

บทที่ 2

ทฤษฎีและการสืบค้นข้อมูล

2.1 น้ำมันปาล์มดิบ

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย สามารถนำมาใช้เพื่อการบริโภคและเพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้ ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันอุตสาหกรรมที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันอื่นๆ โดยทั่วไปกระบวนการอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนการปลูกต้นปาล์ม น้ำมันได้ผลผลิตหลักคือผลปาล์มสดและส่วนที่เหลือจากการผลิตหลักและของเสีย ได้แก่ ทางใบปาล์มและลำต้นปาล์ม ส่วนที่สองคือการสกัดน้ำมันปาล์มได้ผลผลิตหลักคือ น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil) และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil) และส่วนที่เหลือจากการผลิตหลักและของเสีย ได้แก่ ทะลาย เปล่า กะลาปาล์ม เส้นใยกากตะกอน และน้ำเสีย โดยการประมาณคร่าวๆ ของค่าปริมาณน้ำมันพบว่าผลปาล์ม 1 ผล จะมีน้ำมันปาล์ม 9 ส่วน และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 1 ส่วน สำหรับน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้จะถูกป้อนเข้าสู่โรงงานกลั่นหรือรีไฟน์เพื่อผลิตเป็นน้ำมันปาล์มเพื่อการบริโภค หรือสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซล หรือป้อนเข้าสู่อุตสาหกรรมแปรรูปเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น สบู่ น้ำยาซักล้าง เป็นต้น

น้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยกลีเซอไรด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไตรกลีเซอไรด์มากกว่า 90% กรดไขมันอิสระ 3-5% และองค์ประกอบอื่นๆ ที่เป็นกลุ่มวิตามินและนิวเทรียนต์อีกร้อยละ 1% โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแหล่งของวิตามินที่สำคัญสองชนิดคือ วิตามินอีและสารแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างวิตามินเอ ปริมาณของวิตามินอีและสารแคโรทีนอยด์ที่พบในน้ำมันปาล์มมีค่าสูงเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ สำหรับผลปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ได้สกัดน้ำมันจะไม่เสถียรอย่างมากและเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากเกิดไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ การยับยั้งการเกิดไฮโดรไลซิสทำได้หลายวิธีทั้งการใช้ความร้อนและความเย็น กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ดำเนินการโดยนำผลทั้งทะลายเข้าสู่หม้ออบความร้อนที่อุณหภูมิ 130°C ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเวลา 60 นาที แล้วจึงบีบน้ำมันออกมา คุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบสามารถวัดได้จากกรดไขมันอิสระ ความชื้น และสิ่งสกปรก น้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิห้องมีสภาพกึ่งของเหลวกึ่งของแข็งหรือไขโดยทั่วไปมีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 40°C และแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิ 25-50°C ขึ้นกับชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในน้ำมันดิบ ปริมาณและคุณลักษณะของแข็งหรือไขขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นของตัวทำละลายที่เติมลงไป การแยกส่วนไขและของเหลวออกจากกันอาจทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ หรืออาจใช้สองกระบวนการร่วมกัน โดยส่วนที่ได้จากการกรองที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีลักษณะของแข็งเรียกว่าสเตอริน และส่วนที่ผ่านการกรองที่เป็นของเหลวเรียกว่า

โอเลอิน น้ำมันปาล์มได้จากปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นพืชน้ำมันที่ให้ปริมาณน้ำมันสูงถึง 0.6 - 0.8 ตัน/ไร่/ปี น้ำมันปาล์มสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น อาหาร พลังงาน อาหารเสริม เป็นต้น น้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในการประกอบอาหารมีข้อเด่นคือ ทนความร้อนได้สูง ไม่มีกลิ่นหืน และทอดได้กรอบ เนื่องจากมีกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ทำให้น้ำมันปาล์มจึงได้รับความนิยมในการบริโภค

จากที่กล่าวข้างต้น น้ำมันที่สกัดจากผลปาล์มสดจะมีเบต้าแคโรทีน (beta-carotene) โปรวิตามินเอ (pro vitamin A) และวิตามินอี (vitamin E) ในปริมาณสูง ซึ่งวิตามินอีมีผลต่อความเสถียรของน้ำมันเช่นกัน ดังนั้นน้ำมันปาล์มจึงมีความเสถียรสูง นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวและกรดไขมันที่อิ่มตัว ส่วนใหญ่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยวโอเลอิก (mono-unsaturated oleic acid) ประมาณร้อยละ 40 ในขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวประกอบด้วยกรดปาล์มเมติก (palmitic acid) และกรดสเตียริก (stearic acid) ประมาณร้อยละ 44 และ 5 ตามลำดับ ด้วยสัดส่วนของส่วนผสมดังกล่าวทำให้น้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติพิเศษ สามารถใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหลายประเภท รวมทั้งการใช้ผลิตเป็นไขมันพืชที่มีสภาพเป็นของแข็ง (solid-fat) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation process) นอกจากนี้ ผลพลอยได้จากน้ำมันปาล์มได้แก่ การนำไปเป็นส่วนผสมของมาการีน หรือเป็นวัตถุดิบเพื่อสินค้าอุปโภคอื่นๆ เช่น สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ยา ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน เป็นต้น

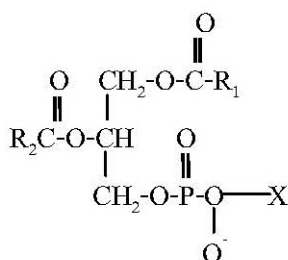
กรดไขมันในน้ำมันมีหลายชนิด ขึ้นกับจำนวนและโครงสร้างของโมเลกุลของธาตุองค์ประกอบทั้งสาม ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ดังนั้นคุณภาพและการใช้ประโยชน์ของน้ำมันพืชแต่ละชนิดจึงขึ้นกับสัดส่วนและชนิดของกรดไขมัน การเหม็นหืนของน้ำมันพืชดิบเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตน้ำมันพืชเพื่อการบริโภค การเหม็นหืนหรือเร็วขึ้นอยู่กับการเก็บรักษาโดยการเหม็นหืนของไขมันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี เช่น การเหม็นหืนเนื่องจากออกซิเจนในระหว่างการเก็บนั้น กรดไขมันไม่อิ่มตัวทำปฏิกิริยากับในอากาศ จะได้สารเปอร์ออกไซด์ที่มีกลิ่นหืน โดยกรดไขมันที่มีแขนคู่หลายอันมีแนวโน้มเหม็นหืนเร็วกว่ากรดไขมันที่มีแขนคู่เพียงอันเดียว ในช่วงแรกปฏิกิริยาการเหม็นหืนดำเนินอย่างช้าๆ แต่ในช่วงหลังจะเร็วขึ้น ซึ่งการเติมไฮโดรเจนจะช่วยให้ไขมันเหม็นหืนช้าลงบ้าง การเหม็นหืนของน้ำมันป้องกันได้โดยเก็บไขมันในภาชนะที่ทึบแสงอากาศเข้าไม่ได้และต้องเก็บไว้ในที่เย็น สำหรับการเหม็นหืนเองจากน้ำนั้นจะเกิดขึ้นน้อยกว่าการเติมออกซิเจน การเหม็นหืนวิธีนี้สามารถป้องกันโดยอย่าให้น้ำปนในไขมัน

การทำน้ำมันพืชให้บริสุทธิ์เพื่อการบริโภคนั้นประกอบด้วยหลายขั้นตอน มีจุดประสงค์เพื่อสกัดสารที่ไม่ต้องการออกหรือลดปริมาณให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยืดอายุการเก็บรักษา ปลอดภัย หรือให้มีคุณภาพเป็นไปตามผู้บริโภคต้องการ ตัวอย่างสารที่ต้องการกำจัดออกได้แก่ ฟอสโฟไลปิด กรดไขมันอิสระ สี เป็นต้น ฟอสโฟไล

ปิดเป็นสารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ อย่างไรก็ตามฟอสโฟไลปิดในน้ำมันพืชจะเป็นทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดี นั่นคือมีคุณสมบัติละลายได้ทั้งในน้ำและน้ำมัน จึงสามารถถนอมน้ำมันให้ไปอยู่ในชั้นสบู่ได้ ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียไขมัน นอกจากนี้ยังส่งผลต่อความเข้มข้นของสีน้ำมันในระหว่างขั้นตอนการกำจัดกลิ่นซึ่งใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดออก (กรณีกนก และคณะ, 2551; Kim และคณะ 2002)

2.2 ฟอสโฟไลปิด

ฟอสโฟไลปิดเป็นไขมันประกอบด้วยหมู่ฟอสเฟตเอสเทอร์ โดยฟอสโฟไลปิด 1 โมเลกุลได้จากการรวมตัวของกลีเซอรอล 1 โมเลกุล กรดไขมัน 2 โมเลกุล และหมู่ฟอสเฟตอีก 1 หมู่ โดยกลีเซอรอลเป็นโครงสร้างหลักต่อกับกรดไขมันด้วยพันธะเอสเทอร์ที่คาร์บอนตำแหน่ง 1 และ 2 ส่วนตำแหน่งที่ 3 เป็นพันธะฟอสโฟเอสเทอร์เพื่อจับกับกรดฟอสฟาติก ดังนั้นในโมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ จึงเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีและเป็นสารเชื่อมผิวที่ดี สูตรโครงสร้างของฟอสโฟไลปิดแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของฟอสโฟไลปิด โดย X คือส่วนที่มีขั้ว (แอลกอฮอล์หรือเบสไนโตรเจน) และ R_1 , R_2 คือส่วนที่เป็นกรดไขมัน (ที่มา: อนุชา พรหมวังขวา และนวลศรี รักอริยะ ธรรม. 2546)

