

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

สารหนูหรือ อาร์เซนิก (Arsenic) ซึ่งกระจายทั่วไปในธรรมชาติ อาจพบได้หลายรูปแบบ เช่น สารหนูที่รวมอยู่กับ ออกซิเจน คลอรีน และซัลเฟอร์ในรูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic compound) หรือสารหนู ที่พบในสัตว์และพืชจะเป็นสารประกอบรวมตัวกับพวก คาร์บอน และ ไฮโดรเจน ในรูปของสารอินทรีย์ (Organic compound) สารประกอบของสารหนูที่เป็นสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการรักษาเนื้อไม้ ส่วนสารหนูในรูปของสารอินทรีย์นำไปทำเป็นยาฆ่าแมลง ในสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา สารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในธรรมชาติจะไม่สลายตัวหรือถูกทำลายลงไปจนหมด แต่จะมีการเปลี่ยนรูปไปเท่านั้น เช่นสารหนูที่ปะปนอยู่ในอากาศสามารถที่จะกลับลงมาสู่พื้นดินได้จากการชะล้างจากน้ำฝน และปะปนอยู่ในกระแสน้ำ หรือตะกอนท้องน้ำ สัตว์น้ำจำพวกปลาและหอย อาจมีสารหนูสะสมอยู่ได้เนื่องจากการกินอาหารของพวกมัน แต่โดยมากสารหนูในปลาจะไม่อยู่ในรูปที่เป็นพิษ

จากที่กล่าวมาข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าสภาพแวดล้อมและเทคโนโลยีรอบตัวเรา มีผลทำให้สารหนูเพิ่มมากขึ้นในธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ การทำเหมืองแร่ หรือแม้แต่เครื่องใช้อุปโภคที่เป็นไม้ มนุษย์สามารถรับเอาสารหนูเข้าไปในร่างกายได้หลายทางดังนี้ จากอาหาร น้ำดื่ม หรือทางอากาศโดยการหายใจ ซึ่งถ้าระดับของสารหนูที่เข้าไปในร่างกายมีปริมาณมาก (โดยเฉพาะสารอนินทรีย์) อาจทำให้เสียชีวิตได้ เป็นอันตรายต่อปอด และทางเดินหายใจ ทำให้การเดินของหัวใจผิดปกติ ถึงแม้รับปริมาณน้อยแต่เป็นระยะเวลานาน ก็จะทำให้เกิดโรคไข้ดำได้ อาการคือบริเวณผิวหนังจะเป็นเกล็ดสีดำ เกิดหูด ตามมือ เท้า ถ้าตัว

เราพบปัญหาจากการที่มีสารหนูปะปนอยู่ตามแหล่งน้ำต่างๆ ในหลายพื้นที่ของโลก เช่นแม่น้ำ Yangebup ในประเทศออสเตรเลีย แม่น้ำ Ogallala ในรัฐเท็กซัส สหรัฐอเมริกา ที่ประเทศบังคลาเทศ และได้หวัน โดยเฉพาะในประเทศบังคลาเทศ ประชากรเป็นจำนวนมากได้รับอันตรายจากสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำที่ใช้บริโภค (HVR 's arsenic project, 1999)

สารหนูเป็นสารพิษที่ทำให้ประชากรบางส่วนของโลก ได้รับผลกระทบต่อสุขภาพจากการดื่มและใช้น้ำจากแหล่งดังกล่าว สำหรับในประเทศไทย แหล่งน้ำที่อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นตัวอย่างหนึ่งของการมีสารหนูปนเปื้อน เนื่องจากมีการตรวจพบผู้ป่วยด้วยโรคไตดำครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2530 จึงนำไปสู่การค้นหาข้อมูล สาเหตุ และการร่วมมือกันแก้ไขจากหน่วยงานต่างๆในระยษะหนึ่ง ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลที่ผ่านมาเป็นดังนี้

จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีเขต1 สงขลา (2540) ที่อำเภอร้อนพิบูลย์พบความเข้มข้นของสารหนูที่ปนเปื้อนในกากแร่และดินมีค่า 0.004-1.79 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในน้ำผิวดิน น้ำบ่อตื้น และน้ำบาดาล พบปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในช่วง 0.001-0.769 มิลลิกรัมต่อลิตร

ณรงค์ ฅ เชียงใหม่ (2534) สำรวจพบว่า มีปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำต่างๆเขตอำเภอร้อนพิบูลย์ ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.055-5.556 มิลลิกรัมต่อลิตร

สุรพล อารีย์กุล (นิภา มหารัชพงค์, 2541 ,อ้างจาก สุรพล อารีย์กุล , 2534) เก็บตัวอย่างดินตะกอนท้องน้ำ และน้ำในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงในอำเภอ ร้อนพิบูลย์ ครอบคลุมพื้นที่ 12 ตารางกิโลเมตร พบว่าปริมาณสารหนูในดิน ในตะกอนท้องน้ำ และในน้ำ อยู่ในช่วง 50-5300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 120-6700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.026-1.45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ไพชยนต์ เจริญศรี (2535) ตรวจสอบสภาพพื้นที่บนเทือกเขาร้อนนา อำเภอร้อนพิบูลย์ พบแหล่งแร่ที่ยังมีกองขี้แร่อร์เซโนไฟไรต์เหลืออยู่ประมาณ 4 แหล่ง และจากการตรวจสอบการแพร่กระจายของสารหนูในแหล่งน้ำผิวดิน พบปริมาณการปนเปื้อนของสารหนูเกินมาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ (0.05มิลลิกรัมต่อลิตร) ทั้งในที่กักเก็บน้ำบนยอดเขาก่อนที่จะนำไปใช้ และน้ำที่ไหลออกจากพื้นที่อำเภอร้อนพิบูลย์

Hironaka, H และคณะ (นิภา มหารัชพงค์, 2541 ,อ้างจาก Hironaka, H และคณะ, 2535) จากFukuoka City Institute of Public Health ประเทศญี่ปุ่น ศึกษาหาปริมาณสารหนูและแคดเมียมในน้ำ เส้นผม และเล็บของชาวบ้านในอำเภอร้อนพิบูลย์ จากการศึกษพบว่าปริมาณสารหนูและแคดเมียมในน้ำมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ รวมทั้งพบปริมาณสารหนูและแคดเมียมในเส้นผมและเล็บของชาวบ้านด้วย

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีการแก้ไขหลายวิธี และถึงแม้ว่าปัจจุบันปริมาณสารหนูจะลดไปเองตามธรรมชาติ แต่ปัญหาการปนเปื้อนของสารหนูยังมีอยู่ ดังนั้นการบำบัดน้ำเพื่อลดปริมาณสารหนู เป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาาระบบการบำบัดน้ำมีหลายระบบแตกต่างกันออกไป ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาวิธีการบำบัด โดยวิธีเมมเบรนแบบดูดซึมย้อนกลับหรือรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

ตรวจเอกสาร

1. สารหนู

1.1. สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารหนู

สารหนู (Arsenic:As) เป็นธาตุกึ่งโลหะ (Semimetal) มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33 เป็นธาตุหมู่ 5A ซึ่งประกอบด้วย N,P,As,Sb และ Bi สารหนูมีสี่เงินแกมเทา ผิวคล้ำมัว ค่อนข้างเปราะ มีจุดหลอมเหลวที่ 817 องศาเซลเซียส และมีจุดระเหิดที่ 613 องศาเซลเซียส มีค่าวาเลนซ์หลายค่าคือ -3 , 0 , $+3$ และ $+5$ โดยทั่วไปไม่พบสารหนูอิสระในธรรมชาติ แต่จะพบรวมกับแร่ธาตุอื่นๆเช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ นิกเกิล และคลอรีน ในรูปสารประกอบอนินทรีย์และอินทรีย์ แร่ธาตุต่างๆซึ่งมีสารหนูเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 1

ตาราง 1 แร่ธาตุต่างๆที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ (Robert Y. Ning, 2002)

