

บทที่ 2

ทฤษฎีและการสืบค้นข้อมูล

2.1 รำข้าวดิบและน้ำมันรำข้าวดิบ

รำข้าวดิบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ประกอบด้วยโปรตีน 11-15% คาร์โบไฮเดรต 34-62% เส้นใย 7-10% แอช 7-10% และ ไขมัน 15-20% (Juliano and Hicks, 1996) รวมถึงสารอาหารและวิตามินที่สำคัญจำพวก ออโรซานอล วิตามินอี วิตามินเอ เป็นต้น รำข้าวมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลอ่อน การผลิตรำข้าวในประเทศไทยมีไม่ต่ำกว่า 2 ล้านตันต่อปี (กิ่งแก้วและชิษณุชา, 2556) รำข้าวส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการเลี้ยงอาหารสัตว์และเป็นวัตถุดิบการผลิตน้ำมันรำข้าวในครัวเรือน

น้ำมันรำข้าวดิบ คือน้ำมันพืชที่ได้จากการสกัดรำข้าวดิบ โดยน้ำมันรำข้าวประกอบด้วยไขมันซาฟอนนิฟาย 95.6% (รวมไกลโคไลปิดและฟอสโฟไลปิด) และไขมันอันซาฟอนนิฟาย 4.2% (รวมโทโคฟีรอล โทโคไตรอีนอล แกมมาออโรซานอล สเตอรอล และ คาโรทีนอยด์) ส่วนใหญ่ของไขมันซาฟอนนิฟายมักเป็นไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งไตรกลีเซอไรด์สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายมาก และเกิดการดัดไขมันอิสระ (Sayre, 1998; Chen et al., 2008)

แกมมาออโรซานอลเป็นสารอาหารที่พบมากในรำข้าว มีประมาณ 1.5-3% (Hu et al., 1996, Paucar-Menacho et al., 2007) แกมมาออโรซานอลมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น การลดระดับคอเลสเตอรอลและน้ำตาลในเลือด การรวมตัวของเกล็ดเลือด และมีผลที่ดีต่อทางเดินอาหาร (Cheruvansky et al., 2000; Fukushima et al., 1999; Gerhardt and Gallo, 1998; Qureshi et al., 2002; Seetharamaiah et al., 1990; ผดุงขวัญ จิตโรภาส และคณะ, 2004)

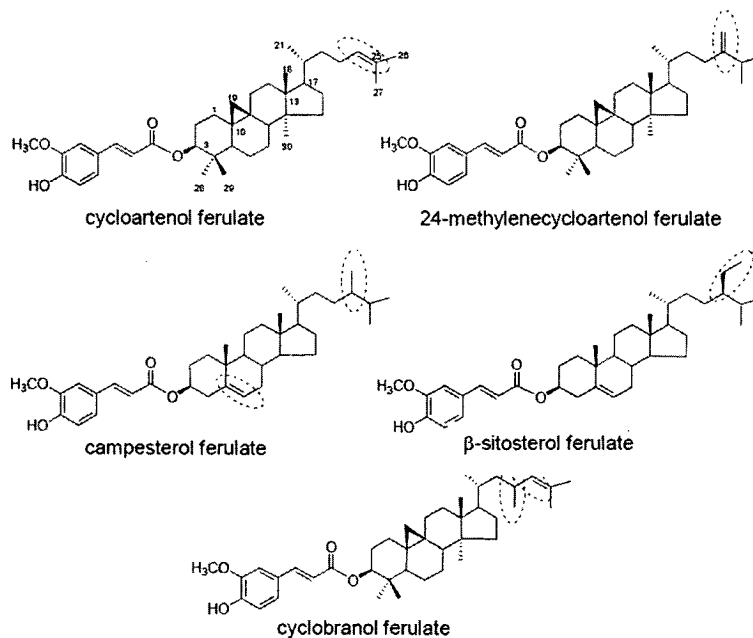
น้ำมันรำข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีทางโภชนาการ เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าวประกอบด้วยสารอาหารสำคัญ เช่น โปรตีน วิตามินบี วิตามินอี วิตามินเค และแกมมาออโรซานอล น้ำมันรำข้าวมีราคาค่อนข้างสูง การบริโภคน้ำมันรำข้าวของคนไทยโดยส่วนใหญ่เป็นการบริโภคภายในครัวเรือน ซึ่งจะเป็นการบริโภคในรูปแบบของการปรุงอาหาร แต่แนวโน้มการใช้ น้ำมันรำข้าวตลอดปี 2554 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และผู้บริโภคกำลังตื่นตัวด้านสุขภาพจึงเป็นโอกาสที่ดีในการพัฒนาคุณภาพของน้ำมันรำข้าวให้มีหลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น อาหารเสริม ยา เป็นต้น น้ำมันรำข้าวบริโภคในแต่ละประเทศมีค่าเกณฑ์มาตรฐานหลากหลาย เช่น โดยทั่วไปมักให้ค่ากรดไม่เกิน (acid value) 0.2