ตัวอย่างของฟอสโฟไลปิดในน้ำมันพืชได้แก่ กรดฟอสฟาติก (phosphatidic acid), ฟอสฟาติลโคลีน (phosphatidylcholine), ฟอสฟาติลอินอซิทอล (phosphatidylinositol), ฟอสฟาติลเอทานอลามีน (phosphatidylethanolamine) ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเพื่อบริโภคแล้ว ฟอสโฟไลปิดจัดเป็นสารปนเปื้อนที่ต้องมีการกำจัดออก อย่างไรก็ตามในทางการค้าฟอสโฟไลปิดบางชนิดมีประโยชน์และมีราคา เช่น ฟอสโฟไลปิดในรูปของเลซิธินหรือฟอสฟาติลโคลีน เป็นต้น

2.3 การรีไฟน์และการตีกัมมิง

กระบวนการรีไฟน์น้ำมันพืชมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารที่ทำให้คุณภาพน้ำมันลดลง หรือกล่าวได้ว่า เพื่อกำจัดสารที่ไม่ใช่พวกไตรกลีเซอไรด์ (nontriglyceride) ออกไปให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ ความขุ่น สี สารที่ทำให้เกิดการออกซิไดซ์ รวมถึงฟอสโฟไลปิด ไช กรดไขมันอิสระ เป็นต้น กระบวนการการทำน้ำมันพืชให้บริสุทธิ์หรือการรีไฟน์น้ำมันแบบดั้งเดิมมักประกอบด้วยสี่ขั้นตอนหลักๆ คือ การกำจัดยางเหนียวหรือการทำตีกัมหรือตีกัมมิง, การทำให้เป็นกลาง, การฟอกสี, และการกำจัดกลิ่น กระบวนการเหล่านี้ใช้สารเคมีและความร้อน จึงมีข้อเสียหลายประการ เช่น ใช้สารเคมีจำนวนมาก เกิดการสูญเสียไขมัน เกิดน้ำเสียปริมาณมาก ใช้พลังงานมาก รวมทั้งสูญเสียสารสำคัญที่มีมูลค่าสูง เช่น วิตามินอี เบต้าแคโรทีน เป็นต้น (Carr, 1989; Cheryan, 1998; Subramanian et al., 2001a, b; Moreau, 2005; Souza, 2008; กรณ์กนก และคณะ, 2551) ฟอสโฟไลปิดหรือกลุ่มฟอสฟาไทด์ และกรดไขมันอิสระจะถูกกำจัดออก โดยทั่วไปขั้นตอนการรีไฟน์จะเริ่มจากการกำจัดฟอสโฟไลปิด/ฟอสฟาไทด์ แล้วตามด้วยการกำจัด กรดไขมันอิสระ ตัวอย่างการรีไฟน์น้ำมันแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนทั่วไปของการรีไฟน์น้ำมัน (ที่มา: อนุชา พรหมวังขวา และนวลศรี รักอริยะธรรม. 2546)

ลำดับ	ขั้นตอน	สารที่ต้องการกำจัด
1*	ตีกัมมิง	ฟอสโฟไลปิด เม็ดสี โปรตีน คาร์โบไฮเดรต โลหะ
2*	การทำให้เป็นกลาง	ซัลเฟอร์ โลหะ สารที่ไม่ละลายในน้ำมัน สารที่ละลายน้ำ
3	การล้างด้วยน้ำ	สบู่
4	การทำให้แห้ง	น้ำ
5*	การฟอกสี	เม็ดสี ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน ซัลเฟอร์ โลหะ สบู่
6	การกรอง	ตัวดูดซับสีที่ใช้แล้ว
7*	การกำจัดกลิ่น	กรดไขมัน โมโนและไดกลีเซอไรด์ ผลิตภัณฑ์จากการออกซิไดซ์ และการแตกตัวของเม็ดสี
8	การกลั่นด้วยไอน้ำ	กรดไขมัน โมโนและไดกลีเซอไรด์ ผลิตภัณฑ์จากการออกซิไดซ์ และการแตกตัวของเม็ดสี

* เป็นขั้นตอนหลักของการรีไฟน์

สำหรับกระบวนการตีกัมมิ่งเป็นขั้นตอนแรกของการรีไฟน์ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดฟอสโฟไลปิด ฟอสฟาไทด์และยางเหนียวหรือกัม (mucilaginous gums) ทั้งนี้เพราะฟอสโฟไลปิดทำให้น้ำมันมีสีเข้มขึ้น และมีผลต่อกลิ่นรสของน้ำมัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดฟอสโฟไลปิดลงมาให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (Erickson, 1995) กระบวนการตีกัมมิ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญมาก เพราะหากไม่ทำแล้ว จะก่อให้เกิดปัญหาเช่น การตกตะกอนของกัมที่ด้านล่างของภาชนะเก็บ เพราะกัมมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าน้ำมัน, ความหนืดกัมมีผลต่อระบบท่อส่งและปั๊ม, การปนเปื้อนของกัมมีผลต่อราคาน้ำมันดิบทำให้ได้ราคาต่ำ, ฟอสโฟไลปิดมีผลทำให้เหม็นหืนได้เร็วและน้ำมันมีสีเข้มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน, เกิดการสูญเสียน้ำมันในกระบวนการกำจัดกรดซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไปของการรีไฟน์เพราะฟอสโฟไลปิดและยางเหนียวส่งผลทำให้เกิดอิมัลชัน รวมทั้งเกิดยางเหนียวติดภาชนะทำให้ยากต่อการดำเนินการ เป็นต้น (อนุชาและนวลศรี, 2546) กระบวนการตีกัมมิ่งในอุตสาหกรรมแบ่งได้สองแบบคือ

1. ตีกัมมิ่งด้วยน้ำ (water degumming) วิธีนี้จะเติมน้ำหรือไอน้ำ ณ อุณหภูมิสูง ลงในน้ำมัน ทำให้พวกฟอสฟาไทด์และยางเหนียวหรือกัมให้เกิดสภาพไฮเดรต (hydrate) ทำให้มีสมบัติไม่ละลายในน้ำมันและมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำมัน จึงใช้วิธีการเหวี่ยงแยกหรือตกตะกอนเพื่อแยกออกจากน้ำมัน
2. ตีกัมมิ่งด้วยกรด (acid degumming) วิธีนี้จะใช้กรดช่วยทำปฏิกิริยา ทั้งนี้เพราะยางเหนียวที่เป็นพวก nonhydrate จะไม่เกิดสภาพไฮเดรตกับน้ำร้อนได้ จึงใช้การทำปฏิกิริยากับกรดก่อน โดยให้กรดปรับสภาพให้เหมาะสม เพื่อให้สภาพไฮเดรตเพื่อให้ยางเหนียวจับกับน้ำและตกตะกอนออกมา นอกจากนี้กรดยังช่วยดึงโลหะหนักที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้น้ำมันเหม็นหืนได้ โดยทำให้ตกตะกอนได้เช่นกัน ตัวอย่างของกรดที่ใช้ได้แก่ กรดฟอสฟอริก กรดซิตริก เป็นต้น (สุภาจิต, 2547; กิตติศักดิ์, 2549; Subramanian et al., 1999)

กระบวนการตีกัมมิ่งถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง เช่น การพัฒนาโดยยูนิลีเวอร์ ที่ใช้อุณหภูมิลดลง, การพัฒนาโดย Lurgi โดยใช้เอนไซม์ phospholipase A1 และสภาวะการทำงานในสภาพที่กลางๆ ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดี แต่มีต้นทุนการผลิตสูงเพราะราคาเอนไซม์สูง เป็นต้น การตีกัมมิ่งด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นอีกทางเลือก เพราะเมมเบรนสามารถคัดแยกสารบนฐานของขนาดและน้ำหนักโมเลกุล โดยใช้แรงขับเป็นความดันและลดการใช้สารเคมี ทั้งนี้เทคโนโลยีเมมเบรนมีจุดเด่นหลายอย่าง เช่น การประหยัดพลังงาน ทั้งนี้เพราะเมมเบรนสามารถรวมขั้นตอนการตีกัมมิ่งและการฟอกสีเข้าด้วยกัน รวมทั้งสามารถลดปริมาณการใช้ไอน้ำ เพราะอุณหภูมิกระบวนการเมมเบรนต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการรีไฟน์แบบดั้งเดิม นอกจากนี้การประยุกต์กระบวนการเมมเบรนร่วมกับการรีไฟน์แบบดั้งเดิมทำได้ง่าย ข้อมูลการประหยัด

พลังงานด้วยกระบวนการเมมเบรนประมาณ $15-21 \times 10^{12}$ btu/ปี (Iwama, 1989; Cheryan, 1998; Koseoglu and Engelgau, 1990)

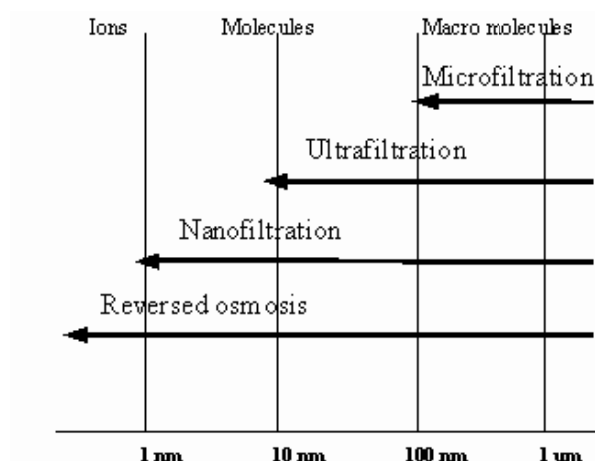
ตัวอย่างงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการดักกัมมิ่งด้วยเมมเบรนมีดังต่อไปนี้ การทำดักกัมมิ่งด้วยมิสเซลล่าของน้ำมันพีชดิบและเฮกเซน (Kim et al., 2002; Garcia et al., 2006) การแยกตัวทำละลายออกจากน้ำมันพีชดิบ (Koris and Vatai, 2002; Aliciero et al., 2002) ผลของความหนืดต่อฟลักซ์เพอร์มิเอท (Reddy et al., 2001; Moura et al., 2005) ความสามารถกักกันฟอสโฟไลปิดด้วยเมมเบรนในสภาพที่มีตัวทำละลายไม่มีขั้วต่อการเกิดไมเซลล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Lin et al., 1997) เสถียรภาพเมมเบรนและความต้านทานของเมมเบรนพอลิเมอร์ต่อตัวทำละลาย (Aliciero et al., 2002; Wu and Lee, 1999)