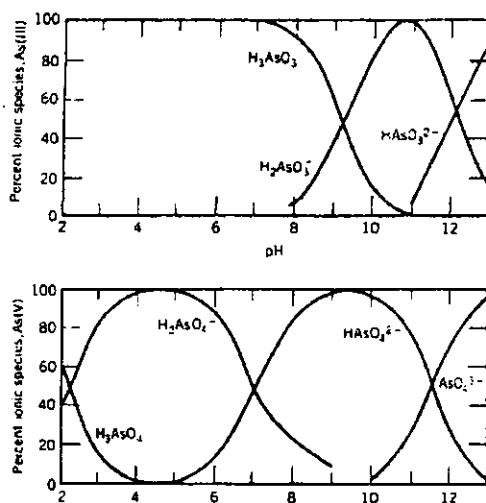
ชนิดของแร่	สูตรโมเลกุล
Arsenopyrite	FeAsS
Lollingite	FeAs ₂
Orpiment	As ₂ S ₃
Realgar	As ₄ S ₄
Chloanthite	NiAs ₂
Niciolite	NiAs
Smalite	CoAs ₂
Cobalite	CoAsS
Gerdorffite	NiAsS
Tennantite	4Cu ₂ SAs ₂ S ₃
Proustite	3Ag ₂ SAs ₂ S ₃
Enargite	3Cu ₂ SAs ₂ S ₃

แร่ที่พบมากที่สุด คือ อาร์ซีโนไฟไรต์ (Arsenopyrite) เรียลกา (Realgar) และ ออร์พิเมนต์ (Orpiment) ตามลำดับ

1.2. สารหนูในน้ำธรรมชาติ

ในน้ำธรรมชาติสารหนูหรืออาร์เซนิก มีค่าวาเลนซ์ +5 (As(V): arsenate) และ วาเลนซ์ +3 (As(III): arsenite) เกิดเป็นสารประกอบกับไฮโดรเจนและออกซิเจนหลายชนิด ขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำ และการแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton) ในระบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 1

- As(III) (Arsenite)หรือสารหนูวาเลนซ์ +3 ในน้ำธรรมชาติทั่วไป (pH 6-8) มักจะอยู่ในรูปของ H_3AsO_3 เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ ดังนั้นจึงกำจัดสารหนูชนิดนี้ได้ยาก เพราะเกิดปฏิกิริยาได้ยาก
- As (V) (Arsenate) หรือสารหนูวาเลนซ์ +5 สารประกอบของอาร์เซนเตในน้ำมักจะอยู่ในรูปของไอออน $HAsO_4^{2-}$ (pH 8-10) และ $H_2AsO_4^-$ (pH 3-6) โดยไอออนของสารประกอบจะมีประจุเป็นลบ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับได้ง่ายโดยตะกอนของสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และ อลูมิเนียม (Al)



ภาพประกอบ 1 โมเลกุลและไอออนของ As(III) และ As(V) ในน้ำที่ pH ต่างๆ

ในน้ำธรรมชาติ นอกจากค่า pH แล้วพบว่า อุณหภูมิ ตะกอนแขวนลอยในน้ำ ความเข้มข้นของโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก หรือ พวกรวมของสารประกอบของซัลไฟด์ ฤดูกาล อัตราการไหลของกระแสน้ำ รวมทั้งองค์ประกอบและการกระจายตัวบริเวณใกล้เคียงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ ความสัมพันธ์เป็นดังนี้ ถ้าค่า pH และความเข้มข้นของสารหนูมีค่าสูง ปริมาณของตะกอนหรือของแข็งซึ่งแขวนลอยในน้ำจะมีน้อย ในทางกลับกันถ้า ปริมาณ

ของแข็งแขวนลอยมีมาก ความเข้มข้นของสารหนูและค่า pH ต่ำ เพราะสารหนู โดยเฉพาะสารหนูวาเลนซ์ +5 (Arsenate) ชอบเกาะติดกับอนุภาคหรือตะกอนแขวนลอยมากกว่าที่จะละลายในน้ำ พวกตะกอนหรืออนุภาคที่เป็นของแข็งในน้ำอาจจมหรือนอนก้นสำหรับทะเลสาบน้ำลึก ทำให้สารหนูมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ในขณะที่ทะเลสาบน้ำตื้นมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเนื่องจากมีกระแสลมทำให้เกิดคลื่นในน้ำมีการชะล้าง อนุภาคหรือตะกอนในน้ำมากขึ้น และในเวลากลางวัน สารหนูอาจมีการเปลี่ยนรูปมากถึง 21% ส่งผลให้ ค่า pH เปลี่ยนเนื่องจากแสงแดด และปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัล

สำหรับสารหนู ที่เป็นสารอินทรีย์ โดยทั่วไปจะเกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ แบคทีเรีย รวมทั้งสาหร่ายหรือพืชน้ำบางชนิด ทำให้เกิดปฏิกิริยา methylation เปลี่ยนสารอนินทรีย์ให้เป็นสารอินทรีย์ รวมทั้งสามารถ ออกซิไดซ์ สารหนูวาเลนซ์ +3(Arsenite) ให้เป็นสารหนูวาเลนซ์ +5 (Arsenate) หรือ รีดิวซ์ Arsenate ให้เป็น Arsenite ได้ หรือแม้แต่ อาร์ซีนิน อย่างไรก็ตามสารหนูที่เป็นสารอินทรีย์ที่พบมากที่สุดมี 2 ชนิด คือ Methylarsonic Acid ($\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$) และ Dimethylarsinic Acid ($(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$) (US-Environment Protection agency, 2000)

ความเข้มข้นของสารหนูในสิ่งแวดล้อม แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ความเข้มข้นของสารหนูในสิ่งแวดล้อม (Robert Y. Ning , 2000)

Environmental media	Arsenic concentration range
Air , ng/m ³	1.5-53
Rain from unpolluted ocean air $\mu\text{g/l}$ (ppb)	0.019
Rain from terrestrial air, $\mu\text{g/l}$	0.46
River , $\mu\text{g/l}$	0.20-264
Lakes , $\mu\text{g/l}$	0.38-1000
Ground (well) water , $\mu\text{g/l}$	<1.0 - > 1000
Seawater , $\mu\text{g/l}$	0.15-6.0

Environmental media	Arsenic concentration range
Soil , mg/kg (ppm)	0.1-1000
Stream/ river sediment , mg/kg	5.0-4000
Lake sediment , mg/kg	2.0 - 300
Igneous rock , mg/kg	0.3 - 113
Metamorphic rock , mg/kg	0.0 -143
Sedimentary rock , mg/kg	0.1 - 490

โดยทั่วไปมีการกำหนดค่ามาตรฐานจำกัดปริมาณสารหนูในน้ำที่ใช้บริโภค ในปี ค.ศ.1942 สหรัฐอเมริกา กำหนดค่ามาตรฐาน (Maximum Contaminant Level; MCL) 50 $\mu\text{g/l}$ ในปัจจุบัน ค่า MCL ซึ่งควบคุมโดย US Environmental Protection Agency (USEPA) กำหนดให้อยู่ในช่วง 2 –20 $\mu\text{g/l}$ (John J. Waypa ,Menachem Elimelech and Janet G. Hering , 1997)

1.3. ความเป็นพิษ (Toxicity)ของสารหนู

สารหนูเมื่อเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าทางใด จะเกิดการสะสม และหากมีปริมาณมากพอ จะส่งผลให้เกิดอาการต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ อาการเฉียบพลัน (Acute Poisoning) และอาการเรื้อรัง (Chronic Poisoning) ดังนี้

1. อาการเฉียบพลัน เกิดจากการรับสารหนูปริมาณมากๆในคราวเดียว ซึ่งจะพบอาการตามระบบต่างๆเกือบทุกระบบ อาการที่เกิด ได้แก่ การแสบร้อนในคอ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ไอ เจ็บหน้าอก หายใจยาก ซีฟจรเต้นเบา มีความดันเลือดต่ำ แขนขาไม่มีแรง มีภาวะโลหิตจาง และเม็ดเลือดขาวต่ำ ชัก หหมดสติ และที่สำคัญอาจถึงตายได้

2. อาการพิษเรื้อรัง เกิดขึ้นเมื่อรับพิษสารหนูสะสมในร่างกาย มีปริมาณมากพอ อาการทั่วไปเกิดอาการอ่อนเพลีย ปวดเมื่อย ปวดท้อง และสีผิวเข้มขึ้น เป็นจุดสีน้ำตาลปนดำ หรือจุดสีขาว ตามลำตัวมีตุ่มแข็งเล็กๆ คล้ายหูด ตามฝ่ามือ ฝ่าเท้า หรือลำตัว และอาจกลายเป็นมะเร็งผิวหนังจนถึงมะเร็งในปอดได้ในที่สุด