(เทียบเท่ากรดไขมันอิสระ 0.1% wt.) ในขณะที่เกณฑ์ประเทศอินเดีย (the indian regulation) ใช้ค่ากรด 0.5 (เทียบเท่ากรดไขมันอิสระ 0.25% wt.)

กระบวนการสกัดน้ำมันรำข้าวในปัจจุบันสามารถแบ่งคร่าวๆ ได้เป็นสองกระบวนการ โดยกระบวนการแรกเป็นการสกัดแบบเย็น ซึ่งกระบวนการนี้ได้น้ำมันรำข้าวดิบประมาณ 2% โดยน้ำหนัก กระบวนการที่สองเป็นการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งทำละลายที่เลือกใช้ คือ เฮกเซน ที่มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตปริมาณมาก และได้น้ำมันรำข้าวดิบประมาณ 20% โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นกรด และมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นอย่างเหมาะสม

2.2 ออโรซานอล

ออโรซานอลเป็นสารต้านอนุมูลอิสระทางธรรมชาติที่พบมากในรำข้าว โดยโครงสร้างของออโรซานอลมี 5 อนุพันธ์ ดังรูปที่ 2.1 แกมมาออโรซานอลมีน้ำหนักโมเลกุล 602.9 กรัมต่อกรัมโมล และมีจุดหลอมเหลว 127-130 องศาเซลเซียส ออโรซานอลเป็นสารสำคัญมากในน้ำมันรำข้าว ทำให้น้ำมันรำข้าวมีความโดดเด่น คุณสมบัติที่สำคัญของออโรซานอลทำหน้าที่เป็นสารแอนติออกซิแดนท์คล้ายกับวิตามินอีในการลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ออโรซานอลสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าวิตามินอีถึง 6 เท่า จึงนิยมนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของเครื่องสำอางอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้แล้วยังช่วยรักษาอาการผดผื่นของระบบประสาท ในผู้หญิงวัยหมดประจำเดือน ช่วยส่งเสริมการสร้างกล้ามเนื้อนิยมใช้ในหมู่นักกีฬา ออโรซานอลมีประโยชน์หลากหลาย จึงถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบทางด้านอาหาร ทางด้านการแพทย์และทางด้านธุรกิจเสริมความงาม อาจกล่าวได้ว่าการศึกษประโยชน์ของแกมมาออโรซานอลในด้านลดโคเลสเตอรอล และไตรกลีเซอไรด์ในร่างกาย มีส่วนช่วยลดโคเลสเตอรอลชนิดร้ายรวมทั้งไตรกลีเซอไรด์ และช่วยปรับระดับโคเลสเตอรอลชนิดดี นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติด้านการป้องกันโรคหัวใจและโรคร้ายที่เกิดจากหลอดเลือดตีตัน และเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติสูงซึ่งอนุมูลอิสระเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคมะเร็ง รวมทั้งรักษาสมดุลระบบประสาทและสมดุลฮอร์โมนในสตรีวัยทอง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมี และองค์ประกอบที่สำคัญของออไรซานอล (<http://www.oryza.co.jp>)