สำหรับขั้นตอนต่อจากการทำดักกัมมิ่งจะเป็นการกำจัดกรดไขมันอิสระหรือการทำให้เป็นกลาง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การรีไฟน์ด้วยสารเคมีที่เป็นด่าง โดยใช้หลักการการเปลี่ยนเป็นสบู่ เมื่อต่างทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระแล้ว จะเกิดเป็นสองส่วนคือ ส่วนของไขมันและส่วนน้ำที่ปนกลางจากนั้นจึงใช้การเหวี่ยงแยกและตามด้วยการล้างออก สำหรับการรีไฟน์ทางกายภาพ (physical refining หรือ steam refining) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมมากขึ้น เพราะลดการสูญเสียไขมันได้เมื่อเปรียบเทียบการวิธีจากการใช้ด่าง ในขั้นตอนนี้ นอกจากจะเป็นการกำจัดกรดแล้ว ยังสามารถลดฟอสโฟไลปิดที่ยังคงค้างอยู่ได้บ้าง สำหรับขั้นตอนที่สามเป็นการฟอกสีโดยใช้สารฟอกสีเพื่อทำการดูดซับ แล้วจึงตามด้วยขั้นตอนสุดท้ายคือการกลั่นด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อแยกเอากรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ รวมทั้งอัลดีไฮด์ คีโตน และสารระเหยง่ายออก ตัวอย่างรายละเอียดการ

2.4 เยื่อและการกรองด้วยเยื่อ

การกรองด้วยเมมเบรนหรือการแยกด้วยเยื่อเป็นหน่วยปฏิบัติการหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทสำคัญและเริ่มเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้นขึ้นและสามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ ข้อเด่นของการแยกอนุภาคในเฟสของเหลวด้วยเมมเบรนคือ การใช้พลังงานที่ต่ำเพราะไม่ต้องการใช้พลังงานเพื่อเปลี่ยนแปลงเฟส (ยกเว้นกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน) รวมทั้งยังเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อการเสื่อมสภาพเมื่ออุณหภูมิสูง การนำเมมเบรนไปประยุกต์ใช้งานได้นั้นขึ้นกับความสามารถและคุณภาพของเมมเบรนเป็นหลัก เช่น ต้องมีความแข็งแรงเชิงกล มีเสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน ณ สภาพการทำงาน, ให้ค่าฟลักซ์และการเลือกผ่านสูง, เกิดฟาว์ลิงต่ำและทำความสะอาดได้ง่ายเมื่ออุดตัน รวมทั้งเมมเบรนมีราคาไม่แพง กระบวนการแยกโดยเทคโนโลยีเมมเบรนสามารถดำเนินการได้หลายแบบแบ่งระดับไปตามขีดความสามารถในการแยกของขนาดของรูเยื่อกรองที่คัดแยกอนุภาค โมเลกุล อีออนต่างๆในของเหลว (จากหายาไป

ละเอียด ดังรูปที่ 2.2 แบ่งได้เป็น 4 ระดับ คือ ระดับไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) และรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis) (Mulder, 1991; Howell, 2004)



รูปที่ 2.2 แสดงระดับของเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (ที่มา: www.lenntech.com/membrane-technology.htm)

เกณฑ์การคัดขนาดการแยกมีการนำเสนออย่างหลากหลาย และช่วงขนาดจะมีการซ้อนทับกันบ้างแต่โดยหลักการแล้ว การแยกด้วยเมมเบรนในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชันเป็นการแบ่งตามขนาดรูพรุนนั่นเอง โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูขนาดใหญ่สุดจะถูกกักไว้ทั้งหมด ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูขนาดใหญ่สุดและใหญ่กว่ารูที่มีขนาดเล็กสุดจะถูกกักอยู่เป็นบางส่วนและบางส่วนจะผ่านไปขึ้นกับการกระจายขนาดของรูเมมเบรน ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูที่เล็กที่สุดจะผ่านออกไปทั้งหมด จึงกล่าวได้ว่าการแยกด้วยเมมเบรนจึงเป็นการคัดขนาดโมเลกุลนั่นเอง

เมมเบรนหรือเยื่อจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพการแยก และความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ขั้นตอนเริ่มต้นในการเลือกใช้เมมเบรนคือลักษณะทางเคมีเชิงฟิสิกส์เพราะมีผลต่อคุณภาพการแยกและการเกิดฟอสฟอรีน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงรูปแบบการใช้เพราะมีผลต่อค่าพาชีตและฟอสฟอรีน รวมทั้งการสิ้นเปลืองพลังงาน การประยุกต์เทคโนโลยีเยื่อแผ่นในยุคแรกและต่อเนื่องมาจนปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมการผลิตหลักๆ (เลือกใช้ตามขีดความสามารถของแต่ละระดับ) เช่น อุตสาหกรรมอาหาร-เครื่องดื่ม (เบียร์ ไวน์ นม น้ำผลไม้) เพื่อแยกองค์ประกอบ เช่น โปรตีน เอ็มไซม์-แลคโตสฟรุกโตส ไขมัน แร่ธาตุ วิตามินต่างๆ โดยไม่ใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนต่ำเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ปลอดภัยในขณะแยกซึ่งทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้น รวมถึงผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีความ

อ่อนไหวต่ออุณหภูมิ ค่ากรดต่าง ตัวทำละลาย แรงกระทำต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตยา (ใช้เพื่อแยกองค์ประกอบทางเคมี ด้วยยาสำคัญที่มีราคาแพง สารปฏิชีวนะ วิตามินต่างๆ ที่มีความเข้มข้นในระดับต่ำ) ซึ่งการทำให้บริสุทธิ์และนำกลับคืนผลิตภัณฑ์เสียค่าใช้จ่ายสูงโดยเฉพาะในแง่ของพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการแบบทั่วไป ในขณะที่การใช้อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมโลหะ (แยกน้ำมัน แยกสารเคมี ตัวเติม- ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะ และอื่นๆ) และ/หรือนำกลับคืนสิ่งที่มีมูลค่า เช่น เอ็มไซม์ โปรตีน น้ำตาล น้ำมัน อีออนโลหะในรูปออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับคอลลอยด์ วิตามินต่างๆที่เหลืค้างกลับออกมาจากน้ำหรือน้ำป้อน เป็นต้น (Baker, 2000; Grandison และคณะ, 1996) ทั้งนี้แสดงขนาดของโมเลกุล อนุภาค และ อีออน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อนุภาคขนาดเล็ก ขนาดโมเลกุล และ อีออนต่างๆ (ที่มา: Beaton, 1980)

ชนิด	ช่วงของขนาด (นาโนเมตร)
Yeasts and fungi	1,000-10,000
Bacteria	300-10,000
Oil emulsions	100-10,000
Colloidal solids	100-10,000
Viruses	30-300
Proteins/Polysaccharides (mol.wt 10^4 - 10^6)	2-10
Common antibiotics (mol.wt 300-1000)	0.6-1.2
Organic molecules (mol.wt 30-500)	0.3-0.8
Inorganic ions (mol.wt 10-100)	0.2-0.4
Water (mol.wt 18)	0.2

ในขณะที่การขยายตัวของการประยุกต์ใช้งาน พบว่ามีการใช้ในสาขากระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพและเทคโนโลยีชีวภาพทางการแพทย์ เช่น การใช้แยกเซลล์ การใช้ฟอกเลือดให้บริสุทธิ์ การใช้ร่วมในถังหมัก กระบวนการชีวภาพเป็นต้น(Howell และคณะ 1993; Wang, 2001) โดยเลือกรูปแบบของกระบวนการ และ ชนิด-สมบัติของเยื่อแผ่น (ชอบน้ำ-Hydrophilic membrane, ไม่ชอบน้ำ-Hydrophobic membrane, มี ประจุ และ ไม่มีประจุที่ผิว เป็นต้น)

วัสดุที่ผลิตเยื่อแผ่น (โพลีเมอร์, เซรามิกส์) รูปร่างชุดเยื่อแผ่น (แบบท่อกลวง, แบบเส้นใย, แบบแผ่น เพรม, แบบม้วน) รูปแบบการเดินระบบ (แบบปิดตาย-Dead End filtration และ แบบไหลขวาง-Cross flow filtration) และรูปแบบการกรอง (Inside to Outside และ Outside to Inside) ให้สอดคล้องกับลักษณะ และสมบัติน้ำป้อนและ/หรือสารที่ต้องการแยก ภายใต้หลักของเทคโนโลยีที่มีความคุ้มค่าและเกิดประสิทธิผล สูง (Eco-Technology and Optimisation) สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่องซึ่งปัจจุบันนี้มีการพัฒนาจน เกิดจุดคุ้มทุนทั้งในเรื่องของ พลังงาน ค่าต้นทุนของเยื่อแผ่น(Howell และ คณะ, 1993; Mulder, 1991; Jones และ คณะ, 2000)

