

## บทที่ 2

### การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โครเมียม

##### ลักษณะทั่วไป

โครเมียมเป็นโลหะทรานซิชัน มีน้ำหนักโมเลกุล 51.9961 จำนวนอะตอมเท่ากับ 24 จุดหลอมเหลว 1857 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สัญลักษณ์ Cr มีหมายเลขออกซิเดชันหลายค่าตั้งแต่ -2 ถึง +6 ที่พบโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ  $Cr^0$  (ธาตุ),  $Cr^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  และ  $Cr^{6+}$  แต่  $Cr^{2+}$  มักจะไม่เสถียร โดยจะถูกออกซิไดซ์เป็น  $Cr^{3+}$  โดยอากาศ โครเมียมเป็นโลหะที่มีสีขาวนวล สุกใส ไม่ขุ่นมัว ไม่ต้องขัดถูบ่อยๆ มีความผิวดำ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและไม่เป็นสนิม ประโยชน์ของโครเมียมคือนำไปผสมกับโลหะอื่นๆในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ และใช้ชุบบนผิวโลหะอื่นๆเพื่อป้องกันไม่ให้โลหะนั้นๆเกิดสนิมและขุ่นมัว นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นอย่างกว้างขวาง แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ(Ullmann's,1986 อ้างถึงในพูนพิศาร ชัยพันธุ์,2538)

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม(II)ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต โครเมียม(VI)ออกไซด์	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต โครเมียม(VI)ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมต(VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมการชุบโลหะ	โครเมียม(VI)ออกไซด์	ความสวยงาม แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต โครเมียม(VI)ออกไซด์	ป้องกันเชื้อราและแมลง
อุตสาหกรรมการฟอกหนัง	โครเมียม(III)ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต โครเมียม(III)อะซิเตต, โครเมียม	ย้อมสีผ้า

### คุณสมบัติของผิวเคลือบโครเมียม

1. จากคุณสมบัติของโครเมียมที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ( $\text{CrO}_3$ )บนผิวหน้า ฟิล์มนี้เฉื่อยชา และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง สีของฟิล์มจึงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อโดนอากาศ และไม่ละลายในน้ำ ฟิล์มนั้นละลายในกรดเกลือ และละลายในกรดกำมะถันเล็กน้อย แต่ไม่ละลายในกรดไนตริก

2. ผิวเคลือบโครเมียมมีสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานน้อยมาก จึงมีคุณสมบัติทนทานความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน เช่น ชิ้นงานที่ดึงออกมาจากแม่พิมพ์ หรือมีกิมพ์จะไม่ติดบนลูกกลิ้งที่ชุบโครเมียม

3. จากการที่จุดหลอมเหลวของโครเมียมบริสุทธิ์สูงถึง 1857 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าโลหะอื่น เช่น เหล็ก(1530 องศาเซลเซียส) นิกเกิล(1435 องศาเซลเซียส) สังกะสี(419 องศาเซลเซียส) และดีบุก(232 องศาเซลเซียส) ทำให้มันไม่ค่อยรวมกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงและไม่ละลายมาก ดังนั้นเพลตาต่างๆที่ใช้งานหนักและมีความเร็วสูงจึงต้องชุบด้วยฮาร์ดโครมเพื่อป้องกันไม่ให้มันละลาย

4. การชุบฮาร์ดโครมจะได้ความแข็งของผิวไม่น้อยกว่า 800 จิกเกอร์ ภายใต้เงื่อนไขการชุบปกติ ซึ่งความแข็งนี้มากกว่าเหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง และเหล็กที่ผ่านการทำไนไตร์ ดังนั้นการชุบฮาร์ดโครมจึงเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการทำให้ผิวแข็ง

5. การชุบโครเมียมจะมีคุณสมบัติของความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งเป็นการป้องกันชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการชุบโครเมียม ให้มีทั้งความทนทานต่อการกัดกร่อน และทนต่อแรงขัดสี โดยชุบทองแดงและนิเกิลรองพื้น (การชุบโครเมียมในอุตสาหกรรม,ม.ป.ป.)

### ความเป็นพิษของโครเมียม

โครเมียมทั่วไปจะอยู่ในรูปของ  $Cr^{3+}$  และ  $Cr^{6+}$  โดย  $Cr^{6+}$  จะมีความเป็นพิษสูงกว่า  $Cr^{3+}$  และในรูปอื่นๆ โดยค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ที่ผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ โดยพณฯ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้กำหนดให้มีปริมาณ  $Cr^{6+}$  ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $Cr^{3+}$  ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในคนที่อยู่ในวัยเจริญพันธุ์สามารถรับโครเมียมเข้าในร่างกายได้ 50-70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว (WHO, 1988) ซึ่งถ้ารับในปริมาณที่มากเกินไปก็จะมีผลกระทบต่อตับ ไต และต่อระบบเลือด ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมีทั้งผลกระทบแบบเฉียบพลัน (Acute effect) ที่เกิดจากการได้รับโครเมียมเข้าไปในปริมาณที่มากๆ จะทำให้เกิดการอาเจียร อุจจาระร่วง ตกเลือดและมีเลือดไหลเข้าสู่ระบบลำไส้ ซึ่งจะทำให้ช็อคได้ แต่ถ้าเวลาผ่านไป 8 วันแล้วคนไข้ยังสามารถมีชีวิตอยู่ได้ คนไข้ก็จะมีอาการตายของเนื้อเยื่อบริเวณตับและไต และมีระบบเลือดที่เป็นพิษ ส่วนผู้ที่ได้รับโครเมียมในปริมาณที่ไม่มากนักก็จะได้รับผลกระทบแบบเรื้อรัง (Chronic effect) ซึ่งการได้รับผลกระทบแบบเรื้อรังนี้ผู้ป่วยอาจจะได้รับโครเมียมจาก 2 ทางคือ จากการสัมผัสกับโครเมียมโดยตรง ซึ่งโครเมียมก็จะไปทำลายผิวหนัง ทำให้เกิดแผลพุพอง มีลักษณะเป็นวงกลมเล็กๆ ลึกๆ ไม่มีอาการเจ็บ แต่จะคันมากในเวลากลางคืน และอีกทางหนึ่งก็คือการหายใจเอาไอของโครเมียมเข้าไป ก็จะมีผลต่อปอด ตับ ไต ระบบลำไส้ และโดยเฉพาะผนังกันจมูกซึ่งจะสัมผัสกับโครเมียมโดยตรง อาจทำให้เป็นมะเร็งบริเวณนี้ได้ นอกจากนั้นยังอาจทำให้เป็นโรคเยื่อจมูกอักเสบ โรคปอดและหลอดลมอักเสบ โครเมียมสามารถทำให้เกิดเป็นมะเร็งได้เฉพาะบริเวณผนังกันจมูกและที่ปอดเท่านั้น ส่วนบริเวณเนื้อเยื่ออื่นๆยังไม่มีรายงานว่าโครเมียมสามารถทำให้

เกิดมะเร็งได้ นอกจากนี้โครเมียมยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม เนื่องจากโครเมียมทำปฏิกิริยากับ RNA ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ (World Health Organization [Who], 1988)

### การชุบโครเมียม (Chromium plating)

การชุบเคลือบโครเมียมบนโลหะอื่น ในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

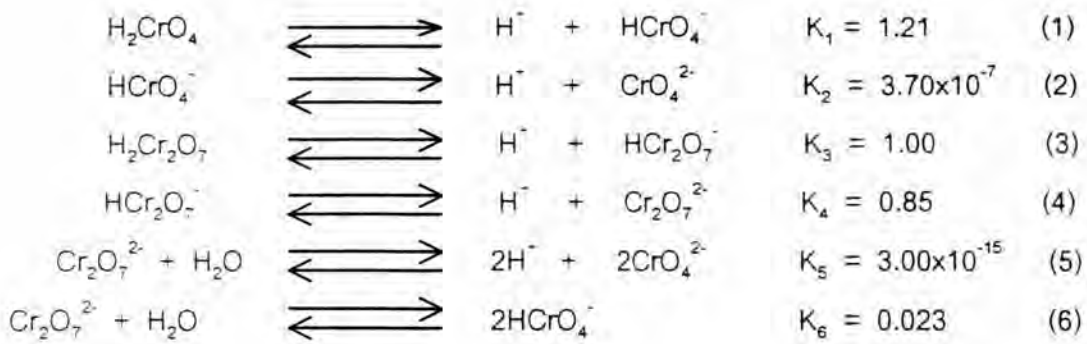
#### 1. การชุบโครเมียมชนิดบางหรือชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative chromium)

การชุบชนิดนี้มีจุดมุ่งหมายป้องกันไม่ให้โลหะอื่นเป็นสนิม และให้สวยงามทนต่อการถูกร่อน การชุบเคลือบในลักษณะนี้มักจะชุบโครเมียมค่อนข้างบางมาก โดยหนาประมาณ 0.00001 ถึง 0.0003 นิ้ว หรือ 0.25-0.8 ไมครอน และจะต้องชุบรองพื้นด้วยนิเกิล หรือชุบทองแดงแล้วชุบนิเกิลไว้ก่อน

#### 2. การชุบโครเมียมชนิดหนา ซึ่งเรียกว่า Hard Chromium หรือ Hard Chrome

การชุบชนิดนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความหนาให้ผิวโลหะนั้นๆ เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องมือ เครื่องจักร ที่สึกหรอไปเพราะการใช้งาน ถ้านำมาชุบโครเมียมให้หนาขึ้น แล้วนำไปเจียรระไน ก็จะสามารถนำไปใช้งานได้ดีเหมือนเดิม หรือมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผิวโลหะนั้นๆ มีความแข็งแกร่ง ทนต่อความร้อน ทนต่อการเสียดสี มีความผิวดำ เช่น ก้านไฮดรอลิค การชุบในลักษณะนี้ต้องใช้เวลา มาก ด้วยเหตุที่ชุบนานจึงได้โลหะโครเมียมหนาและแข็งแกร่งมาก ปกติแล้วมักจะชุบกันที่ความหนาตั้งแต่ 0.001 นิ้วขึ้นไป และโดยมากชุบโครเมียมโดยตรงบนเหล็ก โดยไม่ต้องชุบรองพื้นด้วย ทองแดงหรือนิเกิล (การชุบโครเมียม, ม.ป.ป.)