2.3 เมมเบรนและกระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนเป็นกระบวนการแยกสารผสมที่มีหลายองค์ประกอบ สามารถใช้ได้ทั้งในเฟสของเหลวและแก๊ส ที่สารป้อนประกอบด้วยตัวทำละลายและตัวถูกละลาย โดยกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนเป็นการใช้เมมเบรนหรือเยื่อแผ่นในการแยกสารหรือการเพิ่มความเข้มข้น หรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น สิ่งที่สำคัญของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนคือการต้องอาศัยแรงขับในการทำให้สารที่ต้องการแยกเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่น เช่น ผลต่างของความดัน ผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างศักย์ เป็นต้น แต่ในที่นี้งานวิจัยนี้เน้นเฉพาะผลต่างของความดันในการใช้เป็นแรงขับ

อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการแยกด้วยเมมเบรนสามารถใช้แยกหรือเพิ่มความเข้มข้นของเหลว โดยได้ผลิตภัณฑ์จากการแยกเป็นสองกระแสคือเพอร์มิเอทและรีเทนเททที่มีความเข้มข้นต่างจากความเข้มข้นในสารป้อน กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเป็นกระบวนการทางเลือกที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ยา เทคโนโลยีชีวภาพและอาหาร (Casaamo et al., 2003; Baker, 2004; Jiao et al., 2004; Ravanchi et al., 2009; Aroon et al. 2010; Lau et al., 2012) โดยปัจจัยการเลือกกระบวนการเมมเบรนมักพิจารณาจากตัวแปรดังนี้ การลดลงของพลังงานที่ใช้ การลดลงของขั้นตอนกระบวนการ

ทำให้การแย่งง่ายขึ้น การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการแยก และการเพิ่มขึ้นของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยก (Cheryan 1998; Baker, 2004; ; Aroon et al. 2010; Cuartas-Urbe et al., 2010; Lau et al., 2012)

การนำเยื่อแผ่นไปใช้งานต้องคำนึงถึงความสามารถและคุณภาพของเมมเบรนเป็นหลัก เช่น เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน ณ สภาพการทำงาน มีค่าฟลักซ์และการเลือกผ่านสูง เกิดฟาว์ลิงต่ำและทำความสะอาดได้ง่ายเมื่อเกิดการอุดตัน และราคาของเยื่อแผ่นมีราคาไม่สูง กระบวนการเยื่อแผ่นเมื่อแบ่งโดยการใช้ผลต่างความดันเป็นแรงขับ สามารถแบ่งระดับการแยกเป็น 4 ระดับ คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และ กระบวนการออสโมซิสผันกลับได้ ดังนี้

1) การกรองระดับไมโครหรือไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration; MF)

เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นอยู่ในช่วง 0.2-2 ไมครอน หรือมี Molecular Weight Cut Off (MWCO) > 200 kDa ความดันที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ในช่วงไม่เกิน 2 MPa โดยขนาดอนุภาคที่ต้องการแยกอยู่ในช่วง 0.025-10 ไมครอน กระบวนการ MF มักใช้แยกอนุภาคหรือแบคทีเรียออกจากกลุ่มอนุภาคตัวถูกละลายเล็กๆ อื่น (Baker, 2004; Hua et al., 2007; Salehi, 2014)

2) การกรองระดับอัลตราหรืออัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF)

เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีค่า MWCO ในช่วง 1-300 kDa และขนาดรูพรุนประมาณ 0.01 ไมครอน ความดันที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ในช่วง 2-10 บรรยากาศ ซึ่งกระบวนการนี้มักใช้แยกคอลลอยด์ เช่น โปรตีน ออกจากสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำตาลและเกลือ (Baker, 2004; Salehi, 2014)

3) การกรองระดับนาโนหรือนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration; NF)

ลักษณะกระบวนการ NF อยู่ระหว่างกระบวนการ RO และ UF เป็นที่นิยมใช้ในการทำน้ำอ่อน (water softening) และการบำบัดน้ำเสีย ช่วงขนาดรูพรุนระดับนาโนฟิลเตรชัน 0.5-1 นาโนเมตร ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มข้น หรือแยก หรือทำสารละลายสารอินทรีย์ให้บริสุทธิ์ขึ้น โดยมีช่วงขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็น 100-1000 kDa

