบบที่หนึ่งไปสู่สภาวะวินเซอร์แบบที่สาม พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ประจุเป็นลบ และพบว่าที่สภาวะวินเซอร์แบบที่สาม ระบบเมื่อทำให้เป็นฟองลอยมีประสิทธิภาพการแยกสารสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีค่าแรงตึงผิวต่ำสุด เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสมและที่ความเข้มข้นเหนือจุดซีเอ็มซี สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งสามารถละลายสารน้ำมัน และสามารถเพิ่มการละลายของสารน้ำมันในน้ำได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารน้ำมัน ได้แก่ อัตราการเป่าอากาศ ขนาดของฟองอากาศและหยดน้ำมัน ค่าซีตาโพเทนเชียลของหยดน้ำมันและฟองอากาศ ความหนาแน่นของหยดน้ำมัน รวมทั้งความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็คโทรไลต์ที่เติม

Omar และคณะ (1998) ได้ศึกษาการนำกลับน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือตกค้างจากดินที่มาจากของเสียโรงกลั่น ซึ่งจะมีน้ำมันหล่อลื่นอยู่ประมาณ 30% งานวิจัยในห้องทดลองได้ทำการแยกสารน้ำมันโดยกระบวนการทำให้ลอย ซึ่งใช้ linear barium alkylbenzenesulfonates เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภท petroleum sulfonate ซึ่งนิยมใช้มากที่สุดในการทำให้น้ำมันลอย เนื่องจากความสามารถในการลดแรงตึงผิว มีช่วงการใช้งานที่กว้าง และยังมีราคาไม่แพง จากผลการทดลองได้พบว่า ที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 1.5 กิโลกรัมต่อตัน ให้ประสิทธิภาพการนำกลับน้ำมันประมาณ 86% โดยน้ำมันที่ได้นี้จะมีคุณภาพต่ำ ดังนั้นถ้าจะนำไปใช้ใหม่ จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเสียก่อน