2. วิธีการลดความเข้มข้นของสารหนู

เทคโนโลยีในการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยทั่วไปมีอยู่หลายวิธี อาจแบ่งได้เป็น 6 วิธีดังนี้

2.1. กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สารหนูในน้ำมี 2 รูปแบบคือ Arsenate (As(V)) และ Arsenite (As(III)) ในการบำบัดน้ำหรือกำจัดสารหนู จะมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัด Arsenate ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่า Arsenite เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลเป็นกลาง ไม่มีประจุ ($\text{pH} < 9$) ดังนั้นการบำบัดโดยเทคโนโลยีต่างๆ จึงมีขั้นตอนการออกซิเดชัน เปลี่ยน Arsenite ให้เป็น Arsenate อยู่ด้วยเสมอ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจทำง่ายๆโดยการเติมออกซิเจน (อากาศ) ลงไป สารเคมีตัวอื่นๆ ได้แก่ คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ โอโซน สารประกอบเปอร์แมงกาเนต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ Fenton's reagent ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) นอกจากนี้ปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัลสามารถออกซิไดซ์สารหนูได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม วิธีการออกซิเดชันเพียงขั้นตอนเดียวไม่สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายได้ จะต้องมีวิธีการอื่นๆเพิ่มเข้ามาด้วย

นิภา มหารัชพงศ์ (2540) ศึกษาการลดความเข้มข้นของสารหนู โดยมีการออกซิไดซ์สารหนูให้เป็น Arsenate ก่อนที่จะ ตามด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูถึง 90% จากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนู 3.72 mg/l

T. Viraraghavan, K.S.Subramanian and J.A. Aruldoss (1999) ศึกษาวิธีการลดความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ออกซิเดชันสารหนู ตามด้วยกระบวนการกรองโดยใช้ทรายที่เคลือบด้วยแมงกานีส และ Iron-oxide โดยสามารถลดความเข้มข้นของสารหนูจาก 200 $\mu\text{g/l}$ ให้ต่ำกว่า 25 $\mu\text{g/l}$

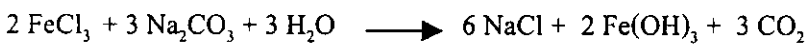
2.2. กระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอน (Precipitation-Coagulation Process)

กระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอน เป็นการรวมกระบวนการต่างๆ เช่น การทำปฏิกิริยา กลไกการเกิด ที่ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ใหญ่ขึ้น และเกิดการตกจม (Settling) ซึ่งการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันเรียกว่าโคแอกกูเลชัน และเรียกการที่ทำให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ว่าการรวมตะกอน (Flocculation) กระบวนการนี้ส่วนใหญ่จะใช้เกลือของสารประกอบอลูมิเนียมและเหล็ก เพื่อกำจัดสารแขวนลอยในน้ำ แต่สารละลายที่อยู่ในน้ำบางชนิด เช่น สารประกอบฟอสเฟต โลหะหนักและสารอินทรีย์บางชนิด สามารถที่จะสร้างพันธะกับสารประกอบของเหล็กและอลูมิเนียม แล้วเกิดการตกตะกอนโดยการดูดซับประจุของสารเหล่านั้นไว้ที่ผิวหรือเกิดการทำให้ปฏิกิริยาและตกตะกอนโดยตรง

สารหนูเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความเป็นพิษและมีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดไอออนมาติดที่ผิวรอบนอกได้ โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำชอบจับกับไอออนลบมากกว่าไอออนบวก ทำให้สารหนูถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์

สำหรับการทำโคแอกกูเลชัน โดยใช้เกลือของเหล็ก จากการศึกษาของ Sorg and Logsdon (1978) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูวาเลนซี +5 (Arsenate) มีมากกว่า 90 % ที่ pH 7 แต่สารหนูวาเลนซี +3 (Arsenite) ทำได้เพียง 50% จากความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 mg/l

การตกตะกอนสารหนูด้วย เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) เป็นวิธีที่ค่อนข้างได้ผล โดยสมการในการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้



และสมการการเกิดปฏิกิริยาของ Fe(OH)₃ กับสารประกอบของสารหนู



2.3. กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

เป็นขั้นตอนการถ่ายโอนมวล สารหนูจะถูกถ่ายโอนจากของเหลวไปยังพื้นผิวของของแข็ง และเกิดการยึดติดกัน โดยแรงทางเคมีหรือแรงทางกายภาพ กระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นบนอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการ โคแอกกูเลชันและการตกตะกอน และอาจเกิดบนตัวดูดซับชนิดต่างๆ สำหรับตัวดูดซับนั้นมีหลายชนิดอาจแยกตาม คุณสมบัติ ลักษณะทางกายภาพ และราคา ได้แก่

- Oxide (Ferric Oxide , Titanium Oxide ,Selenium Oxide)
- ทราชหรือหินที่เคลือบด้วย Iron-oxide หรือ MnO₂
- แร่พวก Bauxite และ Hematite
- เรซินชนิดที่แลกเปลี่ยนประจุลบ
- วัสดุที่ทำจาก เซลลูโลส เช่น ขี้เลื่อย หรือเนื้อกระดาษหนังสือพิมพ์
- ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)
- Activated Alumina

จากการศึกษาของ Rosenblum and Clifford (1984) โดยการวัดปริมาณของสารหนู (Arsenate) ที่ถูกดูดซับบน Activated Alumina โดยเทียบออกมาเป็นความเข้มข้นได้ถึง 0.05-0.2 ppm และค่า pH ที่เหมาะสมคือ 5.5-6

2.4. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange)

เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยโครงสร้างหลักของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลง เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุส่วนใหญ่เป็นพวก โพลีเมอร์ที่มีพันธะ Cross-Link เช่น Polystyrene เกิดพันธะ Cross-Link กับ Vinylbenzene สำหรับหมู่ฟังก์ชัน (Function Group) ของเรซินแต่ละชนิด จะยึดติดกับโครงสร้างหลักโดยการเกิดพันธะโคเวเลนต์ (Covalent) และอาจแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกันดังนี้

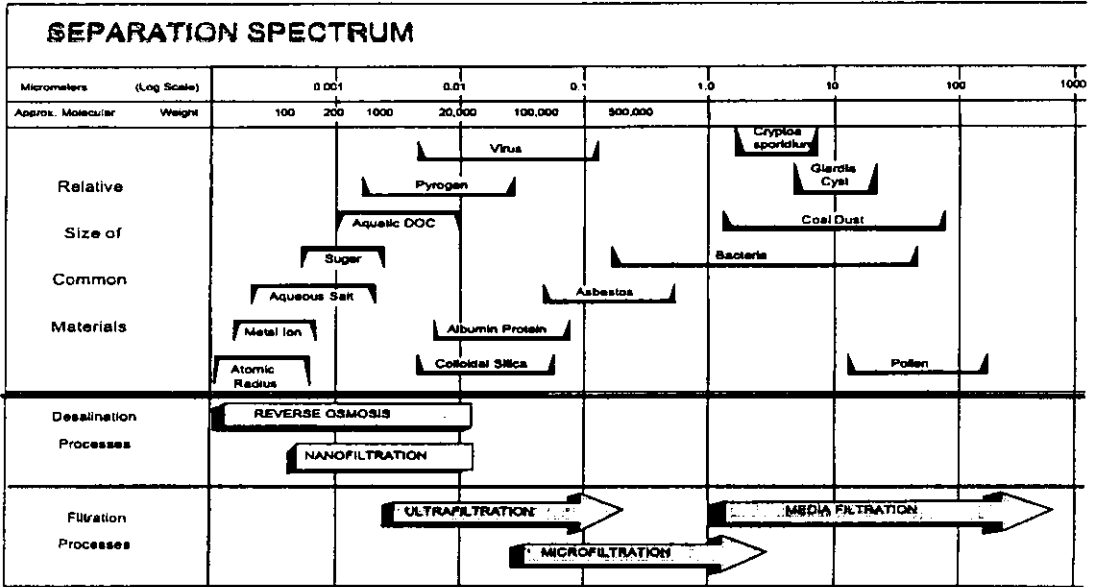
- กรดแก่ (Strong Acid)
- กรดอ่อน (Weak Acid)
- เบสแก่ (Strong Base)
- เบสอ่อน (Weak Base)

เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchange Resin) ชนิดที่มีความเป็นเบสแก่ หลายชนิด สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ จนความเข้มข้นมีน้อยกว่า $1 \mu\text{g/l}$ ส่วนสารหนูที่มีโมเลกุลเป็นกลาง ต้องถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนจาก Arsenite (As(III)) ให้เป็น Arsenate (As(V)) ก่อนแล้วจึงนำมาผ่านเรซิน ที่นิยมใช้กับสารหนูคือ Nitrate –Selective Resin และ Sulfate –Selective Resin

E. Komgold , N. Belayev and L. Aronov (2001) ศึกษาการลดความเข้มข้นของสารหนูวเลนซี 5 โดยใช้ เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุลบทำการทดลอง และเป็นชนิดเบสแก่ พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมคือที่ 7.1 หรือมากกว่า จากความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น $600 - 800 \mu\text{g/l}$ ลดลงได้ต่ำกว่า $10 \mu\text{g/l}$ แต่ใช้เวลาในการดำเนินการที่ยาวนาน และราคาสูง

2.5. กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนซึ่งเป็นแผ่นเชื้อเลือกผ่าน เพื่อที่จะแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากน้ำ เมมเบรนสามารถกำจัดของแข็งที่ละลายน้ำ หรือไอออนหลายชนิดรวมทั้งสารหนูออกจากน้ำได้ และมักจะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำน้ำทะเล หรือน้ำกร่อย ให้เป็นน้ำสะอาด เราอาจจำแนกประเภทของเมมเบรนได้จาก การใช้ความดัน , ขนาดรูพรุน , ค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้นซึ่งจำแนกได้ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 อนุภาค/โมเลกุล ที่แยกโดยกระบวนการเมมเบรน (Westerhoff and Chowdhury, 1996)

ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน ขนาดค่อนข้างใหญ่ ($0.1-10 \mu\text{m}$) สำหรับแยกโมเลกุลใหญ่ สารแขวนลอยหรืออนุภาค เล็กๆ ออกจากของเหลว โดยช่วงความดันหรือแรงขับเคลื่อนในการป้อนสารละลาย จะค่อนข้างต่ำ คืออยู่ในช่วง 100-500 kPa (1-5 atm) การใช้งานหลักส่วนใหญ่ ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำ เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ และใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งเป็นต้น

อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) สำหรับแยกสารโมเลกุลใหญ่ คอลลอยด์ (colloid) ออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็ก เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-20 nm ความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลาย อยู่ในช่วง 100-800 kPa (1-8 atm) การใช้งานหลักๆ คือ การแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโปรตีน, คอลลอยด์, การบำบัดน้ำทิ้ง ทำน้ำให้บริสุทธิ์ การทำน้ำผลไม้ให้ใสเป็นต้น

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) เป็นกระบวนการแยกสารละลายโดยใช้ผลต่างของความดันระหว่างเมมเบรนเป็นแรงขับเคลื่อน เมมเบรนชนิดนี้ มีความสามารถในการกักกันโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาล (น้ำหนักโมเลกุล น้อยกว่า 1000 หรือมีขนาด $0.1-1 \text{ nm}$) แต่ยอมให้น้ำ

ผ่านได้ และเป็นเมมเบรนที่มีโครงสร้างแน่น ไม่มีรูพรุน การผ่านเมมเบรนของสารเกิดจากความ สามารถในการละลายและการแพร่ (Solution-Diffusion) ในเมมเบรน และเนื่องจากสารละลายของ ตัวถูกละลายโมเลกุลเล็กมีความดันออสโมติกสูง ทำให้ความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายต้องมี ค่าสูง คืออยู่ระหว่าง 1-10 MPa (10-100 atm) การประยุกต์ใช้ที่แพร่หลายคือ การแยกเกลือจากน้ำ กร่อย น้ำทะเล เพื่อผลิตน้ำจืด การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ การผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ตลอดจนการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักเจือปน เช่น จากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ

นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการที่มีหลักการเหมือน ในระบบรีเวอร์ สออสโมซิส ใช้สำหรับแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เกลืออนินทรีย์ สารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล กลูโคส ซูโครส กรดอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำทิ้ง เมมเบรนส่วนใหญ่มีขนาดรูพรุนที่ เล็กมาก มีโครงสร้างที่เป็คกว่า เมมเบรน ใน RO อาจพิจารณาว่า นาโนฟิลเตรชัน คือ RO แบบความ ดันต่ำ (Low Pressure Reverse Osmosis , LPRO) เพราะช่วงความดันในการดำเนินการประมาณ 10-20 bar สูงกว่าอัลตราฟิลเตรชัน และต่ำกว่า RO มาก การใช้งานหลัก ได้แก่ การกำจัดเกลือจาก น้ำกร่อย การลดความกระด้างของน้ำ (Softening) การแยกสารพิษโมเลกุลเล็กออกจากน้ำ การแยก สารให้สีออกจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรนแบบอื่นๆซึ่งจะไม่กล่าวถึงอย่างละเอียด เช่น กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis ,ED) , กระบวนการเพอเวปอเรชัน (Pervaporation ,PV) , การแยกด้วยเมมเบรนซึ่งเป็นของเหลว (Liquid membrane , LM) เป็นต้น

จากการศึกษาของ Philip Brandhuber and Gary Amy (1998) ทำการทดลองโดยใช้ RO, NF , และ UF เมมเบรน บำบัดน้ำใต้ดินซึ่งมีความเข้มข้นของ สารหนู 15 – 20 $\mu\text{g/l}$ ดังนั้นการ ทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนจะทดลอง 2 ครั้ง โดยทดลองกับน้ำใต้ดินที่มีค่าสาร อินทรีย์สูง (Dissolved Organic Compound ,DOC) และน้ำที่มีค่า DOC ต่ำ ผลการทดลองปรากฏ ว่า เมมเบรน RO สามารถลดปริมาณสารหนูได้มากที่สุด และน้ำที่มีค่า DOC สูงจะให้ผลที่ดีกว่าน้ำ ที่มีค่า DOC ต่ำ

Paulina Kokonen and MattiValve (2000) จากหน่วยงานรักษาสิ่งแวดล้อมในประเทศฟิน แแลนด์ทำการศึกษา การลดปริมาณความเข้มข้นของสารหนู โดยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ทำ การทดลองโดยใช้เมมเบรน 2 ชนิด (แบ่งตามวัสดุและโครงสร้างของเมมเบรน) คือ Cellulose Acetate (AC) และ Thin Film Composite (TFC) พบว่า เมมเบรน TFC ให้ประสิทธิภาพดีกว่าเมม เบรน AC ที่ความดัน 3.3 –4 Bar จากความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นที่ 50 และ 500 $\mu\text{g/l}$ สามารถ ลดความเข้มข้นของสารหนูจนเหลือ 7 และ 100-300 $\mu\text{g/l}$ ส่วนที่ความดัน 8 Bar เมมเบรน TFC สามารถลดความเข้มข้นจาก สารหนู 500 $\mu\text{g/l}$ ให้เหลือปริมาณ 7 $\mu\text{g/l}$

จากการศึกษาของ Taro Uraes , Jeong-ik OH and Kazuo Yamamoto (1998) ทำการทดลอง โดยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน สารหนูที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ Arsenate (As(V)), Arsenite (As(III)) และ สารอินทรีย์ Dimethyl Arsinic Acid (DMMA) ซึ่งพบว่าค่า pH และประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรนมีผลต่อการลดปริมาณความเข้มข้นของสารหนู

- ใน Arsenite ที่ pH3 เปอร์เซนต์การกักกันสารหนู (Rejection) มีค่าเพียง 50 % แต่เมื่อ pH เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซนต์การกักกันเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จนกระทั่ง pH 10 มีค่าถึง 89 % เพราะที่ pH 10 ไอออน Arsenite มีประจุ -1 ในขณะที่ pH3 , 5 และ 7 Arsenite เป็น โมเลกุลที่ไม่มีประจุ
- ใน ไอออน Arsenate มีประจุ - 1 และ -2 ตลอดช่วง pH 3-10 ค่าเปอร์เซนต์การกักกันเพิ่มขึ้นจาก 87 % - 93%
- สำหรับใน DMMA ค่าเปอร์เซนต์การกักกัน มีมากกว่า 98 % ตลอดการทดลอง