ส่วนใหญ่เยื่อเมมเบรนของกระบวนการ NF มักเป็นแบบคอมโพสิตที่อยู่บนตัวรองรับพอลิเมอร์ รูปแบบเยื่อเมมเบรนมีหลากหลาย เช่น แบบแผ่นม้วนหรือสไปรอลวูล (spiral wound) แบบแผ่น แบบท่อ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมมักจะพบเป็นแบบสไปรอล โดยใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิเอไมด์ (polyamide, PA) เป็นชั้นฟิล์มบางของเมมเบรน (Baker, 2004; Salehi, 2014; Hong et al., 2006)

4) กระบวนการออสโมซิสผันกลับได้ (Reverse osmosis; RO)

เมมเบรน RO เป็นกระบวนการแยกที่ให้ค่า MWCO ในช่วง ~ 100 kDa และใช้ความดันดำเนินงานสูงกว่าความดันดำเนินงานของระบบ UF โดยประมาณ 5-10 เท่า โดยทั่วไปความดันดำเนินงานมักอยู่ใน 4-10 MPa และสามารถใช้กับอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 350 Da ซึ่งกระบวนการนี้สามารถกักกันตัวถูกละลายได้เกือบหมด และสามารถนำมาใช้ทำบริสุทธิ์น้ำทะเล (Baker, 2004; Salehi, 2014)

กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเป็นการแยกสารป้อนให้ได้สองกระแสคือ กระแสเพอร์มิเอต (Permeate) เป็นส่วนที่ผ่านเยื่อแผ่น และกระแสรีเทนเตต (Retentate) เป็นส่วนที่ถูกกักกันด้วยเยื่อแผ่น ซึ่งลักษณะการแยกด้วยเยื่อแผ่นมีดังนี้ จากสารละลายป้อนที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่อยู่ร่วมกัน เมื่อเข้าสู่ระบบการแยกสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นโดยอาศัยความดันที่เป็นแรงขับ เรียกว่า เพอร์มิเอต โดยสารที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกกักไว้ด้วยเยื่อแผ่น เรียกว่า รีเทนเตต แต่อย่างไรก็ตามการนำไปใช้ประโยชน์ของเพอร์มิเอตและรีเทนเตตนั้นขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการแยก ลักษณะการแยกสารโดยใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่นโดยการใช้ความดันเป็นแรงขับ และมีเยื่อแผ่นเป็นตัวกลาง โดยเยื่อแผ่นจะกักสารที่มีโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนไว้ โดยแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่น 2 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 การเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแบบปิดตาย (Dead-End) เป็นการป้อนสารที่ทิศทางตั้งฉากกับเยื่อแผ่น ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นเกิดเป็นชั้นเค้ก (Cake) การสะสมของเค้กจะทำให้เกิดความต้านทานการไหลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จึงทำให้การเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนแบบปิดตายควรใช้กับสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีความเข้มข้นต่ำและเหมาะสำหรับการดำเนินงานเป็นแบบกะ

แบบที่ 2 การเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแบบไหลขวาง (Cross Flow) การป้อนสารที่มีทิศทางขนานกับเยื่อแผ่น ซึ่งการเคลื่อนที่ของสารแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ช่วยลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization (CP)) จึงทำให้เกิดการสะสมของเค้กบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแบบปิดตายจะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า จึงเหมาะกับการละลายที่มีความเข้มข้นสูง

ตัวแปรดำเนินการของกระบวนการเมมเบรนที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าฟลักซ์เพอมีเอทได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ ความหนืดและความหนาแน่นของสารป้อน และความเร็วไหลขวาง (Scott, 2013; Salehi, 2014) สำหรับค่าความหนืดสามารถควบคุมได้จากการปรับความเข้มข้นของสารป้อนและอุณหภูมิ (Hwang and Kammermeyer, 1998) การเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนจะมีผลโดยตรงต่อความหนืด ความหนาแน่น และความสามารถการแพร่ของสารป้อน ทำให้ฟลักซ์เพอมีเอทมีค่าลดลง (Satyanarayana et al., 2000) สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืดลดลงและเพิ่มค่าโมบิลิตีในทำนองเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วไหลขวาง จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์เพอมีเอทได้เช่นกัน เพราะมีผลต่อความปั่นป่วนการเคลื่อนที่ (turbulent) ของของไหล ทำให้การสะสมตัวของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าลดลง จึงลดชั้นหนาเจลที่ผิวหน้าเมมเบรน (Cheryan, 1998; Chen and Lin, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราการไหลและส่วนกลับของความหนืดตัวทำละลายของระบบการ NF และ UF แสดงว่ากลไกหลักของการถ่ายโอนมวลคือคอนเวกชัน (Tsui and Cheryan, 2004; Salehi, 2014)

การเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการสะสมของตัวถูกละลาย หรือสารที่ไม่เลกุลขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณที่ห่างออกไป (Bulk Solution) ซึ่งการเกิด CP จะลดสมรรถนะการแยกของเยื่อแผ่นโดยจะเพิ่มความต้านทานการไหลทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง เนื่องจากทำให้เกิดการอุดตัน หรือที่เรียกว่า การเกิดฟอส์ลิง (Fouling) การลดการเกิด CP สามารถทำได้โดยการออกแบบการอุปกรณ์การแยกเป็นแบบไหลขวางที่มีความเร็วสูงจะช่วยให้อนุภาคที่สะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นเกิดการแพร่กลับไปยังบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจากผิวหน้าเยื่อแผ่น

ในส่วนของการเกิดฟอส์ลิง เกิดเนื่องจากการสะสมหรือการอุดตันของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุน ซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงและค่าการแยกมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้แล้ว

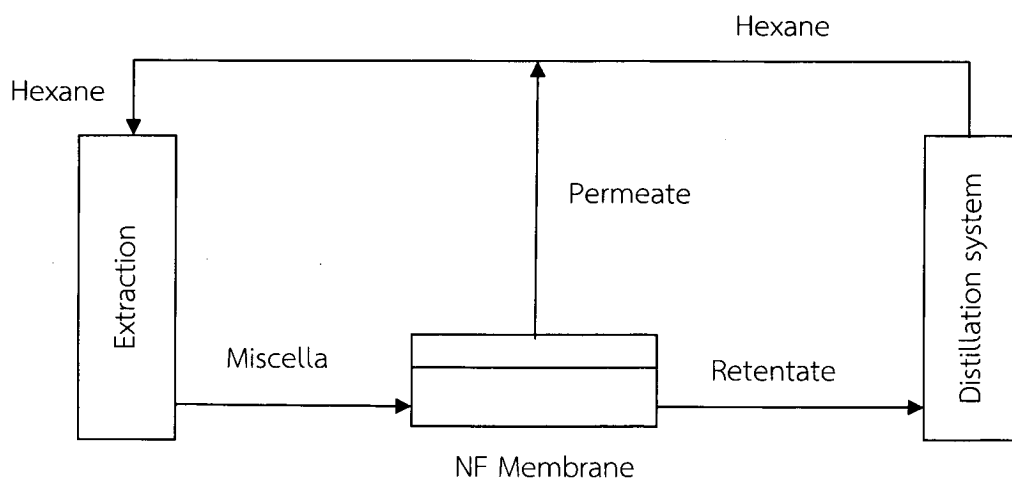
จะเพิ่มการต้านทานการไหลของสารละลาย ซึ่งการเกิดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับลักษณะของเยื่อแผ่นและสารละลายที่ต้องการแยก ซึ่งอนุภาคที่สะสมหรืออุดตันที่เยื่อแผ่นไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่น แต่ต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมี

คุณสมบัติของเยื่อแผ่นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะการแยกของเยื่อแผ่น การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับแรกเพื่อให้เหมาะสมกับสารละลายป้อน ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแยก เพื่อป้องกันการเกิดฟอสฟอรัส โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการเลือกเยื่อแผ่น ได้แก่ ขนาดรูพรุน ลักษณะผิวหน้าเยื่อแผ่น คุณสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ประจุของเยื่อแผ่น เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการแยกสารในเฟสน้ำมัน ดังนั้นเลือกใช้เยื่อแผ่นที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ได้ค่าฟลักซ์สูงและค่าการเลือกผ่านดี นอกจากนี้ขนาดรูพรุนมีผลต่อการแยกและค่าฟลักซ์ ถ้าหากเลือกใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดเล็กและเนื้อแน่น จะทำให้ได้ค่าฟลักซ์ค่อนข้างต่ำและค่าการเลือกผ่านไม่ดี ทั้งนี้ส่งผลต่อการสะสมและการอุดตันของอนุภาคบริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น คุณสมบัติที่สำคัญอีกหนึ่งประการ คือ วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น โดยวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ วัสดุพอลิเมอร์ เช่น polyamide, cellulose esters, polysulfone เป็นต้น วัสดุอนินทรีย์ ได้แก่ เซรามิกส์ แก้ว โลหะ เป็นต้น โดยวัสดุที่นำมาผลิตเยื่อแผ่นมีผลต่อคุณภาพของเยื่อแผ่น