ลักษณะการใช้งานเทคโนโลยีเยื่อแผ่นในกระบวนการแยก สามารถสรุปได้ 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ การ แยกตัวทำละลายออกจากตัวถูกละลาย มีวัตถุประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นการทำให้ผลิตภัณฑ์ ใส (การแยกของแข็งแขวนลอย อนุภาคระดับคอลลอยด์ เชื้อโรคปนเปื้อน ออกจากโปรตีน และ/หรือเอนไซม์ เป็นต้น) การทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้น และ การแยกตัวถูกละลายออกจากตัวถูกละลาย เพื่อแยกของ ผสมที่มีขนาดโมเลกุลระดับไมครอนและนาโน ทั้งนี้ในรูปแรกของการแยกกล่าวได้ว่าเป็นขั้นตอนสำคัญ ในช่วงท้ายของกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม (downstream processing) ขณะที่รูปการการใช้งานเพื่อ การแยกในลำดับต่อมานั้นมีความเป็นไปได้และเป็นเทคโนโลยีที่คาดหวังสำหรับการใช้งานแยกหลายชนิด โมเลกุลที่มีความแตกต่างกันของขนาด-มวลโมเลกุล เช่น การแยก PEG, BSA, α -lactalbumin และ lysozyme (Cheryan, 1998), การแยกกรดอะมิโน โปรตีนชนิดต่างๆ (การแยกโปรตีนจากส่วนใสของนา และ เนื้อปลา) (Nakao และ คณะ, 1988; Whu และ คณะ, 2000; Afonso และ คณะ, 2002) ทั้งนี้สามารถ จัดวางรูปแบบ-ระดับการใช้งานร่วมกับขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตช่วงตอนต้นและตอนท้ายของกระบวนการ ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนใช้งานได้แบบระบบเดี่ยว (Single Process) หรือ ใช้งานแบบ หลายระดับร่วมกัน (Multi series Process) หรือ ใช้งานร่วมกับหน่วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีแบบ อื่นๆ ที่สามารถจัดวางรูปแบบและลำดับการแยกระดับต่างๆตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการของแต่ละอุตสาหกรรม ขณะเดียวกันก็สามารถขยายสเกลเพื่อรองรับกำลังการใช้งานที่เพิ่มขึ้นในอนาคต (Durham และ คณะ 2001) และมีการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นระดับไมโครและอัลตราฟิลเตรชันในการแยกไตรกลีเซอไรด์ฟอสโฟไลปิดที่ เกิดขึ้นระหว่างการทำดีกัมมิงน้ำมันพืช (Juliana และ คณะ 2005)

ในขณะที่ประเด็นการเกิดฟลาวริงที่มีหลายลักษณะที่เกิดขึ้นขณะเดินระบบเยื่อแผ่นระดับต่างๆ (Chen และคณะ, 1997; Bowen และคณะ, 1999; Gotor และคณะ, 2001) ส่งผลให้สมรรถนะและขีดความสามารถในการแยกขณะเดินระบบแบบต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องลดลง โดยพอสรุปลักษณะหลักๆ ของฟลาวริงที่เกิดขึ้นแบบใดแบบหนึ่งหรือหลายแบบร่วมกัน คือ เกิดจากการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคโมเลกุลที่ใกล้ผิวหน้าเยื่อแผ่น (concentration polarization), การสะสมของอนุภาค-โมเลกุลที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น การบล็อกรูของอนุภาค-โมเลกุลภายในรูกรอง และ การอุดตันภายในรูกรอง เป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ด้วยหลายเทคนิคร่วมกันภายใต้ความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาการสมัยใหม่ เช่น การเดินระบบที่ค่าฟลักซ์ต่ำ (Field และคณะ, 1995; Howell, 1995) การเดินระบบที่ค่าความดันขับต่ำ การใช้เทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ และการปรับสภาพน้ำป้อนเข้าระบบ รวมถึงการเลือกใช้วัสดุเยื่อแผ่นและระดับของความสามารถในการแยกที่เหมาะสมกับลักษณะน้ำป้อน เป็นต้น ซึ่งการใช้หลายเทคนิคร่วมกันเป็นสิ่งที่ทำให้ระบบมีความคุ้มค่าสูง เดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ราคาต้นทุนเยื่อแผ่นในตลาดโลกมีราคาถูกลง คุณภาพเยื่อเมมเบรนที่พัฒนาและผลิตขายมีคุณภาพดี มีแนวโน้มการเกิดฟลาวริงในระดับต่ำ อายุเยื่อแผ่นสำหรับการใช้งานยาวนานขึ้น เป็นต้น (Howell และคณะ, 1993; Howell, 2004; Sheikholeslami, 1999; Wakeman และคณะ, 2002)

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันเป็นแรงขับเพื่อแยกสารป้อนให้ได้เป็นสองกระแสคือกระแสเพอร์มิเอต(permeate) เป็นส่วนที่ผ่านเมมเบรน และกระแสรีเทนเทต(retentate) เป็นส่วนที่ถูกกักกันด้วยเมมเบรน หลักการทำงานของกระบวนการนี้มีดังนี้ จากสารละลายป้อนที่ประกอบด้วยโมเลกุลเล็กและใหญ่ร่วมกันนั้น เมื่อเข้าสู่ระบบกรองแล้วนั้น ส่วนโมเลกุลเล็กในสารละลายจะผ่านเมมเบรนได้โดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อนสารเนื่องจากผลต่างความดันระหว่างเมมเบรน (transmembrane pressure, TMP) ในขณะที่ตัวถูกละลายจะถูกกักไว้ด้วยเมมเบรนเรียกว่า รีเทนเทต หรือสารละลายเข้มข้น (concentrate, enrichment) ในขณะที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายบางส่วนที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ผ่านเมมเบรนได้คือเพอร์มิเอต การนำส่วนรีเทนเทต และ/หรือเพอร์มิเอตไปใช้ขึ้นกับจุดประสงค์การแยก

กระบวนการเมมเบรนด้วยความดันเป็นแรงขับสามารถแบ่งระดับได้หลายชั้น เช่น การกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน การกรองระดับนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผกกลับ เป็นต้น ข้อจำกัดที่สำคัญของการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน หรือนาโนฟิลเตรชัน คือคุณภาพของสารป้อน ยกตัวอย่างเช่น หากนำกระบวนการกรองดังกล่าวใช้กับสารป้อนที่ตัวถูกละลายหรือองค์ประกอบหลากหลายชนิดแล้ว จะทำให้ฟลักซ์ลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการกักกันของเมมเบรน เพราะการเกิดฟอสฟอรัสบนผิวหน้าและ/หรือในรูพรุนของเมมเบรน ส่งผลทำให้สมรรถนะของการกรองลดลง สำหรับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันเป็นการกรองที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา การกรองนา

โนฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกที่อาศัยแรงขับเคลื่อนที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมมเบรนการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันจะมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันส่งผลทำให้เมมเบรนสามารถกักกันสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 ในขณะที่เดียวกับการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันเมื่อเทียบกับออสโมซิสผันกลับพบว่า ค่าการกักกันไอออนที่มีวาเลนซ์เดียวมีค่าน้อยกว่า โดยการกรองนาโนฟิลเตรชันสามารถกักกันได้ประมาณร้อยละ 10-80 ขึ้นกับคุณลักษณะของเมมเบรน แต่สามารถกักกันไอออนที่มีวาเลนซ์ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป ได้มากกว่าร้อยละ 90 การนำประโยชน์การกรองระดับนาโนฟิลเตรชันได้แก่ การแยกสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารละลาย การแยกสารพิษโมเลกุลเล็กออกจากน้ำ การผลิตเนยแข็งและน้ำผลไม้และการดองกรดอะมิโนและสารปฏิชีวนะ เป็นต้น (Raman และคณะ, 1994, ภัทรศักดิ์เพชร, 2549; Jiratananon และคณะ, 2000; Ducom และ Cabassud, 1999; Matsubara, 1996)

การแบ่งกระบวนการกรองสามารถแบ่งออกได้บนฐานของรูปแบบการดำเนินการและทิศทางการไหลของสารป้อนได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การกรองแบบปิดตาย (dead end filtration) และการกรองแบบไหลขวาง (cross flow filtration) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้การกรองแบบไหลขวาง โดยสารป้อนไหลขนานกับผิวเมมเบรน ในขณะที่เพอร์มิเอทจะซึมผ่านเมมเบรนในทิศทางตั้งฉากกับผิวเมมเบรนและไหลออกจากโมดูล ซึ่งรูปแบบการกรองนี้ทำให้ลดการเกาะติดกับผิวเมมเบรนและลดการอุดตัน เพราะอนุภาคสารจะถูกพาออกไปพร้อมกับรีเทนเทท ข้อเด่นของการกรองแบบไหลขวางคือสามารถลดการสะสมของอนุภาคและการเกิดเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ดีจึงเหมาะกับกระบวนการกรองสารที่มีปริมาณมาก สำหรับรูปแบบการกรองแบบปิดตายเหมาะกับการกรองที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ หรือเป็นการกรองในปริมาณน้อยๆ เพื่อทดสอบเยื่อ เป็นต้น (ชันทอง, 2547; Coutinho และคณะ, 2009; Subramanian และคณะ, 1998; Subramanian และคณะ, 2003)