2.6. การเลือกใช้เทคโนโลยีในการลดความเข้มข้นของสารหนู

ก่อนที่เราจะเลือกวิธีการกำจัดสารหนูในน้ำหัวข้อที่จะต้องพิจารณามีดังนี้ (Gregory C. Gilles, 2000)

- 2.6.1. สภาพของแหล่งน้ำ ว่ามีลักษณะทางกายภาพและคุณภาพเป็นอย่างไร เช่น ปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำหรือ Total Dissolved Solid (TDS) เพราะอาจมีผลต่อการลดปริมาณสารหนู
- 2.6.2. ความเข้มข้นของสารหนูและชนิดของสารหนูว่าเป็นสารหนูวาเลนซ์ +3 หรือ วาเลนซ์ +5 เพราะถ้าหากว่ามีสารหนูวาเลนซ์ +3 มากอาจต้องทำการ ออกซิไดซ์ให้เป็นสารหนูวาเลนซ์ +5 ก่อน
- 2.6.3. ความยืดหยุ่นและความง่ายต่อการปรับและเปลี่ยนในเทคโนโลยีนั้นๆ เช่นอาจมีการทำให้มีขนาดเล็ก ปรับปรุงมาใช้งานในบ้านได้เป็นต้น
- 2.6.4. อายุการใช้งานและการบำรุงรักษา พิจารณาว่าเทคโนโลยีนั้นสามารถใช้งานได้ยาวนานหรือไม่ การบำรุงรักษายากหรือง่าย ต้องมีการใช้สารเคมีหรือไม่
- 2.6.5. ต้นทุน เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน
- 2.6.6. การยอมรับจากสถาบันต่างๆหรือมีข้อมูลที่ยืนยันแล้วว่าเทคโนโลยีนี้สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสารหนูได้

ตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในการลดปริมาณความเข้มข้นของสารหนูโดยเทคโนโลยีต่างๆ แสดงในตารางที่ 3

ตาราง 3 ข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีในการกำจัดสารหนู (Dainichi Consultant, 1998)

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
กระบวนการตกตะกอน Alum Coagulation Iron Coagulation	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนต่ำ - สารเคมีหาได้ง่ายและมักจะ เป็นผงสะดวกในการขนย้าย - สามารถลดปริมาณสารหนูได้ ดีแม้ความเข้มข้นเริ่มต้นจะมีค่า มาก 	<ul style="list-style-type: none"> - มีปัญหาทั้งในระยะสั้นและ ระยะยาวเรื่องสลัดจ์ - ต้องมีการปรับ pH , มีขั้นตอน การกรอง - ใช้สารเคมีหลายชนิด
กระบวนการดูดซับ Activated Alumina Ion Exchange Resin	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นที่ยอมรับ และหาได้ง่าย - มีประสิทธิภาพที่ดี - กำหนดปริมาณและความ ต้องการในการใช้วัสดุที่แน่นอน ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการปรับ pH - มีราคาค่อนข้างสูง - ต้องมีการทำ standardized - ต้องมีการดูแลรักษาและ ดำเนินการที่สม่ำเสมอ - ปัญหาเรื่องสลัดจ์
กระบวนการเมมเบรน Reverse Osmosis Electrodialysis	<ul style="list-style-type: none"> - มีคุณภาพที่ดีและแน่นอน - ไม่มีปัญหาจากสลัดจ์ - ต้องการพื้นที่น้อย - สามารถกำจัดสิ่งตัวปนตัวอื่น ได้ด้วย 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนสูง - ต้องมีการดูแลรักษาอย่าง สม่ำเสมอ - เมมเบรนไม่ทนต่อ สารเคมีที่ ใช้ในการออกซิไดซ์

สำหรับประสิทธิภาพของการลดปริมาณสารหนูในน้ำ วิธีต่างๆแสดงเปรียบเทียบ ไว้ใน

ตารางที่ 4

ตาราง 4 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน (นิยามหารัชพงค์, 2540)

วิธีการบำบัด	สารหนูวาเลนซี +3	สารหนูวาเลนซี+5
Aeration and Stripping	P	P
Coagulation , Sedimentation , Filtration	F – G	G – E
Lime Softening	F – G	G – E
Membrane Process		
- Reverse Osmosis	F – G	G – E
- Electrodialysis	F – G	G – E
Chemical Oxidation and Disinfection	P	P
Adsorption		
- Granular Activated Carbon (GAC)	F – G	F – G
- Powder Activated Carbon (PAC)	P – F	P – F
Ion Exchange		
- Anion	G – E	G – E
- Cation	P	P
- Activated Alumina	G – E	E

หมายเหตุ : P = Poor

F = Fair

G = Good

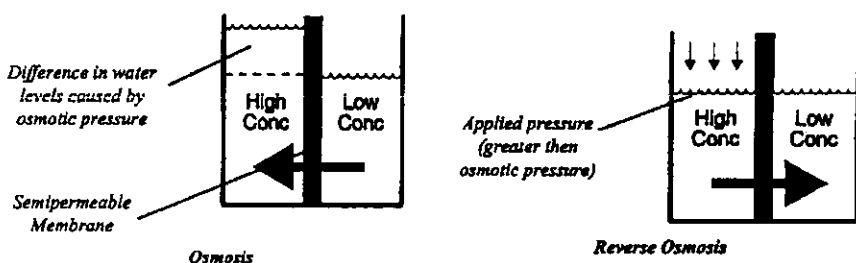
E = Excellent

3. กระบวนการดูดซึมย้อนกลับหรือรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรน (Membrane) แยกน้ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล ไม่เกิน 500 (เช่น เกลือ น้ำตาล) โดยการป้อนสารละลายภายใต้ความดันสูงผ่านเมมเบรนที่มีคุณสมบัติเลือกผ่านน้ำ การประยุกต์ใช้ในงานปัจจุบันนิยมนำไปใช้ในการผลิตน้ำดื่มจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล และการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง (Ultra pure water)

3.1. หลักการของ รีเวอร์สออสโมซิส

รีเวอร์สออสโมซิสมีที่มาจากออสโมซิส จากภาพประกอบ 3 แสดงหลักการของออสโมซิสเทียบกับรีเวอร์สออสโมซิส พบว่าในออสโมซิส น้ำในด้านสารละลายเจือจางจะแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังด้านสารละลายเข้มข้น เนื่องจากมีค่าศักย์ภาพเคมี (Chemical potential) สูงกว่า การแพร่จะดำเนินไปจนกระทั่งถึงจุดสมดุลนั่นคือ ค่าศักย์ภาพเคมีของน้ำทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ผลต่างของความดันของสารละลายทั้งสองด้าน $\Delta\pi$ ก็คือผลต่างของความดันออสโมติก (Osmotic pressure) ในระบบรีเวอร์สออสโมซิสจะมีการให้ความดันทางด้านสารละลายเข้มข้นจนสามารถเอาชนะแรงดันออสโมติก ทำให้น้ำในด้านสารละลายเข้มข้นแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังด้านสารละลายเจือจาง ซึ่งเป็นการแพร่กลับทิศทางกับออสโมซิส



ภาพประกอบ 3 หลักการของออสโมซิสและรีเวอร์สออสโมซิส

ความดันออสโมติกของสารละลายสามารถคำนวณจากสมการ Van't Hoff

$$\pi = C_i RT/M_i \quad (1)$$

π = ความดันออสโมติก (psi หรือ Kpa)

C_i = ความเข้มข้นเชิงมวลของสารละลาย (kg/cm^3)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