การชุบโครเมียมต่างกับการชุบด้วยโลหะชนิดอื่นที่ไม่ได้ใช้โลหะโครเมียมที่จับบวก แต่จะใช้โลหะโครเมียมในรูปของสารละลายกรดโครมิก (Chromic acid) ซึ่งเป็นสารประกอบโครเมียม(VI) ออกไซด์ เมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นกรดโครเมตชนิดต่างๆ โดยมีทั้งที่อยู่ในรูปของกรดแบบโมโน ได ไตร และเตตระโครมิก เมื่ออยู่ในสารละลายกรดหรือมีความเข้มข้นสูงจะมีสีส้มแดงของไดโครเมต กรดโครมิกเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรง สามารถเกิดเป็นสารประกอบเกลือกับโลหะและต่าง การแตกตัวของโครเมตที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังสมการ



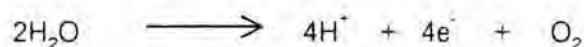
จากสมการ (1)-(6) แสดงว่าความเข้มข้นของแต่ละแอนไอออนของโครเมียม(IV) ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ถ้า pH ของสารละลายลดลง จะมี  $\text{HCrO}_4^-$  และ  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  เพิ่มขึ้น เพราะเกิดขึ้นจาก  $\text{CrO}_4^{2-}$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{H}^+$  กลุ่มนักวิจัย Bourikas และคณะได้รายงานไว้ที่ pH = 2.5 จะมี  $\text{HCrO}_4^-$  มากกว่า 99% และที่ pH = 11.5 จะมี  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  มากกว่า 99% อยู่ในสารละลาย และได้คำนวณหาความเข้มข้นของแต่ละแอนไอออนของโครเมียมในช่วง pH 4.0-8.0 โดยกำหนดช่วงของโครเมียม(IV)  $6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2}$  M (Bourikas และคณะ, 1997)

จากนั้นก็ใช้ขั้วบวก (Anode) เป็นตัวล่อ ซึ่งทำจากโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วหรือใช้พลวง ในการชุบโครเมียมนั้นเริ่มจากจุ่มชิ้นงานที่ต่อกับขั้วบวก (cathode) ลงในน้ำยาชุบโลหะ (electrolyte) โดยใช้กรดโครมิก ( $\text{CrO}_3$ ) ผสมกับกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) อัตราส่วน 100:1 เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไป โครเมียม ( $\text{Cr}^{6+}$ ) ที่อยู่ในสารละลายจะถูกรีดิวซ์ที่ขั้วลบ เปลี่ยนเป็นโลหะโครเมียม ( $\text{Cr}^0$ ) เกาะชิ้นงานที่ขั้วลบนั่น ดังสมการ

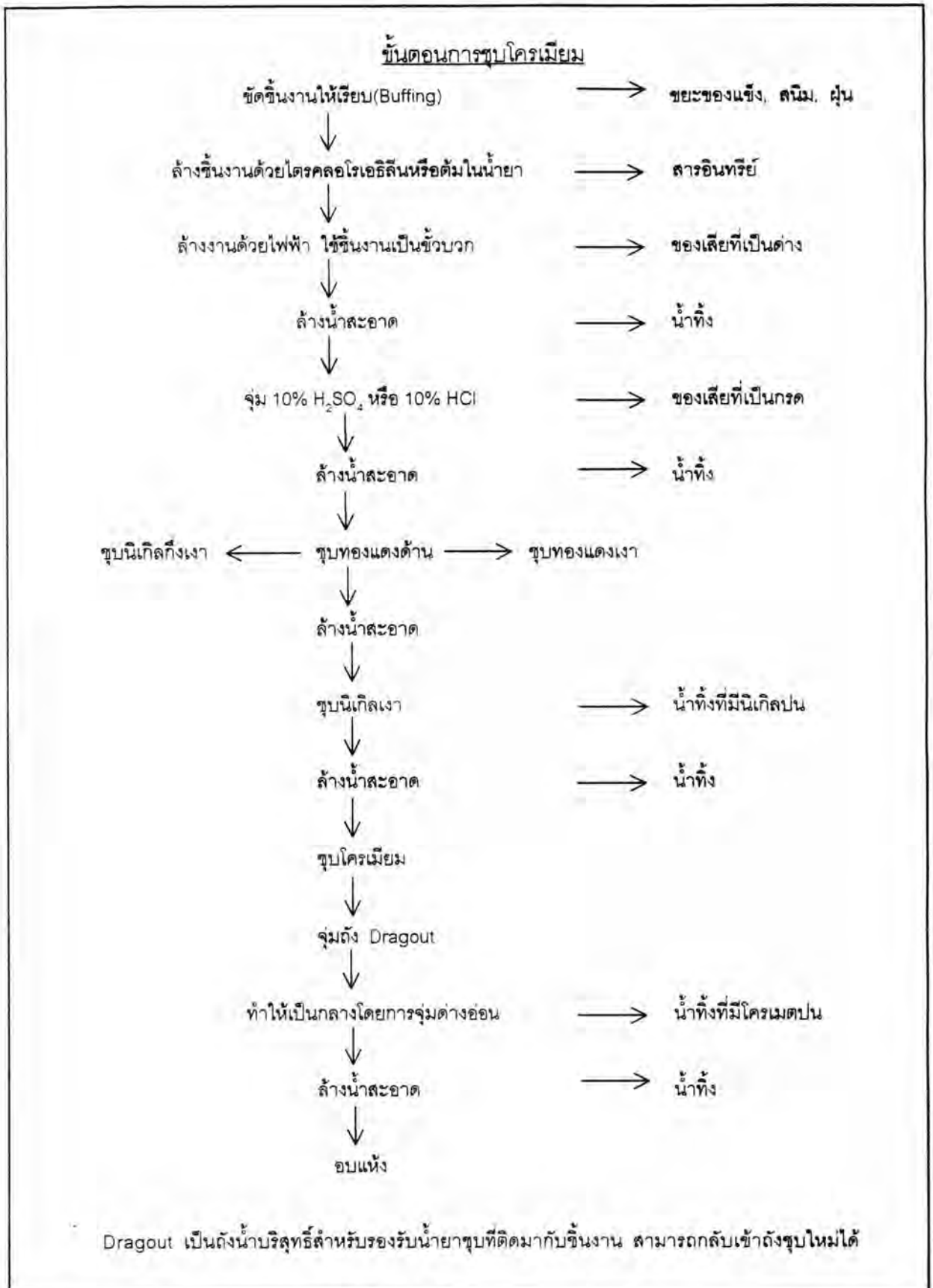
ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ (Cathode Reaction)



ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก (Anode Reaction)



ก่อนการนำชิ้นงานมาชุบโครเมียม จะต้องมีการเตรียมชิ้นงาน ดังขั้นตอนแสดงในผังของภาพที่ 2.1 โดยชิ้นงานจะต้องผ่านการขัดผิวให้เรียบ อุปกรณ์การขัดประกอบด้วยมอเตอร์หรือเครื่องขัดชนิดต่างๆ ได้แก่ ล้อขัด (polishing wheel), ผงทราย (emery), ยาขัด



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการชุบโครเมียมและน้ำทิ้งจากกระบวนการ(พุทธิสาร ชัยพันธุ์,2538)



(polishing compound), ล้อขัดที่เคลือบด้วยผงทราย (emery wheel), ล้อผ้าหยาบ, ล้อผ้าละเอียด, ล้อหางม้า และล้อแปรงลวด(การขัดชิ้นงานก่อนการชุบ,ม.ป.ป.) จากนั้นจึงล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมีหลายขั้นตอน และแต่ละขั้นตอนจะมีสิ่งปนเปื้อนลงในน้ำทิ้ง (ด้านขวาของแผนผัง) ซึ่งจะมีทั้งสนิมเหล็กและผงฝุ่นที่เกิดจากการขัดชิ้นงาน ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าทุกชนิด เช่น การชุบทอง การชุบโครเมียม การชุบนิเกิล ความสะอาดของชิ้นงานเป็นสิ่งจำเป็นมาก ถ้าชิ้นงานไม่สะอาดเพียงพอแล้วจะทำให้การชุบไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร ฉะนั้นก่อนจะนำชิ้นงานไปทำการชุบจะต้องเตรียมผิวงานให้เรียบ ไม่มีริ้วรอย โดยวิธีการขัดแล้วทำความสะอาดโดยวิธีการล้าง