จากที่ได้กล่าวข้างต้นปรากฏการณ์คอนเซนเทรชันพอลาไรเซชันและฟาล์วลิ่งมีผลต่อสมรรถนะของระบบกรองด้วยเมมเบรน อธิบายได้ดังนี้ คอนเซนเทรชันพอลาไรเซชันเป็นฟาล์วลิ่งแบบผันกลับได้ เกิดขึ้นจากตัวถูกละลายขนาดโมเลกุลต่างๆ ถูกแรงขับเคลื่อนดันผลักดันไปยังบริเวณผิวหน้าเมมเบรน สำหรับตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่จะถูกกักไว้ที่ผิวหน้าเมมเบรนหรือใกล้ผิวเมมเบรน จึงเกิดการสะสมตัวถูกละลายเหล่านี้ที่บริเวณใกล้ผิวและที่ผิวเมมเบรนเพราะโมเลกุลเหล่านี้ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนมีค่าสูงกว่าบริเวณที่ห่างออกไปในบัลค์สารละลาย ดังนั้นโมเลกุลเหล่านี้จึงเกิดการแพร่กลับ (back diffusion) ไปยังบัลค์เพราะผลต่างของความเข้มข้น หากความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงจนถึงขีดจำกัดการแพร่ของสารนั้นๆ แล้ว ตัวถูกละลายจะเกิดเป็นเจลหรือชั้นเค้กที่บริเวณใกล้ผิวหน้าเมมเบรนโดยชั้นเจลหรือเค้กนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นเมมเบรนอีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นฟลักซ์จึงลดลงเพราะชั้นเจลหรือเค้กสร้างความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นรวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการแยก

สารด้วยเช่นกัน เพราะคุณสมบัติการกักกันเปลี่ยนแปลงขึ้นกับลักษณะของชั้นแค้กที่เกิดขึ้นดังนี้ หากตัวถูกละลายขนาดเล็กเคลื่อนที่ในชั้นแค้กได้ช้า (นั่นคือรูพรุนของแค้กมีขนาดเล็กและแน่นกว่าเมมเบรนจริง) ดังนั้นคุณสมบัติการกักกันจะเพิ่มขึ้น เพราะโมเลกุลขนาดเล็กไม่สามารถเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ได้ยากเพื่อไปสู่เมมเบรนจริงของระบบ

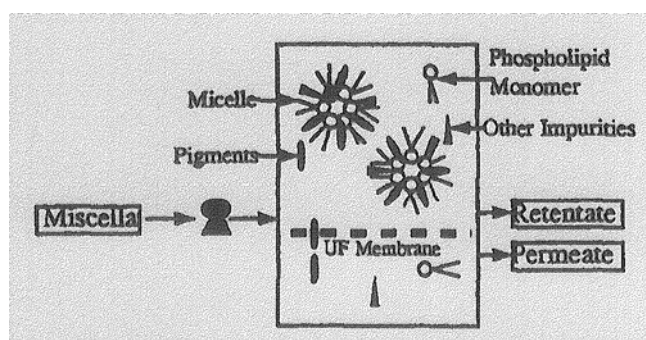
ฟาล์วลิ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สมรรถนะของเมมเบรนลดลง ส่งผลต่อฟลักซ์เพอร์มิเอทและอายุเมมเบรนลดลง การแยกฟาล์วลิ่งและคอนเซนเตรชันพอลาริเซชันอาจอธิบายคร่าวๆ ได้ดังนี้ ฟาล์วลิ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคมีการสะสมและอุดตันของตัวถูกละลายทั้งที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรนและไม่สามารถผันกลับได้ โดยมีแรงกระทำระหว่างอนุภาคและเมมเบรนอย่างมาก ทำให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กลง การเกิดฟาล์วลิ่งสามารถเกิดได้หลายอย่าง เช่น ที่ผิวด้านนอกของเมมเบรนเป็นชั้นแค้กที่ช่องเปิดรูหรือภายในรู การเกิดฟาล์วลิ่งบางชนิดจะทำให้รูเมมเบรนมีขนาดเล็กลง เพราะขวางการไหลผ่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการล้างทำความสะอาดยาก เป็นต้น กลไกการเกิดฟาล์วลิ่งสามารถหาได้ในหนังสือและบทความงานวิจัยจำนวนมากและไม่ขอกล่าวรายละเอียดในที่นี้ สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟาล์วลิ่งได้แก่ สภาวะดำเนินการ เช่น ความเร็วไหลขวาง ความดัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาจากคุณสมบัติเมมเบรนและคุณสมบัติของสารละลายด้วยเช่นกันการจัดฟาล์วลิ่งเป็นสิ่งสำคัญเพื่อคงสมรรถนะการกรอง อย่างไรก็ตามต้นทุนการกำจัดฟาล์วลิ่งอาจสูงถึง 30% ของค่าดำเนินการ รวมทั้งมีผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เพราะการจัดฟาล์วลิ่งจำเป็นต้องใช้สารเคมีนั่นเอง

คุณสมบัติของเมมเบรนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อสมรรถนะการกรอง การเลือกวัสดุเมมเบรนเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับแรกเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน สารป้อน และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแยก เพื่อป้องกันการเกิดฟาล์วลิ่ง ปัจจัยที่ต้องพิจารณาเลือกใช้เมมเบรนได้แก่ คุณสมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ลักษณะผิวหน้าเมมเบรน ประจุของเมมเบรน ขนาดรูพรุน เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการกรองเฟสน้ำมัน ซึ่งต้องเป็นเมมเบรนควรมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อให้ฟลักซ์และคุณสมบัติการเลือกผ่านดีสำหรับขนาดรูพรุนมีผลต่อการแยกและฟลักซ์โดยฟลักซ์มีค่าสูงหากเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ และมีแนวโน้มลดลงหากเลือกใช้เมมเบรนที่มีเนื้อแน่นและรูพรุนขนาดเล็กเพราะส่งผลต่อการอุดตันและสะสมอยู่ในรูพรุนเมมเบรน คุณสมบัติของเมมเบรนที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือวัสดุที่ใช้ผลิต ซึ่งเมมเบรนเกรดการค้าใช้วัสดุผลิตที่แบ่งกว้างๆ ได้สองชนิดคือ พอลิเมอร์ ได้แก่ cellulose acetate, polyamide, polysulfone, polyvinylidenedifluoride เป็นต้น และอนินทรีย์ ได้แก่ โลหะและเซรามิกส์ เป็นต้น ลักษณะเฉพาะของวัสดุการผลิตมีผลต่อคุณภาพเมมเบรน เช่น เยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันที่ผลิตจากพอลิซัลโฟน (polysulfone) เพราะมีความทนต่อสารเคมีและอุณหภูมิ คงทนต่อแรงกลที่ดี และเป็นเยื่อแผ่นชนิดที่ไม่ชอบน้ำ สำหรับเยื่อ

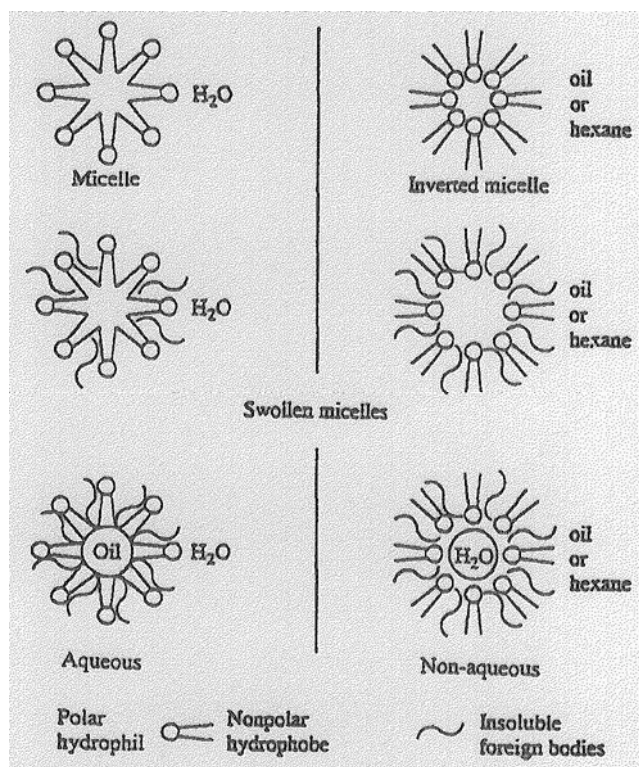
แผ่นเซลลูโลสอะซิเตทเป็นชนิดชอบน้ำ จึงเหมาะกับการแยกที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น (Coutinho และคณะ, 2009)

ตัวแปรดำเนินงานในกระบวนการเมมเบรนที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความหนืด ความหนาแน่นของสารป้อน รวมทั้งความเร็วไหลขวางของระบบกรองไหลขวาง เป็นต้น โดยทั่วไปฟลักซ์เพอร์มิเอทขึ้นตรงกับ ความดัน แต่ผกผันกับความหนืด สำหรับอุณหภูมิสูงมีผลต่อฟลักซ์ในทิศทางที่สูงขึ้น เพราะอุณหภูมิสูงมีผลต่อความหนืดและความสามารถในการละลายของสารป้อนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงมีผลต่อการเสื่อมสภาพสาร เช่น ออกซิเดชันและยาที่มีความไวต่อการเสื่อมสภาพ ณ อุณหภูมิสูง สำหรับความดันมีผลต่อฟลักซ์เช่นกันเนื่องจากระบบใช้ความดันเป็นตัวขับเคลื่อน แต่ความดันที่สูงเกินไป อาจมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงหรือคงที่ได้ เพราะทำให้อนุภาคมีการอัดตัวแน่นขึ้น นอกจากนี้รูปแบบเมมเบรนเช่น แผ่น หรือโมดูล มีผลต่อสมรรถนะระบบเช่นกัน (Coutinho และคณะ, 2009)

กระบวนการตีพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเริ่มในปี ค.ศ.1977 ซึ่งการลดปริมาณฟอสโฟไลปิด จำเป็นต้องพิจารณาขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่เหมาะสม น้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (ประมาณ 900 Da) และน้ำหนักโมเลกุลของฟอสโฟไลปิด (ประมาณ 800 Da) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการแยกฟอสโฟไลปิดออกจากไตรกลีเซอไรด์ด้วยเมมเบรนจึงทำได้ยาก อย่างไรก็ตามฟอสโฟไลปิดเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีหรือเป็นสารลดแรงตึงผิว เพราะโมเลกุลฟอสโฟไลปิดประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจึงสามารถฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์ (รีเวิร์ส) ได้ ส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 20,000 รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการแยกฟอสโฟไลปิดด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนโดยใช้ประโยชน์จากการฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์ของฟอสโฟไลปิดและเฮกเซน และรูปที่ 2.4 แสดงกลไกการฟอร์มตัวของฟอสโฟไลปิดเป็นไมเซลล์ในสถานะของสารละลายที่เป็นน้ำและไม่ใช่น้ำ