M_i = น้ำหนักโมเลกุลของสาร i

สมการ (1) ใช้สำหรับสารละลายเจือจางหรือสารละลายอุดมคติ (Ideal solution) เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่า π เบี่ยงเบนไปจากที่คำนวณได้จากสมการ (1) และควรคำนวณจาก สมการในรูปของ Virial expansion ดังนี้

$$\pi = \frac{RT}{M_1} C_1 + BC_1^2 + \dots \quad (2)$$

B = ค่าคงที่

และสำหรับสาร โมเลกุลใหญ่ค่า π ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล

$$\pi = aC_1^n \quad (3)$$

a = ค่าคงที่ , n > 1

3.2. แบบจำลองการถ่ายเทมวล

มีผู้เสนอแบบจำลองหรือทฤษฎี เพื่ออธิบายกลไกการแยกผ่านเมมเบรน ในระบบรีเวอร์สออสโมซิสอยู่หลายแบบจำลอง เช่น แบบจำลอง การละลาย - การแพร่ (Solution - Diffusion) แบบจำลองการไหลผ่านรูพรุน (Porous flow) และแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ไม่ผันกลับ (Irreversible thermodynamics) เป็นต้น เนื่องจากในระบบรีเวอร์สออสโมซิสไม่ใช่เมมเบรนชนิดที่เป็นรูพรุน แต่เป็นเมมเบรนแบบแน่นที่ไม่สมมาตร (Asymmetric membrane) ทำให้แบบจำลองที่พิจารณาการไหลผ่านรูพรุนเป็นหลักไม่สามารถอธิบายการถ่ายเทมวลได้ถูกต้อง ส่วนแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ไม่ผันกลับ เมื่อนำมาอธิบายการถ่ายเทมวลในระบบ รีเวอร์สออสโมซิส มีการพิจารณาการถ่ายเทมวลของแต่ละองค์ประกอบมีผลกระทบซึ่งกันและกัน แต่ไม่ได้พิจารณากลไกในเมมเบรน และการหาค่าตัวแปรต่างๆค่อนข้างซับซ้อนในระบบหลายองค์ประกอบ ดังนั้นแบบจำลองการละลาย - การแพร่ จะอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่า

แบบจำลองการละลาย - การแพร่

พัฒนาขึ้น โดย Lonsdale และคณะซึ่งอธิบายว่าทั้งตัวถูกละลายและตัวทำละลาย (น้ำ) ต่างก็ละลายเข้าไปในเมมเบรนและแพร่โดยมีผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อน เนื่องจากตัวถูกละลายและน้ำมีความสามารถในการละลายในเมมเบรน (อาจเกิดจากอันตรกิริยา แบบใดแบบหนึ่ง เช่น การดูดซับ) และการแพร่ผ่านเมมเบรนต่างกัน จึงเป็นผลให้เกิดการแยกตัวถูกละลายและน้ำออก

จากกัน การที่ตัวถูกละลายถูกกักกันโดยเมมเบรนแสดงว่าตัวถูกละลายจะละลายในเมมเบรนได้จำกัด สมการสำหรับคำนวณฟลักซ์ของน้ำหรือตัวทำละลายคือ

$$J_v = L_p (\Delta P - \Delta \pi) \quad (4)$$

J_v = ฟลักซ์ของตัวทำละลาย ($L/m^2 \cdot hr$)

L_p = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) ($L/m^2 \cdot hr \cdot Pa$)

ΔP = ผลต่างความดันระหว่างเมมเบรน (Pa)

$\Delta \pi$ = ผลต่างความดันออสโมติกระหว่างเมมเบรน (Pa)

L_p เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของตัวทำละลายและเมมเบรนนั้นๆ สำหรับรีเวอร์สออสโมซิส L_p มีค่าประมาณ $3 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-6}$ ($m^3/m^2 \cdot hr \cdot bar$) ส่วนฟลักซ์ของตัวถูกละลายกำหนดโดยสมการ (5)

$$J_s = K_s \Delta C_s \quad (5)$$

J_s = ฟลักซ์ของตัวถูกละลาย ($mol/m^2 \cdot s$)

K_s = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวถูกละลาย (m/s)

ΔC_s = ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (mol/m^3)

$$= C_R - C_P$$

C_R = ความเข้มข้นของรีเทนเตต (Retentate)

C_P = ความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากเมมเบรน (Permeate)

K_s เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายและการแพร่ผ่านเมมเบรนของตัวถูกละลายและจากสมการที่ (4) จะเห็นว่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับความดันที่ให้กับสารละลาย ส่วน J_s ไม่ขึ้นกับความดันและฟลักซ์ของน้ำ หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้ไม่ได้พิจารณาการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างน้ำกับตัวถูกละลาย ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ ส่วนความสามารถในการกักกัน (Rejection) หาได้จากสมการที่ 6

$$R = 1 - C_p/C_F \quad (6)$$

R = สัมประสิทธิ์การกักกัน(เศษส่วนหรือเปอร์เซ็นต์)หรือค่าการกักกัน

C_F = ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเข้า

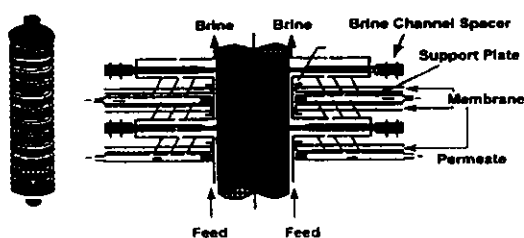
3.3. โมดูลชนิดต่างๆของระบบรีเวอร์สออสโมซิส

ในปัจจุบัน มีการสร้างโมดูลรีเวอร์สออสโมซิสแบบต่างๆ 4 แบบ คือ แบบแผ่น (Plate and frame) , แบบท่อ (Tubular) , แบบม้วน (Spiral wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber)

(1)โมดูลแบบแผ่น (Plate and frame module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนแบบง่ายที่สุด โมดูลที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงาน คล้าย Filter Press แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกมาได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับจากนั้นไหลออกจากโมดูล โมดูลแบบนี้ต้องเสียบค่าติดตั้งและดูแลรักษาแพงมาก ตัวอย่างโมดูลแสดงในภาพประกอบ 4

Plate & Frame Reverse Osmosis

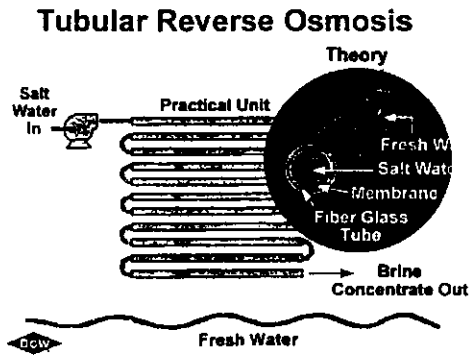


ภาพประกอบ 4 เมมเบรนโมดูลแบบแผ่น

(2)โมดูลแบบท่อ (Tubular module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรน ให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 12 cm และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่ง ที่ทำด้วยกระดาษหรือใยสังเคราะห์ และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนไม่ให้ฉีกขาดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออก

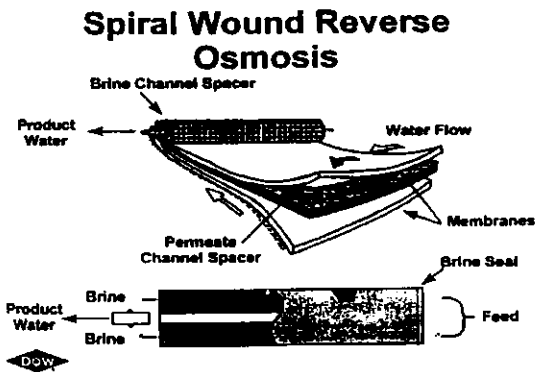
ของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำเค็มที่มีความดันสูงจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อที่มีแผ่นเมมเบรนอยู่ภายใน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับ ออกสู่ภายนอก เทคนิคนี้ผลิตน้ำได้น้อยแต่ทำความสะอาดได้ง่าย ดังแสดงใน ภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 เมมเบรน โมดูลแบบท่อ

(3) โมดูลแบบม้วน (Spiral wound module)

เป็นการนำเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นกั้นที่มีรูพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นเมมเบรนรอบท่อแกนกลาง (ดังรูป) โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 , 10 , 20 หรือ 30 cm และมีความยาวต่างๆกันแต่ไม่เกิน 1 เมตร มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตร 300-1000 m^2/m^3 น้ำเค็มถูกบังคับให้ไหลตามแนวแกน จากนั้นแรงอัดทำให้น้ำซึมผ่านชั้นเมมเบรน(ตามแนวรัศมี)ลงไปยังแกนกลาง ออกจากโมดูล องค์ประกอบและลักษณะของโมดูลแสดงดังภาพประกอบ 6