ชิ้นงานที่ผ่านจากกระบวนการผลิต เช่น งานปั๊มมักมีน้ำมันหล่อลื่นติดบนผิวงาน ชิ้นงานที่ผ่านการขัดก็มีไขมันจากยาขัดติดอยู่บนผิวงาน น้ำมันหรือไขมันเหล่านี้จะต้องกำจัดออกให้หมดด้วยวิธีการล้าง ชิ้นงานที่มีไขมันหรือน้ำมันติดอยู่มาก ควรจะล้างด้วยน้ำยาทำละลาย (solvent) ตัวยาทำละลายจะละลายไขมันบนผิวงานออกชั้นหนึ่งก่อน แล้วจึงนำไปล้างในน้ำยาต่างต่อไป ตัวยาทำละลายที่ละลายไขมันได้ดี ได้แก่

1. ไตรคลอโรเอททีลีน (Trichloroethylene)
2. เปอร์คลอโรเอททีลีน (Perchloroethylene)
3. 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-Trichloroethanes)
4. ไตรคลอโร-ไตรฟลูออโรอีเทน (Trichloro-trifluoroethanes)
5. คาร์บอน เตตรา คลอไรด์ (Carbon tetrachloride)

ตัวยาทำละลายเหล่านี้จะละลายไขมันบนผิวงานโลหะได้ดี โดยการนำชิ้นงานลงแช่ในน้ำยา แล้วเช็ดด้วยผ้าสะอาด ปล่อยให้แห้ง(การล้างชิ้นงานก่อนการชุบ,ม.ป.ป.) น้ำเสียส่วนนี้จะมีสภาพเป็นด่าง ต่อจากนั้นจะเป็นการล้างด้วยไฟฟ้า โดยกลับขั้วให้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก เพื่อขจัดโลหะที่ติดอยู่ออก แล้วจึงล้างด้วยกรดเพื่อปรับสภาพชิ้นงานให้เป็นกลาง น้ำทิ้งส่วนนี้จะมีสภาพเป็นกรด แล้วจึงเริ่มทำการชุบ ในกระบวนการชุบบางกรณีอาจจะต้องรองพื้นชิ้นงานด้วยการชุบทองแดงและนิเกิลก่อน เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งมาก ดังนั้นจึงเปราะมาก และเนื่องจากแรงเค้นแรงเครียดรวมทั้งการหนีออกไปของก๊าซไฮโดรเจน ที่ผสมอยู่ในโลหะโครเมียมในขณะที่ไปเกาะชิ้นงาน ทำให้ผิวโลหะโครเมียมที่ได้จากการชุบมีลักษณะแตกร้าว หรือเป็นรูพรุน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของโครเมียม จากการค้นคว้าปรากฏว่า ถ้าความหนาของโครเมียมเป็น 0.02 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่าจะได้ผิวโครเมียมที่ไม่มีรอยแตกร้าว แต่จะมีรูพรุนอยู่โดยทั่วไป

หากความหนาของโครเมียมมากกว่า 0.02 มิลลิเมตรขึ้นไป จะไม่ปรากฏรูพรุนแต่จะมีรอยร้าวอยู่โดยทั่วไป ด้วยเหตุที่มีรูพรุนในเวลาชุบบางนี้เอง จึงเป็นเหตุให้โครเมียมป้องกันสนิมไม่ได้เต็มที่ ถ้าเราชุบโครเมียมบางๆ โดยตรงบนเหล็กสนิมจะเกิดในรูพรุนก่อนแล้วต่อมามันก็จะเริ่มแพร่ขยายกว้างออกไปได้ผิวโครเมียม และในที่สุดสนิมก็จะยกแผ่นโครเมียมออกทั้งแผ่น ทำให้โครเมียมป้องกันสนิมไม่ได้ เพื่อแก้จุดอ่อนในเรื่องนี้ ในการชุบโครเมียมบางๆ จึงมักจะรองพื้นด้วยทองแดงและนิกเกิลเสียก่อน ซึ่งการทำโดยวิธีนี้มีส่วนดีกว่าการชุบโครเมียมบนเหล็กโดยตรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการและคุณภาพของชิ้นงาน เมื่อชุบชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ขณะที่ยกชิ้นงานขึ้นจากอ่างชุบจะมีน้ำยาชุบซึ่งเป็นกรดโครมิกเข้มข้นติดอยู่ และหยดลงพื้นซึ่งอาจแก้ไขโดยแขวนชิ้นงานเหนือถังรองรับน้ำยา (Dragout) เพื่อเก็บน้ำยาที่หยดลงมาเทกลับอ่างชุบใหม่ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีการล้างด้วยน้ำสะอาด (Rinse1 และ Rinse2) ทำให้มีการปนเปื้อนสารเคมีรวมทั้งโลหะที่ใช้ในกระบวนการชุบ(พุทธิสาร ชัยพันธุ์,2538)

น้ำทิ้งจากการชุบโครเมียมเกิดจากน้ำที่ใช้ล้างผิวโลหะ น้ำยาที่หกหรือล้นออกนอกอ่างชุบขณะทำการชุบหรือเติมน้ำยา น้ำทิ้งจากการทำความสะอาดโรงงานและอ่างชุบ และน้ำที่ใช้พ่นดักไอสารเคมีเหนืออ่างชุบ (Morisset,1954 อ้างถึงใน พุทธิสาร ชัยพันธุ์,2538)

โรงงานชุบโลหะที่มีปัญหาส่วนมากเป็นโรงงานขนาดเล็ก ที่อยู่ตามห้องแถวไม่มีความรู้เกี่ยวกับระบบของการบำบัดน้ำเสีย และไม่มีเงินทุนเพียงพอสำหรับการที่จะจัดทำระบบบำบัดน้ำเสีย จึงมักปล่อยน้ำทิ้งตามท่อระบายน้ำ โรงงานที่ก่อให้เกิดปัญหาอีกพวกได้แก่ โรงงานที่อยู่ตามนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งเจ้าของโรงงานขนาดเล็กมักคิดว่าเมื่ออยู่ในนิคมอุตสาหกรรมแล้วไม่จำเป็นต้องจัดทำระบบบำบัด เพราะนิคมได้จัดทำระบบบำบัดรวมแล้ว แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปนิคมอุตสาหกรรมบางแห่งไม่ได้จัดทำระบบบำบัดรวม และเจ้าของโรงงานบางแห่งก็รู้เท่าไม่ถึงการณ์ ได้ปล่อยน้ำทิ้งสู่ท่อระบายน้ำ โดยโรงงานเหล่านี้จะรับจ้างชุบโครเมียม นิกเกิล และทองแดง การชุบใช้วิธีการชุบแบบไม่ใช้น้ำยาไซยาไนด์ สิ้นค้าที่พบส่วนใหญ่เป็นกันชนรถยนต์ ขาดังเตา ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ และชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์ทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ไม่ว่าจะ เป็นแก้อื้อ หรือแม่กระทั่งบานพับประตู



### วิธีการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม

ในปัจจุบันวิธีการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมที่ทำกันอย่างแพร่หลายมี 2 วิธีคือ วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของกรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม และวิธีการกำจัดน้ำทิ้งของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ (MIDI) ดังนี้

#### 1. วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของกรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม(วิธีการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ,ม.ป.ป.)

เป็นวิธีที่เรียกว่า Batch Process คือการขจัดเป็นครั้งๆไม่ต่อเนื่อง เหมาะสำหรับโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก และขนาดกลาง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1.1 ปรับค่า pH = 2.5 ด้วยกรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ )
- 1.2 เติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) แล้วกวน 30 นาที
- 1.3 ปรับค่า pH = 8.5 ด้วยปูนขาว
- 1.4 กวน 30 นาที ในระหว่างนี้ถ้ามีนิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) หรือสังกะสี (Zn) ละลายอยู่ก็จะถูกทำปฏิกิริยาให้สามารถตกตะกอนได้
- 1.5 ปล่อยให้ตกตะกอน 4 ชั่วโมง
- 1.6 ปล่อยน้ำใส (Effluent) ข้างบนทิ้ง
- 1.7 ปล่อยตะกอน (Sludge) ลงสู่ถังกรองตะกอน (Sand Drying Bed) ส่วนที่เป็นตะกอนจะถูกกรองติดอยู่บนผิวทราย และจะแห้งไปในที่สุด และส่วนที่เป็นน้ำจะไหลผ่านชั้นทราย หิน-อิฐ และไหลไปสู่ถังเก็บน้ำเสีย (Raw Waste Tank)

หมายเหตุ ปริมาณสารเคมีที่จะเติม ต้องเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานมาวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมี

#### 2. วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ (MIDI)(สมเกียรติ สิทธิพิภพผล,ม.ป.ป.)

เนื่องจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าของ MIDI เป็นแบบผสม มีการชุบหลายชนิดเช่น การชุบทองแดง-นิเกิล-โครเมียม การชุบสังกะสี การชุบฮาร์ดโครม การอะโนไดซ์ และการกัดล้างโลหะ เป็นต้น น้ำเสียที่มาจากกระบวนการชุบจึงมีหลายประเภทด้วยกัน แยกได้ดังนี้