รูปที่ 2.3 กลไกการแยกฟอสโฟไลปิดด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนจากการฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์ (ที่มา: Lin และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.4 การฟอร์มตัวของฟอสโฟไลปิดเป็นไมเซลล์ในสภาวะของสารละลายที่เป็นน้ำ (aqueous) และสารละลายที่เป็นไม่ใช่น้ำ (non-aqueous) (ที่มา: Lin และคณะ, 1997)

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการการทำดีกัมมิ่งทั้งแบบดั้งเดิม และทางเลือกใหม่ต่างๆ มีมากมาย ในส่วนนี้จะกล่าวสรุปข้อมูลงานวิจัยโดยย่อของการทำดีกัมมิ่งที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำดีกัมมิ่งด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนและเทคนิคการประยุกต์ใช้เมมเบรนกับการทำดีกัมมิ่งแบบดั้งเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่น่าสนใจ ดังต่อไปนี้

Arosa S., Manjula S., Gopalakrishna A.G. and Subramanian R., 2005 ศึกษาการใช้เมมเบรนพอลิเมอร์คอมโพสิตกับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินในสภาวะที่มีเฮกเซนและไม่มีเฮกเซน โดยใช้การกรองด้วยระบบปิดตาย ความคุมอุณหภูมิ 40°C ความเร็วรอบ 800 rpm ความดันระบบของน้ำมันปาล์มดิบและมิสเซลลา 4 MPa และ 2 MPa ตามลำดับ พบว่าสามารถแยกฟอสโฟไลปิดออกจากไตรกลีเซอไรด์และให้ความสามารถการกำจัดฟอสโฟไลปิดได้มากกว่า 95% แต่ไม่สามารถแยกแคโรทีน โทโคฟีรอล และโทโคไตรอีนอลได้

Basso R.C., Goncalves L.A.G., Grimaldi R., and Viotto L.A., 2009. ศึกษาการทำดีกัมมิงจากมิสเซลล่าของน้ำมันถั่วเหลืองดิบและเฮกเซน โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีขนาดรูพรุน 0.01 ไมครอน เตินระบบแบบไหลขวาง ในช่วงความดัน 0.5-2.5 bar และความเร็วไหลขวาง 1.0-3.4 เมตรต่อวินาที จากนั้นใช้เทคนิคไดอะไลซิสเพิ่มความเข้มข้นของเลซิthin จากถั่วเหลืองได้เป็น 69.7% (2 ครั้ง ไดอะไลซิส และ เฮกเซน 12 กิโลกรัม) และเป็น 90.7% (4 ครั้ง ไดอะไลซิสและ เฮกเซน 24 กิโลกรัม)

Carvalho C.C.d., Souza M.P.d., Silva T.D.d., Goncalves L.A.G., and Viotto L.A., 2006. ศึกษาการทำดีกัมมิงของมิสเซลล่าระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองดิบกับเฮกเซนโดยใช้น้ำหนักน้ำมันเป็น 32% โดยใช้กระบวนการกรองไหลขวางระดับอัลตราฟิลเตรชัน การศึกษาอยู่บนฐานเมมเบรนเซรามิกอะลูมินาสองชนิด การทดลองควบคุมอุณหภูมิคงที่ 40°C เพื่อศึกษาผลความเร็วไหลขวางและความดันต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทและความสามารถในการกำจัดฟอสโฟไลปิด ผลการทดลองพบว่าฟลักซ์เพอร์มิเอทแปรผันตามความดัน และความเร็วไหลขวางมีผลต่อฟลักซ์เพราะลดความหนาของชั้นพอร์ไรเซชัน เมมเบรนทั้งสองชนิดในการทดลองให้ผลการกำจัดฟอสโฟไลปิดได้ในช่วง 70-95% โดยความสามารถในการกำจัดฟอสโฟไลปิดแปรผันตรงกับความดันและแปรผกผันกับความเร็วไหลขวางเช่นกัน

Garcia A., Alvarez S., Riera F., Alvarez R., Coca J., 2006. ศึกษาการสมรรถนะของเยื่อแผ่นชนิดพอลิอีเธอร์ซัลโฟนต่อกระบวนการดีกัมมิงของมิสเซลล่าจากน้ำมันทานตะวันและเฮกเซน โดยเมมเบรนมีขนาดพื้นที่การกรอง 0.044 ตารางเมตร และ MWCO เป็น 4000 และ 9,000 Da ที่สภาวะความดันในช่วง 0.4-1.2 MPa ณ อุณหภูมิ 40°C พบว่าเยื่อแผ่นทั้งสองชนิดมีความสามารถในการกำจัดฟอสโฟไลปิดได้ใกล้เคียงกัน (95-97%) โดยพบว่าเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน 9,000 Da ให้ผลที่ดีต่อกระบวนการดีกัมมิง นั่นคือกระแสเพอร์มิเอทจะมีค่าฟลักซ์สูงกว่า ความสามารถในการกำจัดน้ำมันต่ำกว่าและความสามารถกำจัด FFA สูงกว่าเมื่อเทียบกับเยื่อกรองขนาดรูพรุน 4000 Da โดยสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุน 9,000 Da คือ ความดัน 1.2 MPa ความเร็วการป้อน 5 m/s และอุณหภูมิ 40°C

Hafidi A., Pioch D., Ajana H., 2005. ศึกษาการใช้เยื่อแผ่นระดับไมโครฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการดูดซับเพื่อการดีกัมมิงและกำจัดกรดในน้ำมันพืชจากถั่วเหลือง ทานตะวัน และเรพซีด โดยน้ำมันพืชดิบผ่านการเตรียมเบื้องต้นด้วยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% และ 40% w/v เพื่อควบคุมปริมาณ FFA ฟอสโฟไลปิด สบู่ และน้ำก่อนนำเข้ากระบวนการกรอง การกรองเดินระบบแบบปิดตาย อุณหภูมิคงที่ 25°C และใช้กระดาษกรองเซลลูโลสขนาดรูพรุน 2.5 ไมครอน พื้นที่การกรอง 16 ตารางเซนติเมตร สำหรับการกรองแบบไหลขวางใช้เยื่อแผ่นท่อชนิดอะลูมินา ที่มีขนาดรูพรุนเป็น 0.2, 0.5

และ 0.8 ไมครอน พื้นที่การกรอง 40 ตารางเซนติเมตร ความเร็วตามขวาง 3.5 เมตรต่อวินาที และความดันข้ามเยื่อแผ่น 200 kPa พบว่า ฟลักซ์เริ่มต้นของเยื่อแผ่น 0.8 ไมครอนดีที่สุด แต่น้ำมันที่ได้มีการปนเปื้อนของสปู สำหรับน้ำมันที่ผ่านการกรองมีคุณภาพดีกับเยื่อแผ่น 0.2 และ 0.5 ไมครอน

Indira T.N. , Hemavathy J. , Khatoon S. , Krishna A.G., 2000 ศึกษากระบวนการดีกัมมิ่งน้ำมันรำข้าวด้วยน้ำ โดยตัวแปรการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ 26-90°C, ปริมาณน้ำที่เติม 0.5-4.0%, เวลากรอง 10-180 นาที, ความเร็วการกรอง 30-400 รอบต่อนาที โดยเมื่อกระบวนการเสร็จแล้ว จะปรับอุณหภูมิของสารเป็น 55°C แล้วปั่นเหวี่ยงแยกด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ผลการทดลองพบว่าปริมาณตะกอนอยู่ในช่วง 4.6-15.1 ปริมาณตะกอนแปรผกผันต่ออุณหภูมิ อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 68-73°C นอกจากนี้ปริมาณตะกอนแปรผันตามปริมาณน้ำที่ใช้ และปริมาณน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3.9-4.0% สำหรับเวลาและความเร็วมีผลทำให้ปฏิกิริยาดำเนินได้ดี

Kim I.C., Kim J.H., Lee K.H., Tak T.M., 2002. ศึกษากระบวนการดีกัมมิ่งเพื่อแยกฟอสโฟไลปิดออกจากน้ำมันพืชดิบโดยเตรียมเยื่อพอลิเมอร์ที่ทำจาก PVDF (polyvinylidene fluoride), PES (polyether sulfone) และ PSf (polysulfone) ในห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคเฟสอินเวอร์ชัน การทดลองการทำดีกัมมิ่งใช้ชุดกรองแบบปิดตาย สารป้อนเป็นมิลลิลิตรระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองดิบและเฮกเซนที่มีน้ำมันถั่วเหลือง 25% ผลการทดลองพบว่า PVDF มีความเสถียรต่อเฮกเซนมากกว่าชนิด PES และ PSf นอกจากนี้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะมีเสถียรภาพที่ดีกว่า สำหรับค่าฟลักซ์การกรองมีการลดลงอย่างทันทีในช่วงแรกเมื่อเทียบกับเวลา อันเป็นผลจากคอนเซนเตรชันพอร์ไรเซชันและการเกิดฟอสฟอไลด์ภายใน เมมเบรนชนิด PES และ PSf มีการลดลงของฟลักซ์มากกว่าชนิด PSDF