นอกจากนี้รูปแบบของเยื่อแผ่นยังมีผลต่อสมรรถนะการแยกด้วยเช่นกัน สามารถแบ่งรูปแบบของเยื่อแผ่นได้ 4 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นเรียบ แบบท่อม้วน แบบท่อ แบบเส้นใยกลวง การเลือกใช้รูปแบบเยื่อแผ่นต้องคำนึงถึงอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น มีพื้นที่ต่อหน่วยอุปกรณ์สูง และอีกตัวแปรที่สำคัญในการดำเนินการแยกของเยื่อแผ่น ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ ความหนืด ความหนาแน่นของสารป้อน รวมทั้งความเร็วไหลขวางของระบบการแยกแบบไหลขวาง เป็นต้น โดยทั่วไปฟลักซ์เพอร์มิเอตแปรผันตรงกับ ความดัน แต่แปรผกผันกับความหนืด สำหรับอุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงขึ้น เพราะอุณหภูมิสูงมีผลต่อความหนืดและความสามารถในการละลายของสารป้อน แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงก็มีผลต่อการเสื่อมสภาพของสาร เช่น อุตสาหกรรมาที่ว่องไวต่อการเสื่อมสภาพ ณ อุณหภูมิสูง สำหรับความดันมีผลต่อค่าฟลักซ์เช่นกันเนื่องจากกระบวนการดำเนินการใช้ความดันเป็นแรงขับ แต่ความดันที่สูงมาก อาจมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงหรือคงที่ได้เพราะทำให้อนุภาคมีการอัดตัวแน่นขึ้น

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันพืชบริโภคแล้ว เทคโนโลยีเมมเบรนจัดเป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากขึ้นในหลายสิบปีที่ผ่านมา ทั้งนี้เพราะการรีฟائنน้ำมันพืชทั่วไปเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานสูง มีการสูญเสียน้ำมันและกลั่น ใช้สารเคมีหลายชนิด สูญเสียวิตามิน รวมถึงต้องใช้น้ำปริมาณมากในการผลิต ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนจึงถูกเลือกมาใช้เพราะเป็นกระบวนการที่ใช้แยกและทำบริสุทธิ์ได้ และให้ประสิทธิภาพที่น่าพอใจ ใช้พลังงานต่ำ ลดขั้นตอนการผลิต และสามารถเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ รวมทั้งมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า (Subramanian et al., 2001; Baker, 2004; Salehi, 2014)

ในช่วงที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เมมเบรนในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชในหัวข้อดังต่อไปนี้ การเก็บคืนตัวทำละลายจากมิสเซลล่า (สารผสมระหว่างตัวทำละลายและน้ำมันพืช) (Koseoglu et al., 1990; Raman et al., 1996; Ebert and Cuperus, 1999; Wu and Lee, 1999; Geng et al., 2002; Kwiatkowski and Cheryan, 2005; Ribeiro et al., 2006.) รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการเก็บคืนตัวทำละลายที่ได้จากการสกัดน้ำมันพืช



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการใช้ NF ในการเก็บคืนตัวทำละลายจากมิสเซลล่า (Salehi, 2014)

นอกจากการเก็บคืนตัวทำละลายแล้ว งานวิจัยเมมเบรนจำนวนมากยังให้ความสนใจในการทำ ดีกัม (Garcia et al., 2006; Kim et al., 2002; Moura et al., 2005; Koris and Marki, 2006;