- 2.1 น้ำเสียที่มีไซยาไนด์
- 2.2 น้ำเสียที่มีกรดโครมิก

### 2.3 น้ำเสียที่มีกรดและต่างชนิดต่างๆ

ระบบกำจัดน้ำเสียของ MIDI จึงมีขนาดใหญ่เพราะเป็นแบบผสมที่ใช้สารเคมีเป็นตัวทำปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพของการทำงานโดยกำจัดน้ำเสียที่มีไฮยาไนต์ และกรดโครมิกได้ในอัตราส่วน 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง กำจัดน้ำเสียที่มีกรดและต่างชนิดต่างๆได้ในอัตราส่วน 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ปกติโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามักเป็นกรดโครมิก ( $\text{CrO}_3$ ) จากน้ำยาชุบโครเมียม หรือโซเดียมไดโครเมต ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) จากการทำโครเมตในการชุบสังกะสี ซึ่งเป็นโครเมียมที่มีวาเลนซ์ 6 หรือเขียนได้เป็น  $\text{Cr}^{6+}$  ในการกำจัดโครเมียมก็ต้องเปลี่ยนให้เป็นโครเมียมที่มีวาเลนซ์ 3 ( $\text{Cr}^{3+}$ ) ซึ่งจะสามารถตกตะกอนได้

สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมคือ โซเดียมไบซัลไฟท์ ( $\text{NaHSO}_3$ )

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ค่า pH ประมาณ 2

ถ้าต้องการกำจัดโครเมียม 1 กรัม ต้องใช้โซเดียมไบซัลไฟท์ ( $\text{NaHSO}_3$ )

ประมาณ 3 กรัม ดังสมการ



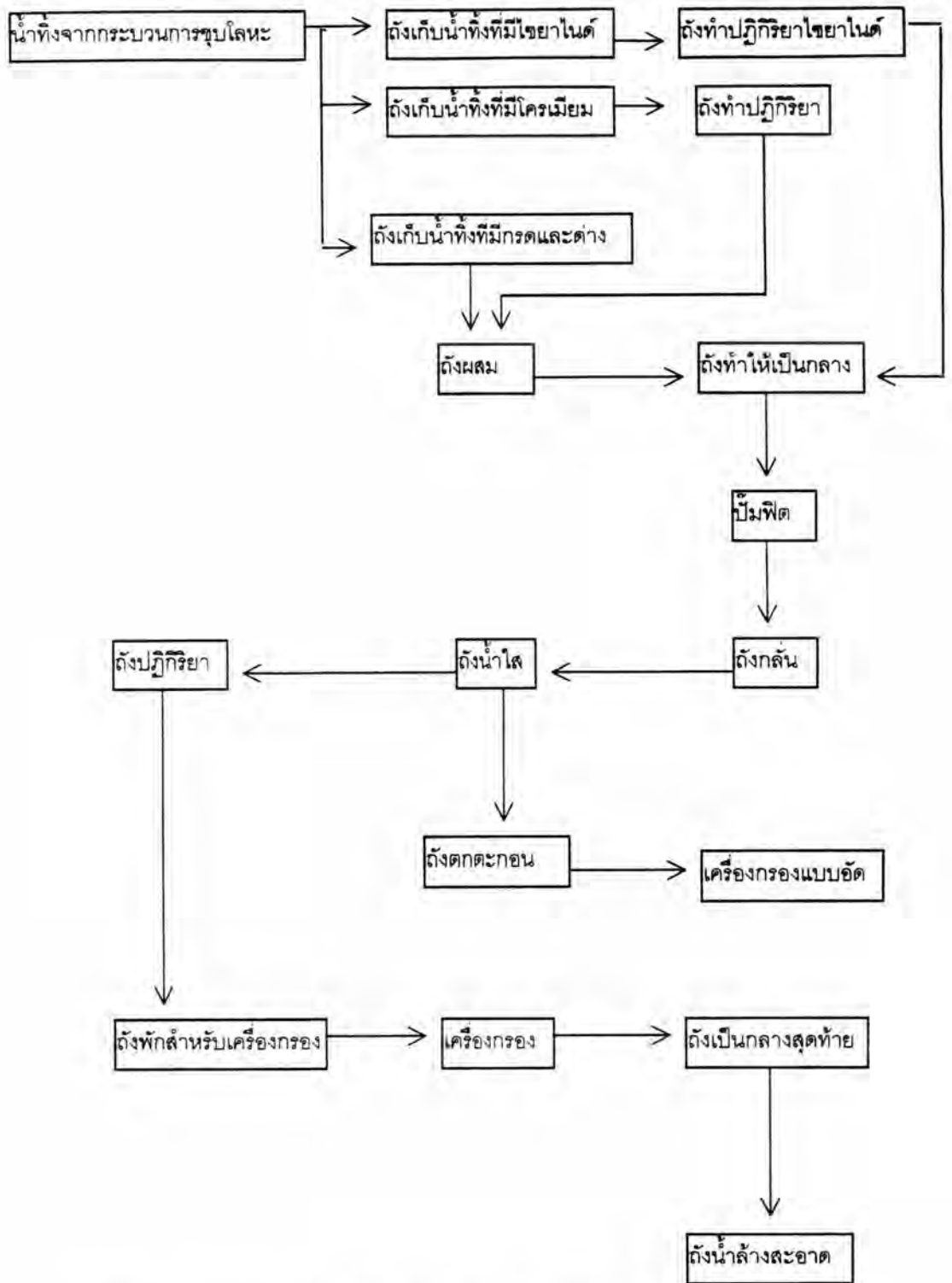
ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ค่า pH 8-9

ถ้าต้องการกำจัดโครเมียม 1 กรัม ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ประมาณ

2.57 กรัม การกำจัดโครเมียมในทางปฏิบัติได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การกำจัดโครเมียมในทางปฏิบัติ(โรงงานอุตสาหกรรม,ม.ป.ป.)

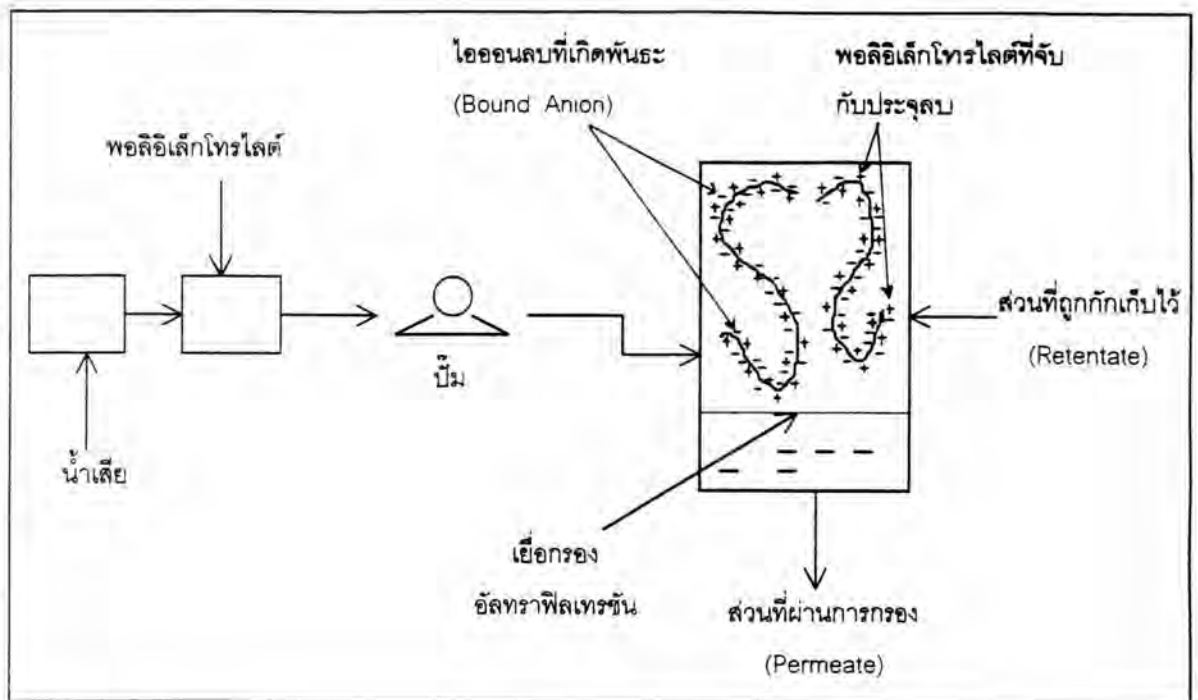
กระบวนการและเหตุผล	สารเคมีที่ใช้	ค่า pH	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)
1.น้ำเสียที่มี $Cr^{6+}$ ไหลลงสู่ถัง				
2.เติมกรดกำมะถันให้มีค่า pH ลดลงเหลือ 2	กรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ )	2		
3.เติม $NaHSO_4$ ลงไปจะเกิดปฏิกิริยา $2H_2CrO_4 + 3NaHSO_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow$ $Cr_2(SO_4)_3 + 3NaHSO_4 + 5H_2O$	โซเดียมไบซัลไฟท์ ( $NaHSO_3$ )	2	180	30
4.เติมโซดาไฟให้ค่า pH เป็น 8-9	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ )	8-9		
5.เติมโซดาไฟลงไปอีกจะเกิดปฏิกิริยา $Cr_2(SO_4)_3 + 6NaOH \rightarrow$ $2Cr(OH)_3 + 3Na_2SO_4$ ทำให้ $Cr(OH)_3$ ตกตะกอน	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ )	9		30
6.ระบายน้ำทิ้งไปได้แล้วกรองตะกอนน้ำตะกอนไปทิ้ง				



รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังระบบกำจัดน้ำเสียของ MIDI (สงเสริมอุตสาหกรรม,ม.ป.ป.)