Koris A. and Marki E., 2006. ศึกษาการทำดีกัมมิ่งจากน้ำมันทานตะวันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดท่อเฮรามิกส์ที่มีขนาดรูกรอง 100 นาโนเมตร และ 20 นาโนเมตร สภาวะการทดลอง ณ อุณหภูมิ 45°C ช่วงความดัน 1-5 บาร์ และความเร็วอัตราการไหล 0.2-0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เยื่อแผ่นถูกทำความสะอาดด้วยไฮเพอรานอล พบว่าเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูกรอง 20 นาโนเมตร มีความสามารถในการดีกัมมิ่งสูงสุด ประมาณ 97% ที่ความดัน 2 บาร์ ในขณะที่ขนาดรูกรอง 100 นาโนเมตรทำได้เพียง 47% ที่ความดันเดียวกัน

Koris A. and Vatai G., 2002. ศึกษาการแยกฟอสโฟไลปิด จากน้ำมันถั่วเหลืองดิบและน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ด้วยการใช้เมมเบรนชนิดแผ่นเกรดการค้าสามชนิดดังนี้ ขนาดรูกรอง 0.2 ไมครอน, MWCO 55 kDa และ 15 kDa ตามลำดับ ณ ความดันขั้วระหว่าง 2-5 บาร์ อุณหภูมิ 40-60°C และความเร็วไหลขวาง 0.3-0.4 L/m² ผลการทดลองพบว่า การแยกฟอสโฟไลปิดออกจากน้ำมันพืชดิบโดยใช้เยื่อแผ่นเป็นกระบวนการ

ที่มีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องมีการใช้กระบวนการปรับปรุงเบื้องต้นก่อนแยก เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูกรอง 15 kDa มีความสามารถแยกกรดไขมันชนิดฟอสโฟไลปิดได้สูงสุดถึง 77 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความดันขับ 5 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้การเดินระบบแบบไหลขวางที่ความเร็วการไหล 0.3-0.4 ลิตร/ลบ.ม.

Lin L., Rhee K.C., and Koseoglu S.S., 1997 ศึกษากระบวนการดีกัมมิงของมิสเซลลาระหว่างน้ำมันคอททอนและเฮกเซนในสัดส่วนน้ำมันคอททอน 25% ด้วยการกรองแบบไหลขวางระดับไมโครฟิลเตรชัน (100 ไมครอน) ใช้เมมเบรนเกรดการค้าสองชนิด ผลการทดลองพบว่าความดันมีผลต่อฟลักซ์เฮกเซนและฟลักซ์มิสเซลล่า ฟลักซ์เฮกเซนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อเพิ่มความดันจาก 100 ถึง 400 psi แสดงให้เห็นว่าความดันไม่ส่งผลทำให้รูพรุนเมมเบรนเปลี่ยนแปลงจากการอัด ฟลักซ์มิสเซลล่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันเพิ่มขึ้นในช่วงความดันต่ำและจะเข้าสู่สภาพคงตัวเมื่อความดันสูงกว่า 300 psi แสดงว่ากลไกการกรองของความดันมีผลอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความดันต่ำ ในขณะที่ช่วงความดันสูงกลไกการกรองเป็นผลจากการถ่ายโอนมวล ทั้งนี้เป็นผลจากชั้นเจลที่ผิวหน้าเมมเบรน นอกจากนี้อุณหภูมิมีผลต่อฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ เพราะอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้ความหนืดลดลงแต่เพิ่มค่าความสามารถการแพร่ซึม อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงส่งผลต่อการระเหยเฮกเซนได้ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต้องต่ำกว่า 60°C สำหรับผลการกำจัดฟอสโฟไลปิดได้ถึง 94.6-99.4%

Liu K.T., Gao S., Chung T.W., Huang C.M., and Lin Y.S., 2012. ศึกษาการทำดีกัมมิงกับน้ำมันสุปดำโดยใช้การดีกัมมิงแบบดั้งเดิมร่วมกับการกรองด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน ตัวแปรการศึกษาครั้งนี้ การดีกัมมิงแบบดั้งเดิมประกอบด้วยอุณหภูมิ ปริมาณกรด ความเร็วหมุนเหวี่ยง โดยใช้เทคนิคการศึกษาแบบผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (response surface methodology) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ อุณหภูมิ 65°C ความเข้มข้นกรด 4% และความเร็วหมุนเหวี่ยง 1,600 รอบต่อนาที ทำให้ปริมาณฟอสโฟไลปิดลดลงจาก 1,200 ppm ไปเป็น 60 ppm จากนั้นจึงใช้การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันเพื่อลดปริมาณฟอสโฟไลปิดให้น้อยกว่า 20 ppm ซึ่งผลการทดลองพบว่าน้ำมันที่ได้มีคุณภาพที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความหนืดจลน์ และกากคาร์บอน (carbon residue) ซึ่งความหนืดจลน์ลดลงจาก 30.02 cSt ไปเป็น 27.20 cSt ในขณะที่กากคาร์บอนลดลงจาก 7.8% ไปเป็น 4.0%

Marenchino R., Pagliero C., and Mattea M., (2006) ศึกษาการกำจัดฟอสโฟไลปิดหรือการแยกยางเหนียวเพื่อผลิตน้ำมันพืชบริโภค ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โมดูลแบบท่อเมมเบรนอนินทรีย์ที่ทำจาก ZrO₂ เกรดการค้า เพื่อนำมาใช้ทดลองการกรองไหลขวางระดับห้องปฏิบัติการ สารป้อนเป็นสารผสมระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองดิบกับเฮกเซนสัดส่วน 1:3 ช่วงความดัน 1 ถึง 5 บาร์ และช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 50°C ความเร็วใน

การไหล 1 m/s โดยก่อนการทดลองได้มีการปรับสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายต่างเกรดการค้ำ ผลการทดลองพบว่าฟลักซ์เฮกเซนบริสุทธิ์มีค่าลดลงตามเวลาในทุกค่าความดัน ฟลักซ์ของมิสเซลลามีค่าลดลงเช่นกัน และมีผลของความหนืดต่อค่าฟลักซ์โดยฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ สำหรับความสามารถการกำจัดฟอสโฟไลปิดอยู่ในช่วง 92.1-95.3% โดยอุณหภูมิและความดันไม่ค่อยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถการกำจัดนอกจากนี้ยังพบความเกี่ยวข้องระหว่างตัวทำละลายและโครงสร้างเมมเบรนจากค่าฟลักซ์เฮกเซนบริสุทธิ์

Mondal S. and De S., 2010. ศึกษาทฤษฎีกลไกการเกิดฟาล์วสิ่งในการกรองแบบไหลขวางของระบบที่มีการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อกรองแล้วตามด้วยการเกิดเค้ก แบบจำลองแสดงผลในสามกรณีคือ เมื่อการอุดตันในรูพรุนเป็นขั้นตอนควบคุม เมื่อเค้กสะสมเป็นขั้นตอนควบคุม และเมื่อทั้งการอุดตันและสะสมเค้กมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาพบว่าฟลักซ์หรือความเร็วไหลขวางมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญเมื่อการสะสมของเค้กเป็นขั้นตอนควบคุม เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองจริงส่วนใหญ่ พบว่าสอดคล้องกับกลไกจากการควบคุมของเค้ก โดยสภาวะดำเนินงาน ได้แก่ ค่าความเร็วไหลขวางและความดันผ่านเยื่อกรอง (transmembrane pressure) มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอย่างมีนัยสำคัญ

Moura J.M.L.N., Goncalves L.A.G., Petrus J.C.C., Viotto L.A., 2005. ศึกษาการทำดีกัมมิ่งด้วยชุดกรองแบบปิดตาย และใช้เมมเบรนชนิดพอลิอีเทอร์ซัลโฟนแบบแผ่นที่เตรียมเองในห้องปฏิบัติการ สารป้อนเป็นมิสเซลลาระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองและเฮกเซนที่มีปริมาณน้ำมันถั่วเหลือง 25% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิคงที่ 50°C ความเร็วใบกวน 300 รอบต่อนาที ช่วงความดันศึกษา 0.5-5 บาร์ ผลการทดลองการกรองมิสเซลล่ำเป็นเวลา 15 ชั่วโมงพบว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของมิสเซลล่ำมีค่าสูงกว่าฟลักซ์น้ำมันดิบอย่างเดียว ความสามารถในการกำจัดฟอสโฟไลปิดมีค่าสูงสุดที่ 85% และให้ค่าฟลักซ์ 61 L/hr.m² ความสามารถในการกำจัดกรดไขมันอิสระมีค่าค่อนข้างน้อย และพบว่าเมมเบรนพอลิอีเทอร์ซัลโฟนมีความทนทานต่อเฮกเซนได้ในระดับหนึ่งในช่วงเวลาศึกษา 72 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 50°C

Saravanan M., Bhosle B.M., and Subramanian R., 2006. ศึกษาผลของเฮกเซนในมิสเซลล่ำต่อประสิทธิภาพการทำดีกัมมิ่งของมิสเซลล่ำสองชนิดดังนี้ มิสเซลล่ำน้ำมันรำข้าวดิบและมิสเซลล่ำน้ำมันถั่วเหลือง โดยสัดส่วนน้ำมัน:เฮกเซนในมิสเซลล่ำทั้งสองเป็น 1:0 – 1:3 ในชุดการกรองแบบปิดตาย โดยใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ชนิดแผ่นเนื้อแน่นเกรดการค้ำที่มีซิลิโคนเป็นชั้นแอคทีฟ และใช้ PI เป็นชั้นรองรับ ผลการทดลองพบว่าเมมเบรนที่ใช้ให้ค่าการแยกฟอสโฟไลปิดและสีที่ต่ำมาก ในขณะที่ค่าฟลักซ์ยังต้องปรับปรุงให้มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของเฮกเซนเพื่อเจือจางมีผลต่อค่าฟลักซ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเจือจางด้วยเฮกเซน

ไม่มีผลต่อการแยกฟอสโฟไลปิดจากน้ำมันพืชรำข้าวและถั่วเหลือง รวมทั้งปริมาณการใช้เฮกเซนเพื่อแยกแคโรทีนอยด์ใช้ค่าสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 1:2