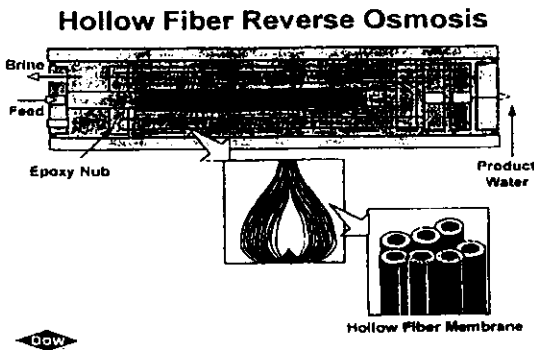


ภาพประกอบ 6 เมมเบรน โมดูลแบบม้วน

Central Library Prince of Songkla University

(4) โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber module)

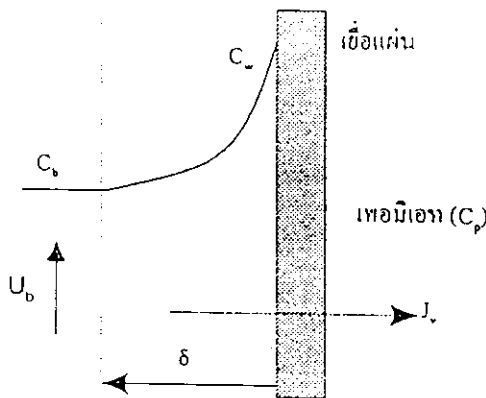
โมดูลชนิดนี้สร้างเป็นเส้นใยกลวงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเพียง 0.1-0.5 ไมโครเมตรและความหนาของเส้นใยอยู่ระหว่าง 1-2 ไมโครเมตร จึงไม่มีชั้นรองรับการนำไปใช้งานมักจะมัด fiber รวมกัน แล้วบรรจุในตัวบรรจุ อุปกรณ์นี้มีพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรสูง อาจสูงถึง $30000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ตัวอย่างโมดูลแสดงในภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 เมมเบรนโมดูลแบบเส้นใยกลวง

3.4. Concentration Polarization (CP)

เป็นคำที่อ้างถึงเสมอในการศึกษางานวิจัยพื้นฐานในกระบวนการเมมเบรน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีการสะสมตัวของ โมเลกุล/อนุภาค ของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรน สูงกว่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายใน Bulk Solution (บริเวณที่อยู่ห่างออกไป) มีผลให้ตัวถูกละลายแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังด้านของ Permeate ทำให้มีผลต่อค่าการกักกัน (Rejection) ภาพประกอบ 8 แสดงการเกิด CP ในรีเวอร์สออสโมซิส



ภาพประกอบ 8 การเกิด Concentration Polarization

การควบคุมมวลสาร

ตัวถูกละลายถ่ายเทไปยัง - ตัวถูกละลายที่แพร่ = ตัวถูกละลายที่ผ่านเมมเบรน
 เมมเบรนโดยการพา กลับสู่สารละลาย Bulk

$$J_v C - D \frac{dC}{dX} = J_v C_p \quad (7)$$

เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของตัวทำละลาย
 C = ความเข้มข้นของสารละลาย
 X = ระยะทางวัดจากผิวเมมเบรน
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย
 C_p = ความเข้มข้นใน Permeate

โดยขอบเขต : $x = 0, C = C_w$ (ความเข้มข้นที่ผิวของเมมเบรน)

$x = \delta, C = C_b$ (ความเข้มข้นใน bulk)

จากสมการ (7) จะได้

$$J_v = \frac{D}{\delta} \ln \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p} \quad (8)$$

ค่าการกักกันในปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Intrinsic Rejection (R_{int})

$$R_{int} = 1 - \frac{C_p}{C_w} \quad (9)$$

จากสมการ (8)

$$\frac{C_w}{C_b} = \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \quad (10)$$

เมื่อค่า C_p น้อยมากหรือเท่ากับ 0, $k = \frac{D}{\delta}$ = Mass transfer coefficient of solute at low

flux or no permeation

เรียก $\frac{C_w}{C_b}$ ว่า Polarization modulus จากสมการข้างต้น Sherwood นำสมการมาดัดแปลง

จะได้

$$\frac{C_w}{C_b} = \exp\left(\frac{J_v Sc^{0.667}}{J_D U_b}\right) \quad (11)$$

โดย $Sc = \frac{U}{D}$, D = kinematic viscosity (cm^2/s)

U_b = ความเร็วของสารละลาย (bulk)

J_D = Chilton –Colburn j factor

จากสมการ(11)กล่าวได้ว่า CP จะเกิดขึ้นได้ง่ายภายใต้สภาวะที่ ความเร็วของสารป้อนเข้าช้า และค่าฟลักซ์ของตัวทำละลายมีค่าสูง

3.5. การเกิด Fouling

นอกจากการเกิด CP ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิด fouling ในเมมเบรนแล้ว ลักษณะการเกิดยังมีอีกหลายประเภทดังนี้

(1) การอุดตัน (Plugging) เป็นการที่อนุภาคขนาดเล็ก ไปอุดตันที่รู (pore) ของเมมเบรน สารประกอบที่มักจะทำให้เกิด plugging ได้แก่ คอลลอยด์ของ เหล็ก , คอลลอยด์ของซิลิกาและคอลลอยด์ของ พวกลอยอินทรีย์เป็นต้น ขนาดของคอลลอยด์ที่ทำให้อุดตันมีขนาดใหญ่เป็น 1/5 เท่าของรูเมมเบรน

(2) Biological Fouling เกิดเนื่องจากการดูดซับของพวกจุลินทรีย์ (Microorganisms) กลไกการเกิดแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

- การอุดตันแบบ Blocking เกิดจากเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น Humic Substance พวกนี้จะขยายเซลล์เป็น layer ทำให้กันหรือกีดขวางการแพร่ผ่าน รู ของเมมเบรน การขยายตัวของเมมเบรนอาจทำให้ layer หนาถึง 20 ไมโครเมตร

- Microbial attacking เกิดเนื่องจากแบคทีเรียไปทำลายเมมเบรน ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของโมเลกุลเมมเบรน การป้องกันทำได้โดยการกำจัดแบคทีเรียเหล่านี้

(3) การตกตะกอนที่ผิวของ Solute ที่ผิวเมมเบรน (Precipitation of Solute on Membrane Surface) เกิดจากตะกอน หรือตะกอน ที่ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนของตัวถูกละลายน้อยลง หรือถ้าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของเมมเบรนมากพอจนเกิดการตกผลึกหรือตกตะกอนได้

(4) การเกิด Gel Formation เกิดได้ 2 สาเหตุ คือ

- Compressible Gel Foulants ส่วนใหญ่เป็น โมเลกุลของสารที่มีการแพร่ต่ำ เช่น ยาฆ่าแมลง (Pesticide) , ฟีนอล , โมเลกุลโปรตีน , น้ำมัน เป็นต้นนอกจากนี้ยังมีพวก Humic Substance ซึ่งอยู่ในดิน

- Non – Compressible Gel Foulants เกี่ยวข้องกับการตกผลึกที่ผิวของเมมเบรน เช่นพวกสารประกอบของ CaSO_4 , CaCO_3 , Mg(OH)_2 , Fe(OH)_3 และพวกไฮดรอกไซด์ของโลหะอื่น โดยเฉพาะ Amorphous Silica ซึ่งส่วนใหญ่เมื่อก่อตัวขึ้นจะกำจัดได้ยาก

(5) การเสื่อมสภาพของเมมเบรน (Membrane Degradation) เกิดขึ้นเนื่องจากการทำลายของแบคทีเรีย หรือ เกิดจากสารเคมีบางชนิด เช่น คลอรีน (Cl_2) หรือ แอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการเกิด fouling ใน RO เมมเบรน