## 2.2 พอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชัน (Polyelectrolyte-enhanced ultrafiltration)

พอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชันเป็นเทคนิคใหม่ที่จะกำจัดโลหะต่างๆที่ไม่ต้องการออกจากน้ำเสียได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่มากมาย ซึ่งก่อนหน้านี้ในการกำจัดโครเมตแต่ละครั้งจำเป็นที่จะต้องใส่สารเคมีในปริมาณที่สูงมากเพราะโครเมียม(VI)ไม่สามารถตกตะกอนด้วยปูนขาวได้ ต้องเติมเหล็กซัลเฟตหรืออะซิดิกซัลไฟต์(acidic sulfite)ก่อน จึงจะสามารถตกตะกอนทางเคมีด้วยปูนขาวได้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดของเสียจากสารเคมีมากขึ้น ดังนั้นวิธีการพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชันจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมากำจัดโลหะหนักต่างๆออกจากของเสีย และยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาของเสียจากสารเคมีอีกด้วย เพราะหลังจากที่นำพอลิอิเล็กโทรไลต์ไปบำบัดโลหะหนักแล้วยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วย วิธีพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชันสามารถบำบัดโลหะหนักได้โดยการเติมพอลิอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในน้ำทิ้งหรือสารละลายต่างๆที่เราต้องการจะบำบัด เพื่อที่จะให้พอลิอิเล็กโทรไลต์ไปสร้างพันธะกับไอออนที่ต้องการกำจัด ดังนั้นในการเลือกใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์จึงต้องเลือกชนิดที่มีประจุตรงกันข้ามกับไอออนลบที่ต้องการกำจัด เมื่อพอลิอิเล็กโทรไลต์สร้างพันธะจนมีขนาดใหญ่ขึ้น สารละลายนี้ก็จะถูกนำไปบำบัดด้วยการกรองแบบอัลตราฟิลเทรชัน โดยการใช้เมมเบรนกรองที่มีขนาดความพรุนน้อยมากพอที่จะกรองพอลิอิเล็กโทรไลต์ออกจากสารละลายได้ ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชันก็จะเป็นน้ำเสียที่ปราศจากโลหะหนัก(Tabatabai, Scamehorn และ Christian, 1995) ดังรูปที่ 2.3



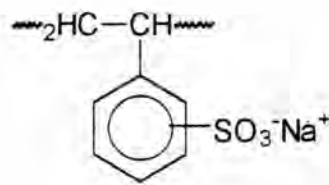
รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชัน (Tabatabai และคณะ, 1995)

### พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

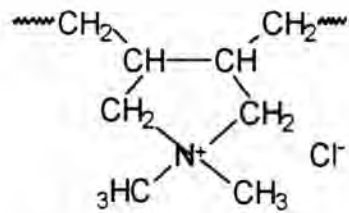
คำจำกัดความและลักษณะโดยทั่วไปของพอลิอิเล็กโทรไลต์

พอลิอิเล็กโทรไลต์ หมายถึง ระบบของสารประกอบพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนของสายโซ่โมเลกุลใหญ่ที่มีประจุบวก หรือประจุลบ เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเรียกว่า "แมโครไอออน" และโมเลกุลขนาดเล็กที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุในแมโครไอออน เพื่อทำให้เกิดสมดุลทางไฟฟ้าเคมี ดังรูปที่ 2.4





(a) sodium polystyrene sulfonate



(b) poly(diallyldimethylammonium chloride)

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกและลบ

โดยปกติแล้วพอลิอิเล็กโทรไลต์จะละลายน้ำได้ทุก pH เช่น โซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนต และ พอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ จะแตกตัวออกเป็นส่วนของแมคโครไอออน และส่วนของคาน์เตอร์ไอออน (ประจุตรงข้าม) ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ในช่วง pH ตั้งแต่ 0-14 แต่ก็มีพอลิอิเล็กโทรไลต์บางตัว เช่น พอลิ(อะคริลิก แอซิด) และ พอลิ(เอทรีน อิมีน) ที่จัดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์เช่นกันแต่มีความสามารถในการแตกตัวอยู่ในช่วง pH ที่จำกัด ในทางทฤษฎี พอลิอิเล็กโทรไลต์สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยการยึดกลุ่มของสารประกอบไอออนิกในปริมาณที่พอเหมาะ กับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ ในกรณีของ crosslinked polymer ความสามารถในการบวม (swellability) ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (aqueous medium) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนรูปเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยในทุกวันนี้มีพอลิอิเล็กโทรไลต์ทั้งโครงสร้างที่เป็นกิ่งและเป็นแบบเส้นตรงจำนวนมากที่รู้จักกันดี ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของพอลิอิเล็กโทรไลต์อย่างเห็นได้ชัด ทั้งการแบ่งแยกตามชนิด และโครงสร้างแบบไอออน

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของพอลิอิเล็กโทรไลต์โดยแบ่งแยกตามชนิด

---

Anionic and cationic polysaccharides and polysaccharidic derivatives
Nucleic acids
Gelatin
Lignosulfonic acids
Polyacrylic and polymethacrylic acid and its copolymers
Maleic acid anhydride copolymers
Polystyrene sulfonic acid
Polystyrene imine
Polyamines and polyamidamines
Ionenenes
Poly(diallyldimethylammonium chloride)
Homo-and copolymers of cationic acrylic acid esters)

---

ตารางที่ 2.4 กลุ่มของสารประกอบไอออนิกในพอลิอิเล็กโทรไลต์

---

$-\text{COO}^-$	$-\text{NH}_3^+$
$-\text{CSS}^-$	$=\text{NH}^{+2}$
$-\text{O}-\text{SO}_3^-$	$\equiv\text{NH}^+$
$-\text{SO}_3^-$	$-\text{NR}_3^+$
$-\text{OPO}_3^{2-}$	

---

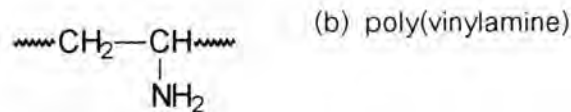
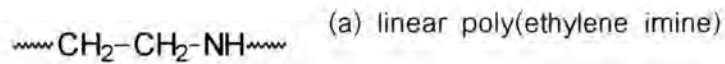
โดยส่วนใหญ่ของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีอยู่ทั่วไปตามท้องตลาดผลิตได้จากกระบวนการ polymerization polycondensation และ polyaddition แต่ก็มีพอลิอิเล็กโทรไลต์อีกไม่น้อยที่ได้จากธรรมชาติ เช่น วุ้นเจลาตินก็เป็นตัวอย่างของพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดที่เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย หรือ เพคตินก็เป็นกลุ่มสารประกอบแอนไอออนของพอลิแซคคาไรด์ ถึงแม้ว่าโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะมีมากมาย แต่คุณลักษณะของ

พอลิอิเล็กโทรไลต์กลับขึ้นอยู่กับชนิด และความแตกต่างของแอนไอออน และแคทไอออนที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก

โดยปกติแล้ว สารประกอบไอออนิกจะถูกจัดเป็นพวกแอนไอออน และแคทไอออน หากจะแบ่งย่อยลงไปถึงกรดอ่อน กรดแก่ และกลุ่มของด่าง ก็พอที่จะใช้ในเชิงเปรียบเทียบกรดอ่อน กรดแก่ และด่างอ่อน ด่างแก่ ของโมเลกุลทางเคมีที่เล็กๆ ดังเช่น ซัลไฟเนต ซัลเฟตกึ่งเอสเทอร์ และกลุ่มเตตระอัลคิลแอมโมเนียม ก็จัดเป็นพวกพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีความแรงของประจุสูง

นอกเหนือจากความแรงของกรดและเบสในส่วนของสารประกอบไอออนิกแล้ว ระยะห่างระหว่างประจุบวกและประจุลบที่อยู่ใกล้ชิดกันตลอดความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่ง ที่บ่งถึงคุณลักษณะของพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะที่ไม่ละลายน้ำ ความหนาแน่นของประจุนี้จะถูกกำหนดโดย ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างประจุไอออนิก โดยได้มาจากรูปทรงของพันธะเคมี หรือจำนวนเฉลี่ยของสารประกอบไอออนิกต่อหนึ่งหน่วยโมโนเมอร์ ในกรณีที่พอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นโคพอลิเมอร์ โดยคำนียามส่วนหลังได้มาจากการเปรียบเทียบข้อมูลในกลุ่มของโคพอลิเมอร์และกลุ่มของสารประกอบไอออนิกเท่านั้น นอกจากความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของประจุ โดยปกติแล้วการกระจายตัวของกลุ่มของสารประกอบไอออนิก(ionic site) ตลอดความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์จะมีอิทธิพลสูงต่อคุณสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ เช่นในเรื่องของการละลายซึ่งอาจถือเป็นกฎได้ว่า พอลิอิเล็กโทรไลต์จะสามารถแสดงคุณสมบัติพื้นฐานออกมาได้ถ้ามี 10 โมโนเมอร์ของโคพอลิเมอร์ที่มีสารประกอบไอออนิกอยู่