Souza M.P.d., Petrus J.C.C., Goncalves L.A.G., Viotto L.A., 2008 ศึกษาการทำดีกัมมิงของมิสเซลล่าจากน้ำมันข้าวโพดและเฮกเซนโดยใช้เมมเบรนชนิดเซรามิกอะลูมินาแบบหลายช่อง (multichannel) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย $0.05\ \mu\text{m}$ การทดลองดำเนินงานในช่วงดังนี้ ความดันลดคร่อมเมมเบรน 0.5 และ 1.5 bar ความเร็วตามแนวสัมผัส 1.4 และ 2.4 m/s และร้อยละน้ำมันดิบในมิสเซลล่าโดยน้ำหนักเป็น 25 และ 35 พบว่าความสามารถกำจัดฟอสโฟไลปิดอยู่ในช่วง 65% - 93.5% ค่าฟอสฟอรัสต่ำสุด 23 mg/kg และมีการลดลงของสีและไข การเพิ่มขึ้นของความดันลดคร่อมเมมเบรนและการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันในมิสเซลล่ามีผลที่ดีต่อการเพิ่มความสามารถกำจัดฟอสโฟไลปิด ในขณะที่การเพิ่มความเร็วการไหลทำให้ความสามารถกำจัดฟอสโฟไลปิดลดลง และสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดให้ค่าฟลักซ์ $120\ \text{kg/hr.m}^2$ ณ อุณหภูมิ 40°C

Tres M.V., Mohr S.M., Corazzo M.L., Luccio M.D., and Oliveira J.V., 2009 ศึกษาการใช้เยื่อแผ่นระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันเพื่อสกัดแยกนอร์มัลบิวเทนจากสารผสมของน้ำมันถั่วเหลืองและนอร์มัลบิวเทนในอัตราส่วนเชิงน้ำหนักเป็น 1:1 และ 1:3 ความดันสารป้อน 10-25 bar ความดันผ่านเยื่อกรอง 1-10 bar และ เติระบบการกรองแบบไหลขวาง โดยใช้เยื่อแผ่นระดับอัลตราฟิลเตรชัน 5 ชนิด ดังนี้ พอลิอีเธอร์ซัลโฟน MWCO 5 kDa พอลิเอไมด์/พอลิซัลโฟน MWCO เป็น 1, 2 และ 4 kDa และคอมโพสิตพอลิเอไมด์ MWCO 1 kDa สำหรับเยื่อแผ่นระดับนาโนฟิลเตรชันเป็นชนิดพอลิเอไมด์/พอลิซัลโฟนที่มีความสามารถกักกันเกลือได้ 97% พบว่ากระบวนการเยื่อแผ่นสามารถแยกนอร์มัลบิวเทนได้ การกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันแสดงผลที่ดีกับเยื่อแผ่นสองชนิดคือ เยื่อแผ่นพอลิอีเธอร์ซัลโฟน MWCO 5 kDa เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันถั่วเหลือง:เฮกเซนเป็น 1:3 ได้ฟลักซ์สูงสุดคือ น้ำมันถั่วเหลือง $1022.3\ \text{g/m}^2\text{h}$ และ นอร์มัลเฮกเซน $2,730.4\ \text{g/m}^2\text{h}$ ความสามารถการแยก 66.9% ณ ความดันสารป้อน 25 bar และความดันข้ามเยื่อแผ่น 1 bar และเยื่อแผ่นพอลิเอไมด์/พอลิซัลโฟน MWCO 4 kDa ณ อัตราส่วนของน้ำมันถั่วเหลือง:เฮกเซนเป็น 1:1 พบว่าความสามารถการแยกมีค่าสูงสุด 91.8% ณ ความดันสารป้อน 25 bar และความดันข้ามเยื่อแผ่น 1 bar ในภาพรวมพบว่าความสามารถการแยกอยู่ในช่วง 52.8-99.1% ขึ้นกับสภาวะการทดลอง นอกจากนี้พบว่าเยื่อแผ่นเกิดฟาล์วล้างในทุกสภาวะการทดลองเช่นกัน

Wu J.C.S. และ Lee E.N., (1999) ศึกษาการใช้เยื่อแผ่นระดับอัลตราฟิลเตรชันกับสารผสมระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองและเฮกเซนในสัดส่วนน้ำหนักน้ำมันร้อยละ 33 โดยใช้เยื่อเซรามิกเกรดการค้าในระบบการ

กรองแบบไหลขวางมีขนาดรูกรอง 0.02 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 27 มิลลิเมตร ทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานคือ ความดัน TMP 4 kg/cm² ความเร็วรอบของการกวนเหนือผิวกรองที่ 120 รอบต่อนาที อัตราการป้อนสารป้อนระหว่าง 0.1-40 มิลลิลิตรต่อนาที และค่าสเตจคัท 0.04 โดยความเข้มข้นของน้ำมันในกระแสเพอร์มิเอทมีค่าลดลงจากร้อยละ 33 เป็นร้อยละ 27 ให้ค่าความสามารถกำจัดร้อยละ 20 ความเข้มข้นของเจล 43-53% การกวนผสมที่อยู่ด้านของสารป้อนมีผลทำให้ความหนาเจลลดลง ส่งผลต่อค่าฟลักซ์และความสามารถในการกำจัด ผลการศึกษาแสดงความเป็นไปได้ในการแยกน้ำมันถั่วเหลืองออกจากเฮกเซนโดยใช้เมมเบรนเซรามิกในระดับอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้แยกตัวทำละลายในอุตสาหกรรมอาหาร และค่าเพอมีเอทที่ได้มากขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบการกวนสารป้อนที่ผิวเยื่อแผ่น และยังเป็นการลดปรากฏการณ์ฟาว์ลิงด้วยทั้งนี้คณะผู้วิจัยกล่าวว่าการใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูกรองที่เล็กกว่า 0.02 ไมครอนเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกให้สูงขึ้น

อนุชา พรหมวังขวา และนวลศรี รักอริยะธรรม, 2546 ศึกษาการแยกกัมในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช โดยใช้หลักการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของเครื่องเหวี่ยงแบบดิสก์ และการเพิ่มมูลค่ากัมโดยศึกษาองค์ประกอบในกัม การทดลองการกำจัดกัมใช้กรดฟอสฟอริก 0.06% ปริมาณน้ำ 1% อุณหภูมิ 70°C จะได้ปริมาณตะกอนกัม 1.34 กรัม มีปริมาณฟอสโฟไลปิดในกัม 2.86% และได้ปริมาณน้ำมันคีนมา 94% กัมที่แยกได้ให้ค่าความร้อน 7,072.79 แคลลอรี่ต่อกรัม แต่ไม่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนด้วยวิธีเผาไหม้ได้ เพราะมีปฏิกิริยากับโลหะ ทำให้เกิดผงแข็งเกาะติดโลหะอย่างแน่น ผลการศึกษาด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกแบบดิสก์ไม่สามารถดำเนินงานได้เพราะมีต้นทุนสูงในการปรับปรุงเครื่อง นอกจากนี้ยังสามารถแยกน้ำมันออกจากกัมได้ และได้ไขมันสภาพดี การแยกฟอสโฟไลปิดด้วยกรดฟอสฟอริกมีฟอสโฟไลปิด 0.02-0.13% ในขณะที่การแยกฟอสโฟไลปิดด้วยการตกตะกอนของอะซิโตนได้ฟอสโฟไลปิด 1.07% ส่วนฟอสโฟไลปิดหรือเลซิธินนั้นมีประโยชน์ แต่การแยกน้ำมันออกจากกัมยังไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

วิโรจน์ ยูรวงศ์, พรชัย ศรีไพบุลย์, 2553 ออกแบบและการสร้างระบบกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน และไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางที่สามารถวัดและควบคุมความดัน ความเร็วตามขวางและค่าฟลักซ์ได้ถูกต้องแม่นยำ และได้ทดสอบการใช้งานโดยการศึกษาพฤติกรรมค่าฟลักซ์ ฟาว์ลิง กลไกการเกิดฟาว์ลิง และฟลักซ์วิกฤติโดยใช้น้ำตาลโตนดเป็นสารป้อน เมมเบรนที่ใช้ทำจากเซรามิกมีขนาดรูพรุนและ molecular weight cut-off (MWCO) 0.14 μ m, 50, 150 และ 300 kDa จากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดรูพรุน ความดันขับ และความเร็วตามขวางเพิ่มขึ้น โดยเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 150 นาที มีฟาว์ลิงทั้งชนิดฟาว์ลิงแบบผันกลับได้และฟาว์ลิงที่ผันกลับไม่ได้เกิดขึ้นในระหว่างการกรองอย่างรุนแรง โดยพบว่าความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเนื่องจากฟาว์ลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน

ขับและเมื่อใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลง แต่อย่างไรก็ตามมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วตามขวาง จากการศึกษากลไกการเกิดฟาวลิงพบว่าประมาณ 20-30 นาทีในช่วงแรกของการเกิดฟาวลิง เนื่องจากการอุดตันของขนาดอนุภาคเล็กบนผนังรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งอธิบายค่าฟลักซ์ได้ด้วย standard blocking model (SBM) ตามด้วยการอุดตันของรูพรุนของอนุภาค (intermediate blocking model, IBM) และการเกิดเค้กบนผิวหน้าของเมมเบรน (cake formation model, CFM) โดยที่ขนาดรูพรุนของเมมเบรน ความดัน และความเร็วตามขวางไม่มีผลต่อกลไกและลำดับการเกิดฟาวลิง แต่มีผลต่อค่าคงที่ของแบบจำลองต่างๆ เพื่อที่จะลดหรือกำจัดฟาวลิงโดยเฉพาะฟาวลิงที่เกิดผิวหน้าของเมมเบรน