วิธีการบำบัดแสดงในตารางที่ 5

ตาราง 5 แสดงระบบบำบัดใช้สำหรับการป้องกันการเกิด Fouling ใน RO

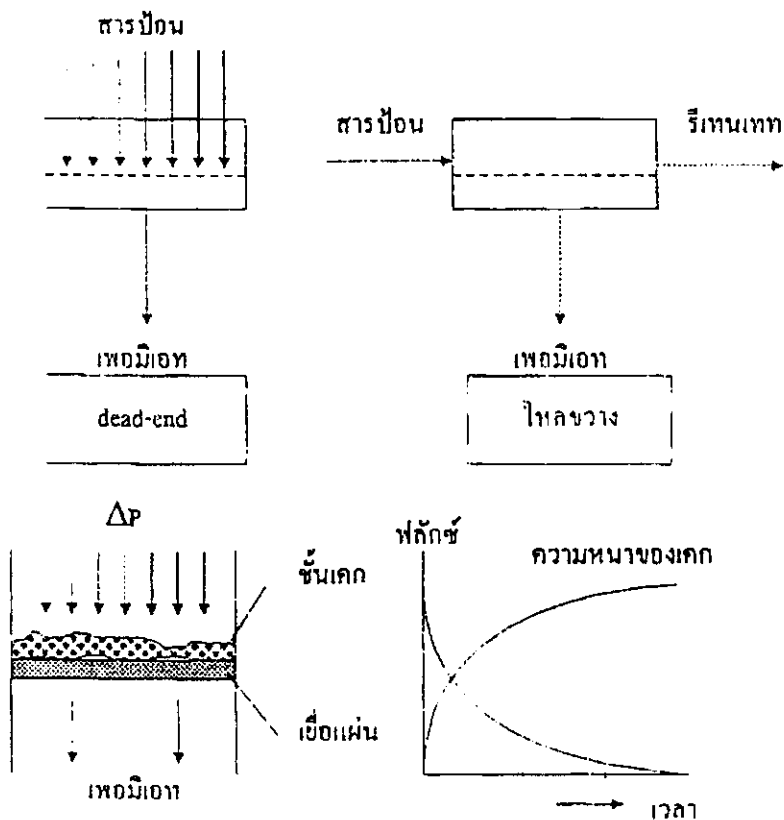
ชนิดของสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน	วิธีการบำบัดเบื้องต้น
ของแข็งแขวนลอยและอนุภาค	- ตะแกรงหยาบ - ไฮโดรไซโคลน - Cartridge Filters - เครื่องกรองแบบหลายชั้นกรอง
คอลลอยด์	- Coagulation ตามด้วยการกรอง - อัลตราฟิลเตรชัน
ตะกอนเกลือ	- การเติมกรด/สารต้านตะกอน - การทำน้ำอ่อน
โลหะออกไซด์	- ทำความสะอาดโดยกรด
จุลินทรีย์	- เติมคลอรีนหรือ เติมโอโซน หรือ เติมคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4)
สารอินทรีย์	- Coagulation ตามด้วยการกรอง , การดูดซับ - การออกซิเดชันโดยสารเคมี , UF/NF

3.6. การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบในที่นี้หมายถึง การกำหนดลักษณะการไหลของสารละลายผ่านอุปกรณ์เมมเบรน ตลอดจนการนำหน่วยอุปกรณ์แต่ละหน่วยมาต่อกัน หรือจัดเรียงเพื่อให้การแยกเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ได้อัตราการผลิตตามต้องการ มีสมรรถนะสูงสุดและประหยัด

เมื่อได้เลือกรูปแบบอุปกรณ์เมมเบรน ที่เหมาะสมกับสารละลายแล้ว ต้องพิจารณาลักษณะการไหลผ่านเมมเบรน ซึ่งมี 2 แบบ แสดงในภาพประกอบ 9

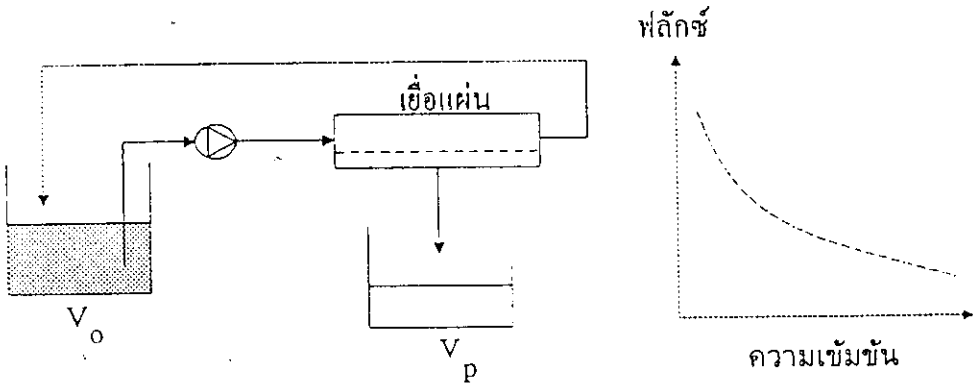
- สารป้อนเข้า (Feed) ไหลทิศทางเดียวกันกับ Permeate เรียก Dead End ในระบบนี้เมื่อดำเนินการเป็นระยะเวลาานานจะเกิดการสะสมของตัวถูกละลายที่ถูกกักกันบนผิวของเมมเบรน อย่างต่อเนื่องทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าตัวถูกละลายมีขนาดใหญ่หรือเป็นอนุภาค ก็จะทำให้เกิดการสะสมของเค้ก (Cake) ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นกับเวลา
- สารป้อนเข้าไหลขนานกับผิวของเมมเบรน เรียกว่า Cross- Flow จะช่วยลดการเกิด Concentration Polarization และ Fouling



ภาพประกอบ 9 การป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนแบบ Dead End และ Cross Flow

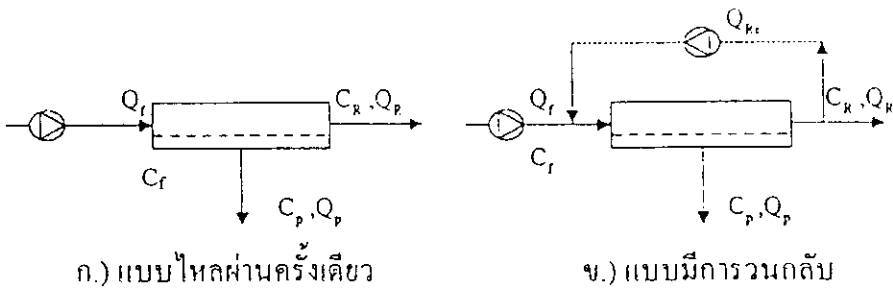
การดำเนินการอาจแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลักๆ (คล้ายกับกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีทั่วไป) คือระบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous)

(1) ระบบกะ (Batch) กรณีที่ต้องการแยกสารละลายปริมาณไม่มาก เพราะเป็นระบบที่ดำเนินการได้ง่าย และได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการเมื่อเสร็จสิ้นในแต่ละกะซึ่งอาจใช้เวลานาน ตัวอย่างแสดงใน ภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 การดำเนินการในระบบกะ

(2) ระบบต่อเนื่อง (Continuous) มีข้อดีที่สามารถผลิตหรือบำบัดสารละลายได้อย่างต่อเนื่องและได้อัตราการผลิตสูง เพราะสามารถนำหน่วยอุปกรณ์มาต่อ หรือจัดเรียงเพื่อขยายขนาดได้ นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่ใช้แรงงานต่ำ แต่ต้องมีระบบควบคุมที่เหมาะสม ดังนั้นระบบในอุตสาหกรรมส่วนมากจึงเป็นระบบต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบ 11 รูป ก เป็นการไหลผ่านครั้งเดียว (Single pass) ซึ่งหมายถึงสารละลายผ่านเมมเบรนออกไปเป็นเพอมีเอทและรีเทนเททโดยไม่มีการวนกลับ รูป ข จะมีการวนกลับของรีเทนเทท



ภาพประกอบ 11 การดำเนินการแบบต่อเนื่องและขั้นตอนเดียว

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษากระบวนการดูดซึมย้อนกลับ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูโดยกระบวนการดูดซึมย้อนกลับ
3. เพื่อบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม (0.05 ppm) และมาตรฐานใหม่ขององค์การอนามัยโลก (0.02 ppm)
4. เพื่อนำความรู้ไปประยุกต์ใช้จริงได้ในอุตสาหกรรม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการต่างๆ ในการลดความเข้มข้นของสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำ
2. รู้ข้อมูลของการทำงาน ประสิทธิภาพ และเศรษฐศาสตร์ของระบบดูดซึมย้อนกลับ
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีประโยชน์ในการแก้ปัญหาต่อไป