นอกจากความแรงของกรดหรือด่าง และความหนาแน่นประจุ สิ่งที่สำคัญต่อคุณสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์อีกประการหนึ่งก็คือ ตำแหน่งของประจุที่อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุลในแมคโครไอออนดังรูปที่ 2.5



### รูปที่ 2.5 พอลิเอทิลีนไอมีนและพอลิไวนิลเอมีน

ซึ่งทำให้เราสามารถแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างพอลิเอทิลีนไอมีน(integral) และพอลิเอทิลีนไอมีนแบบกิ่งก้านสาขาด้วยตำแหน่งของกลุ่มสารประกอบไอออนิก โดยที่กลุ่มของสารประกอบไอออนิกจะเป็นส่วนหนึ่งส่วนเดียวกับสายโซ่พอลิเมอร์หลัก ด้วยการต่อเป็นเส้นตรงในกรณีที่เป็นพอลิเอทิลีนไอมีน และกลุ่มของสารประกอบไอออนิกจะต่อที่ด้านข้างกับสายโซ่ของพอลิเมอร์หลัก ด้วยระยะห่างที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตำแหน่งของส่วนที่มีประจุจะสัมพันธ์กับการเกิดสารประกอบที่ซับซ้อนของพอลิแอนไอออนและพอลิแคทไอออน

นอกจากตัวแปรหลัก 3 ตัวที่แสดงลักษณะของแมคโครไอออน ชนิดของโมเลกุลเล็กๆที่มีประจุตรงกันข้ามจะมีอิทธิพลสูงต่อคุณสมบัติโดยรวมของระบบสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของ การละลาย และการสร้างโครงสร้างของพอลิเอทิลีนไอมีน เช่น ในกรณีที่โมเลกุลประจุบวกของพอลิไดอัลลิควิดเมทิลวอแอมโมเนียมคลอไรด์ มีคลอไรด์ไอออนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้พอลิเอทิลีนไอมีนนี้สามารถละลายได้ดีในน้ำ แต่ในกรณีเดียวกันถ้าเปลี่ยนคลอไรด์ไอออนเป็นไฮโดรเจนไอออน พอลิเอทิลีนไอมีนนี้แทบจะไม่ละลายในน้ำเลย หรือในกรณีของเกลือโปแตสเซียมของเซลลูโลสซัลเฟตที่มีขนาดของโมเลกุลขนาดใหญ่และสามารถละลายน้ำได้บ้าง เมื่อละลายจะมีสภาพเป็นวุ้น(เจล)(Dautzenberg และคณะ,1994)

## ประโยชน์ของพอลิอิเล็กโทรไลต์

ความน่าสนใจของพอลิอิเล็กโทรไลต์ก็คือ การนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากพอลิอิเล็กโทรไลต์ฟอร์มคอมเพล็กซ์ได้กับแมคโครไอออนที่มีประจุตรงข้าม กับสารเซอร์แฟคแตนท์ หรือกับสารคอลลอยด์ พอลิอิเล็กโทรไลต์ยังสามารถเกิด flocculation และเกิดการตกตะกอนกับสาร colloidal species ที่เป็นไอออน ตัวอย่างแอนไอออนบางชนิดในน้ำเสียที่ไม่อาจปล่อยลงสู่ที่ระบายน้ำเพราะจะก่อมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม อาจกำจัดออกได้โดยใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดบวกที่ละลายน้ำจับเอาแอนไอออนชนิดนี้ก่อน กระบวนการฟอร์มคอมเพล็กซ์ระหว่างพอลิอิเล็กโทรไลต์และไอออนของโลหะเพื่อกำจัดไอออนของโลหะจากน้ำทิ้ง เป็นเหตุผลที่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เพื่อนิเวศน์ที่ดี ตัวอย่างการใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำดังแสดงในตารางที่ 2.5 แสดงการใช้ Poly-DADMAC เพื่อแก้ความขุ่นของน้ำ และตารางที่ 2.6 แสดงการใช้ linear and branched poly-DADMAC ในการบำบัดน้ำ หลังจากเติมสารตกตะกอนและปล่อยให้ตกลงกันเป็นเวลานาน 30 นาที ( $W_{30}$ ) พบว่าพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดมีกิ่งก้านมีความสามารถดึงเอาของแข็งที่แขวนลอยลงสู่ก้นได้ดีกว่าชนิดที่เป็นสายตรง แต่ทว่า ความเร็วเฉลี่ยของสิ่งแขวนลอยตกลงกัน( $V_s$ )ไม่แตกต่างกัน(Dautzenberg และคณะ,1994)

ตารางที่ 2.5 การใช้ poly-DADMAC ในการบำบัดน้ำด้วย 150 ppm  $Ca(OH)_2$

(Polyelectrolytes,1994)

Poly-DADMAC(ppm)	Turbidity(%)
0.0	100
0.5	55
1.0	36
2.0	18

ตารางที่ 2.6 การใช้ Poly-DADMAC เป็น flocculant เพื่อบำบัดน้ำในกระบวนการทำแร่  
(Poly-electrolytes,1994)

Flocculant	$W_{30}$ (ppm)	$V_s$ (mm/min)
Linear poly-DADMAC	360	2.1
Branched poly-DADMAC	185	2.2

### อัลตราฟิลเทรชัน (Ultrafiltration)

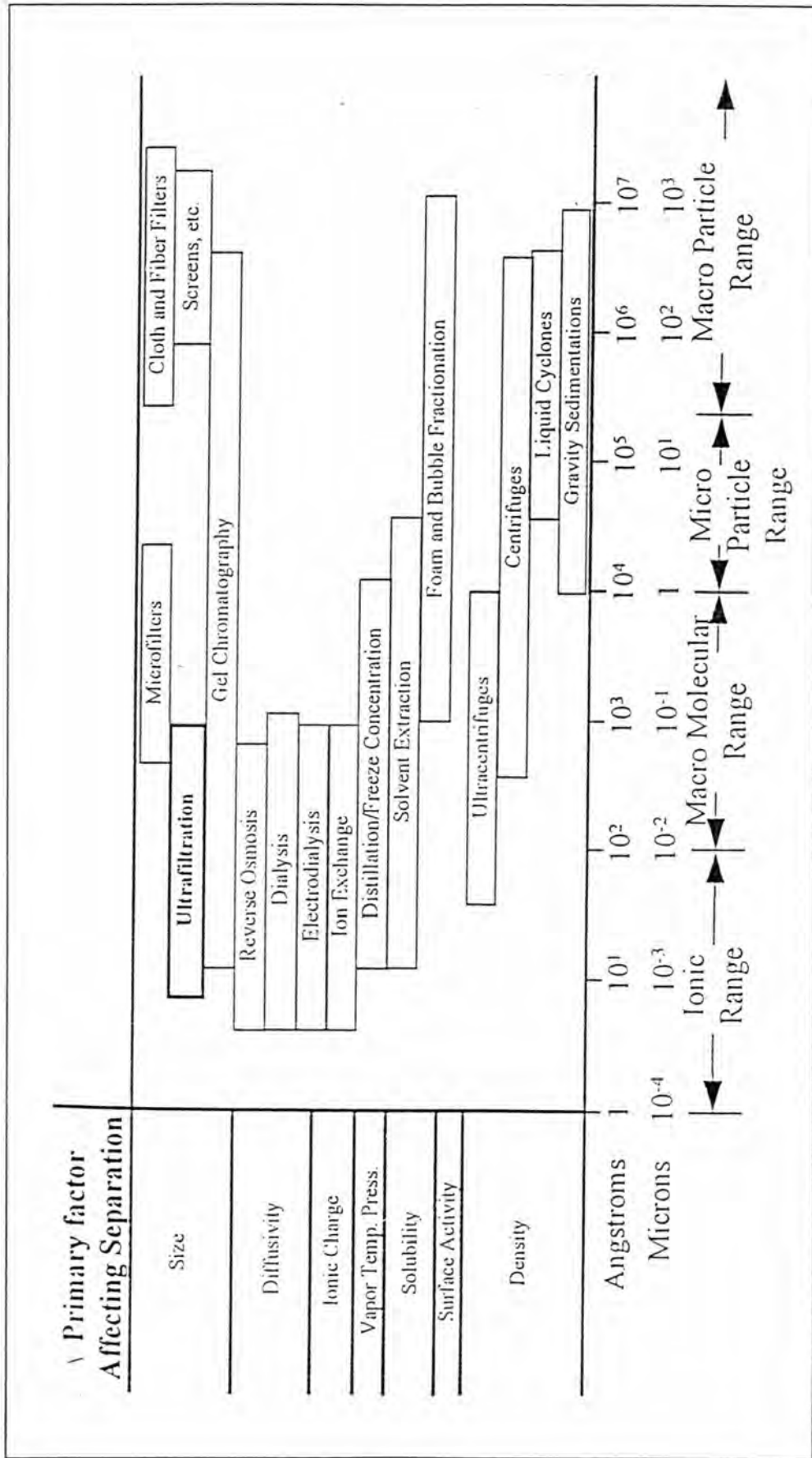
เทคนิคการกรองแบบอัลตราฟิลเทรชันได้มีการนำมาใช้เป็นเวลากว่า 30 ปีมาแล้ว แต่มีการใช้ในวงแคบเท่านั้น เช่น ใช้ในกระบวนการอาหาร ยา และอุตสาหกรรมทางด้านเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.7 เป็นการนำอัลตราฟิลเทรชันไปใช้ในวงการอุตสาหกรรม เทคนิคการกรองแบบอัลตราฟิลเทรชันเป็นกระบวนการกรองที่ต้องมีการใช้ความดันเข้ามาช่วยในการแยก โดยจะมีเมมเบรนกรองสำหรับการแยก ซึ่งเมมเบรนจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อสารละลายมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 500-300,000 การแยกแบบรีเวิร์สออสโมซิส (reverse osmosis, RO) และไมโครฟิลเทรชัน (microfiltration, MF) เป็นการแยกโดยใช้เมมเบรนเช่นกัน แต่คุณสมบัติของอัลตราฟิลเทรชันจะต่างจากรีเวิร์สออสโมซิสและไมโครฟิลเทรชัน ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละประเภท กล่าวคือ ในกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสมักจะอาศัยแรงดันออสโมซิสในการกรองจากสารละลาย ในขณะที่การกรองแบบไมโครฟิลเทรชันมักจะขึ้นกับขนาดของรูพรุน ความแตกต่างระหว่างการกรองสามประเภทนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 2.7 และ 2.8

อัลตราฟิลเทรชันนี้มักจะนำมาประยุกต์ใช้กับการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น หรือใช้กับการแยกส่วนของสารละลาย เช่น ในสารละลายที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ละลายอยู่ คอลลอยด์ สารละลายเกลือ และสารละลายน้ำตาลเป็นต้น นอกจากนี้อัลตราฟิลเทรชันยังได้รับความเชื่อถือเป็นอันดีในวงการอุตสาหกรรม และถ้ามองถึงคุณค่าและประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็เป็นที่น่าพอใจ รวมทั้งผลทางด้านการวิเคราะห์ก็เป็นที่น่าเชื่อถือได้ ซึ่งข้อดีต่างๆ สามารถแจกแจงได้ดังนี้



ตารางที่ 2.7 แสดงการนำอัตรภาพิลเทรชันไปใช้ในวงการอุตสาหกรรม

Wine	Feed Stream
Purpose	
	Food
Blood	Fractionation, concentration
Egg	Concentration
Fruit juices	Clarification
Gelatin	Concentration, fractionation
Soy whey	Fractionation, concentration
Starch	Concentration, desalting
Vinegar	Clarification
Wastes	Concentration for anaerobic digestion
Wine	Clarification, stabilization, protein removal
	Pharmaceutical
Fermentation broths, Especially enzymes	Fractionation, concentration, desalting
	Dairy
Milk	Fractionation, preparation of cheese Precursors, concentration
Whey	Fractionation
	Industrial
Electrophoretic paint	Bath control, production of rinse water
Flexographic ink wastewater	Concentration, pollution abatement
Kraft mill effluent	Decolorization
Latex (PVC, SBR, etc.)	Concentration
Leather tanning	Bath recycle, product recovery
Lignosulfonate	Fractionation, concentration
Oil-water emulsions	Concentration, pollution abatement
Paper machine whitewater	Recycle
Textile size (polyvinyl alcohol)	Concentration for recycle
Water	Colloid removal
Wool scouring	Lanolin recovery



รูปที่ 2.6 แสดงภาพรวมของเทคนิคการแยกแบบต่างๆ พิสัยของการแยก และปัจจัยเริ่มต้นที่มีผลต่อการ

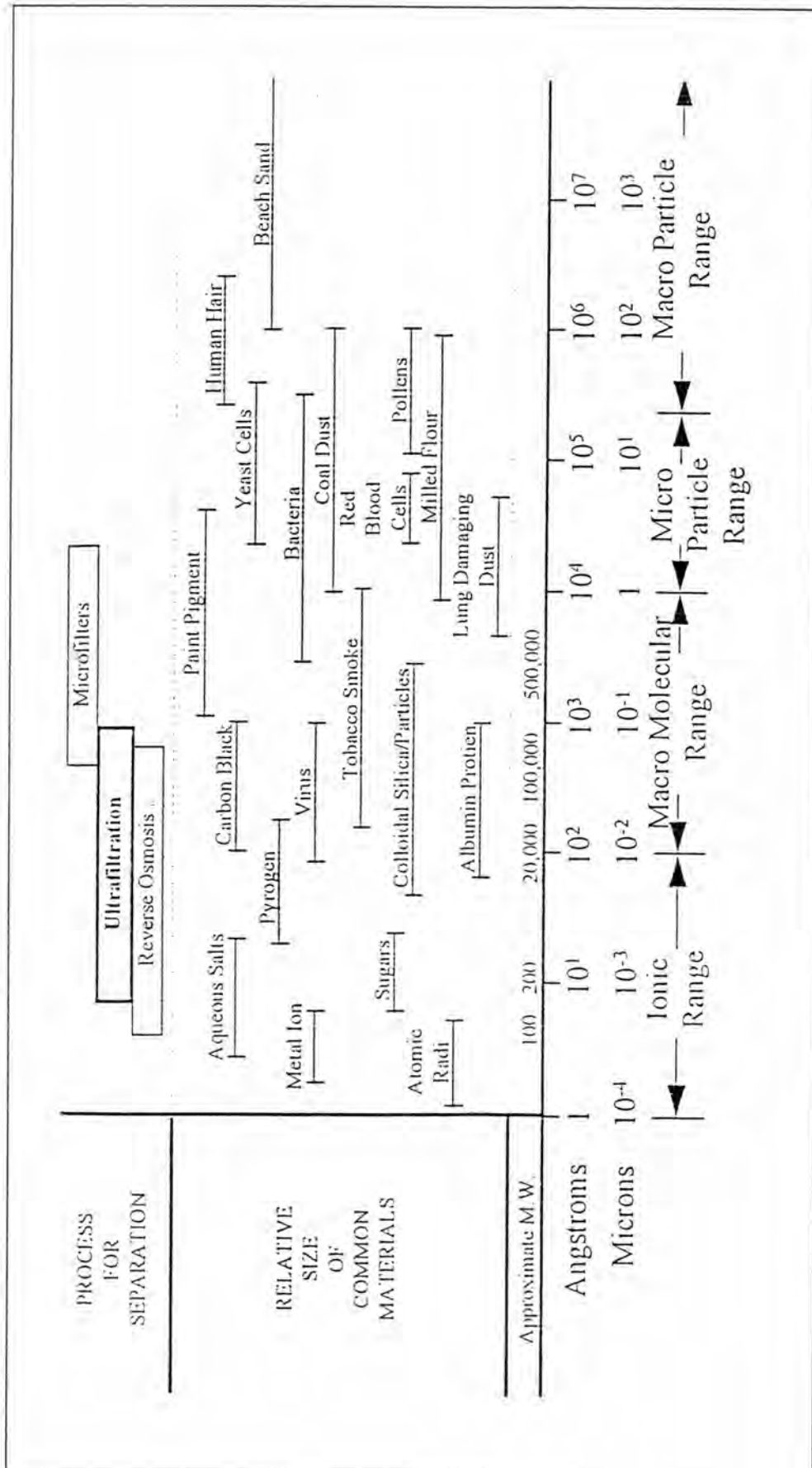
เลือกใช้การแยก(Sriratana,1995)

**PROCESS    DRIVING FORCE    PERMEATE    RETENTATE\***

OSMOSIS	CHEMICAL POTENTIAL	WATER	SOLUTES
DIALYSIS	CONCENTRATION DIFFERENCE	WATER + SMALL MOLECULES	LARGE MOLECULES
ULTRAFILTRATION	PRESSURE	WATER + SMALL MOLECULES	LARGE MOLECULES
REVERSE OSMOSIS	PRESSURE	WATER	SOLUTES
ELECTRODIALYSIS	E.M.F.	WATER + IONIC SOLUTES	NONIONIC SOLUTES
MICROFILTRATION	PRESSURE	WATER + DISSOLVED ORGANICS	LARGE SUSPENDED PARTICLES

\* Includes Water

รูปที่ 2.7<sup>1</sup> แสดงลักษณะเฉพาะของกระบวนการแยกแบบใช้เมมเบรน(Siratana, 1995)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโมเลกุลในการตัดสินใจเลือกใช้การกรองแบบต่างๆ (Sriratana, 1995)

1. เป็นการเพิ่มคุณค่าของผลผลิตเริ่มต้น รวมถึงการเพิ่มจำนวนของผลผลิต
2. มีผลพลอยได้จากการผลิตที่ดีๆ ซึ่งอาจจะนำกลับมาใช้ได้ใหม่ เช่น เมื่อผ่านอัลตราฟิลเทรชันแล้วจะได้น้ำที่สะอาด เป็นต้น
3. เป็นการลดต้นทุนของการจัดการน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการแล้ว
4. เป็นการประหยัดวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ
5. เป็นการเปลี่ยนแปลงกระบวนการให้ประหยัดขึ้น เช่น การตัดการทำงานบางส่วนที่ซับซ้อนออก และไม่จำเป็นที่จะต้องมีการคอยดูและระหว่างกระบวนการผลิต (William และ Jonathan, 1987)

### เมมเบรนกรองอัลตราฟิลเทรชัน (Ultrafiltration Membrane)

เมมเบรนในปัจจุบันจะเป็นเมมเบรนแบบไม่สมมาตร (asymmetric) ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนบนของผิวเมมเบรน กับส่วนล่างของเมมเบรน ซึ่งในกระบวนการแยกที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณส่วนบนผิวเมมเบรน ที่เป็นบริเวณของส่วนของของเหลวและมี พอลิเมอร์เคลือบเป็นฟิล์มบางๆ

ในการเลือกชนิดของเมมเบรนหรือการแยกชนิดจะแจกแจงได้โดยใช้โมเลกุลาร์เวท คัทออฟ (molecular weight cutoff) ซึ่งสะดวกต่อการเลือกใช้เมมเบรน เพราะถ้าจะแยกโดยการดูน้ำหนักโมเลกุลจะทำได้ยาก นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลและประจุของมันก็อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกคุณลักษณะเฉพาะด้วย ดังนั้นเมมเบรนส่วนมากก็จะไม่มีรูปแบบของความพรุนที่แน่นอน แต่จะแสดงในรูปแบบของขนาดการกระจายที่แน่นอนของขนาดความพรุน ในการเลือกขนาดของ molecular weight cutoff จะศึกษาจากการทดลองโดยดูค่าพิสัยของความสามารของเมมเบรนที่จะยอมให้ตัวถูกละลายในน้ำผ่านได้ ตั้งแต่ 0 ถึง 100% rejection ค่า rejection ของตัวถูกละลายอธิบายได้โดยสมการดังนี้

$$R_b = 1 - (C_p / C_b)$$

เมื่อ

$R_b$  คือ ค่า %rejection ของตัวถูกละลาย

$C_b$  คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายใน retentate

$C_p$  คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายใน permeate

ถ้าค่า %rejection สูงหมายความว่าเมมเบรนสามารถกักเก็บตัวถูกละลายได้ดี และในทางกลับกันตัวถูกละลายนั้นก็จะมีออกมาใน permeate ได้น้อย

เมมเบรนที่มีค่า molecular weight cutoff 10,000 หมายความว่า เมมเบรนนี้ มีความสามารถที่จะกักเก็บตัวทำละลายที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุล 10,000 หรือมากกว่า ได้มากถึง 90%ขึ้นไป ส่วนโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1,000 ถึง 10,000 อาจผ่านได้เพียง บางส่วนเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าการกระจายของขนาดความพรุนของเมมเบรนด้วย

เมมเบรนมีอายุการใช้งานนานหลายปี แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นกับลักษณะการใช้งาน และการทำความสะอาดเมมเบรนด้วย ซึ่งถ้านำเมมเบรนไปใช้ในทางที่ผิดก็จะทำให้ เมมเบรน เสียได้ เช่น นำไปแช่แข็ง ปล่อยให้เมมเบรนแห้ง ใช้กับสารละลายที่มีช่วงของ pH ที่เมมเบรน ทนไม่ได้ ซึ่งโดยปกติแล้วเมมเบรนจะทนได้ในช่วง pH 2-12 ใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป โดย เมมเบรนจะทนได้ในอุณหภูมิไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส เป็นต้น ส่วนในการทำความสะอาดก็จะ ขึ้นกับลักษณะการใช้งานของเมมเบรนแตกต่างกันไป(Cheryan,1986)

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sriratana (1995) ศึกษาการใช้พอลิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชัน แยก โครเมตออกจากน้ำเสีย ในการศึกษานี้ทำการกำจัดไอออนโครเมตจากน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่ง เหมือนน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยพอลิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ พอลิไดอัลลิไนด์เมทริว แอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งมีประจุตรงกันข้ามกับโครเมตที่จะกำจัด พอลิเล็กโทรไลต์และโครเมต จะสร้างพันธะกัน จากนั้นทำการกรองแบบอัลตราฟิลเทรชัน พบว่าพอลิเล็กโทรไลต์สามารถจับ โครเมตได้สูงถึง 99.6% และพบว่าเมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปจะปลดความสามารถในการจับ โครเมตลงอย่างมาก เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์ที่เติมเข้าไปจะไปทำให้ไอออนิกสเตรนธ์(ionic strength)ในสารละลายสูงขึ้นมาก โครเมียมจึงเกิดพันธะกับพอลิเล็กโทรไลต์ได้น้อยลง ดังนั้น โครเมตไอออนที่ไม่เกิดพันธะจึงผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชันออกมาได้

Tabatabai, Scamehorn, and Christian (1995) ศึกษาการลดความกระด้าง ของน้ำด้วยการใช้พอลิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชัน โดยจะให้พอลิเล็กโทรไลต์จับกับ แคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำ พอลิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ โซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนต(Sodium polystyrene sulfonate) พบว่าพอลิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเทรชันสามารถจับแคลเซียมและ



แมกนีเซียมไว้ได้สูงถึง 99.7% และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นความสามารถในการดักจับแคลเซียมและแมกนีเซียมก็มากขึ้นตามไปด้วย เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือลงไปในสารละลาย ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือต่ำจะส่งผลต่อความสามารถในการจับแคลเซียมและแมกนีเซียมไม่มากนักคือ เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปเพียง 20 มก./ลิตร ความสามารถในการจับแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าใกล้เคียงกับ 99% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงถึง 2000 มก./ลิตร ความสามารถในการจับแคลเซียมและแมกนีเซียมลดลงอย่างมาก โดยเหลือเพียง 66% เท่านั้น เนื่องจากการเติมเกลือลงไปในสารละลายจะเป็นการไปเพิ่มค่าไอออนิกสเตร็งค์ในสารละลาย ทำให้แคลเซียมและแมกนีเซียมจับกับโซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนตได้น้อยลง ดังนั้นแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ไม่เกิดพันธะก็จะสามารถผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันออกมาได้

Sasaki et al. (1989) ศึกษาการกำจัดไอออนของทองแดง ด้วยพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้โมเดลในการคาดการณ์ผลของการทดลอง โดยให้พอลิอิเล็กโทรไลต์จับกับไอออนของทองแดงซึ่งพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ พอลิสไตรีนซัลโฟเนต แยกศึกษาอัตราส่วนของพอลิอิเล็กโทรไลต์ต่อโครเมตเป็นอัตราส่วนต่างๆจาก 10:1 ถึง 3:1 และศึกษาผลกระทบเมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จาก 0-80 มิลลิโมลาร์พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นความสามารถในการจับทองแดงไอออนก็มากขึ้นตามไปด้วย และพบว่าการเพิ่มโซเดียมคลอไรด์จะไปลดศักยภาพของพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยโซเดียมไอออนที่มีอยู่ในโซเดียมคลอไรด์และในโซเดียมพอลิสไตรีนซัลโฟเนต จะเพิ่มไอออนิกสเตร็งค์ในสารละลายทำให้ทองแดงไอออนจับกับพอลิอิเล็กโทรไลต์ได้น้อยลง นอกจากนี้โซเดียมไอออนยังแย่งทองแดงไอออนในการจับกับพอลิอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย

Tucker et al., (1992) ศึกษาการแยกโครเมตในน้ำด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน และการตกตะกอนโดยพอลิอิเล็กโทรไลต์ใช้เป็นแบบแคทไอออน(พอลิไดอัลลิวัลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์) ประสิทธิภาพของการแยกมากกว่า 99% และพบว่าเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบการประสิทธิภาพของการแยกโครเมตจะลดลง แต่ประสิทธิภาพยังมากกว่า 95% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากการมีไอออนอื่นๆในสารละลายจะทำให้เกิดการรบกวนต่อระบบได้ 2 ทาง คือ ทำให้ค่าไอออนิกสเตร็งค์ของสารละลายเพิ่มขึ้น เช่น ตัวอย่างของการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบ ซึ่งจะลดความสามารถใน

การจับโครเมตของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ทำให้โครเมตที่ไม่เกิดพันธะสามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ และถ้าจะพูดถึงการนำไปบำบัดน้ำเสียก็จะมีไอออนต่างๆในน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นสูงๆ ก็จะมีผลต่อไอออนิกสเตร็งค์ด้วย นอกจากนี้ยังอาจจะทำให้เกิดพันธะกันระหว่างแคทไอออนในน้ำเสียน้ำกับโครเมตอีกด้วย เช่น การเกิด  $PbCrO_4$  และการรบกวนอีกทางหนึ่งก็คือ การที่แอนไอออนในน้ำเสียมีการแก่งแย่งกับโครเมตที่จะเกิดพันธะกับพอลิอิเล็กโทรไลต์ ทำให้โครเมตจับกับพอลิอิเล็กโทรไลต์ได้น้อยลง เช่น การมีซัลเฟตไอออนในน้ำเสียทำให้ซัลเฟตไอออนเกิดพันธะกับพอลิอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

Mundkur และ Watters (1993) ศึกษาการใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มอัลทราฟิลเทรชันในการแยกทองแดงออกจากน้ำเสีย พบว่าได้รับความสำเร็จอย่างมากในการลดปริมาณของทองแดงในน้ำเสียจาก 100 มก./ลิตร ให้เหลือน้อยกว่า 10 มก./ลิตร โดยการให้ทองแดงเกิดพันธะกับพอลิอิเล็กโทรไลต์แล้วกรองด้วยกระบวนการอัลทราฟิลเทรชัน นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราส่วนต่างๆของพอลิอิเล็กโทรไลต์ต่อทองแดงมีผลต่อความสามารถในการจับทองแดงอีกด้วย