Marenchino et al., 2006; Pagliero et al., 2007; Subrahmanyam et al., 2006) การลดกรด การลดสี การลดแวกซ์ด้วยเมมเบรน MF กระบวนการแยกและอีมีลชัน การแยกแอนติออกซิแดนท์ ผลการศึกษาส่วนใหญ่ของการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน NF ให้ผลที่ดี มีความศักยภาพในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานได้จริง สำหรับงานวิจัยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของนิวเทรียนต์มีจำนวนมากขึ้น โดยพบว่า Subramanian et al. 1998 แสดงขั้นตอนการกรองเพียงครั้งเดียวเพื่อกำจัดฟอสฟอไลปิด ลี และแยกผลิตภัณฑ์นิวเทรียนต์ ซึ่งพบว่าปริมาณของโทโคฟีรอลในพอมิเอทมีค่าเพิ่มขึ้น 12-26% ขึ้นกับชนิดของน้ำมันเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโทโคฟีรอลในน้ำมันดิบ งานวิจัยของ Hafidi และคณะ (2005) แสดงประสิทธิภาพและศักยภาพของเทคโนโลยีเมมเบรนในการปรับสภาพน้ำมันมะกอก กระบวนการดำเนิน ณ อุณหภูมิห้อง เป็นต้น

2.4 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy)

การดูดกลืนแสง หรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้นๆ ส่วนใหญ่ได้แก่พวกสารอินทรีย์ (organic compounds) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (complex compounds) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compounds) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้มีความเที่ยงและแม่นยำ และมีสภาพไว (sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลได้

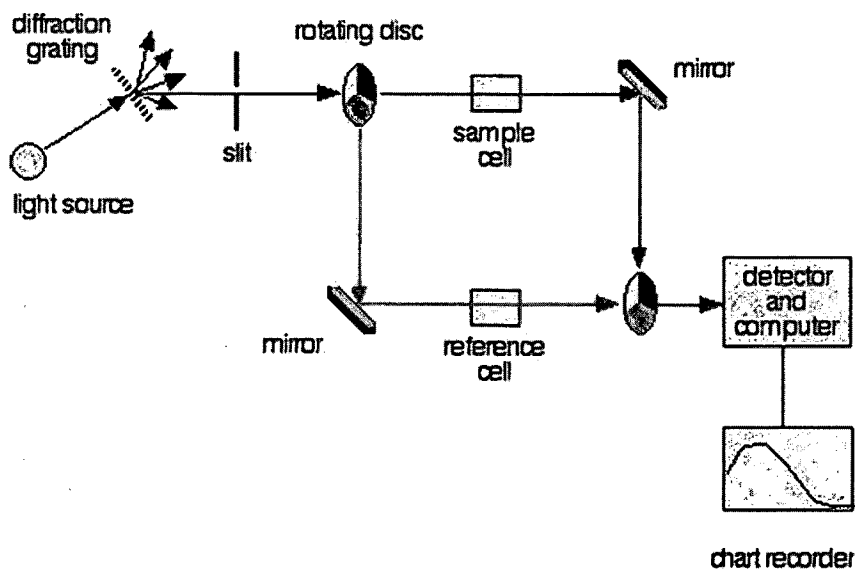
โดยเทคนิคเป็นการเคลื่อนที่ของลำแสงอย่างต่อเนื่องกัน ผ่านเข้าไปในวัตถุใส จะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนเกิดการกระเจิง และบางส่วนผ่านทะลุออกไป ถ้าให้แสงที่ผ่านทะลุออกป้อนผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึม หรือเกรตติง) ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปเรียกว่า absorption spectrum พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี เป็นการวัดการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง ซึ่งการที่ให้ลำแสงผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง แล้ววัดปริมาณของแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างเทียบกับแสงที่ทะลุผ่านออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง เรียกว่า แบลงค์ (blank) ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้อาศัยกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer and Lambert's law) ที่กล่าวไว้ว่า “ค่าแอบซอร์

แบนซ์ของสารละลายจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้น” ดังสมการ และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า
แอมซอร์แบนซ์กับความเข้มข้นจะได้กราฟเป็นเส้นตรง

$$A = \epsilon bc$$

- โดยที่ A คือ แอมซอร์แบนซ์ (absorbance)
 ϵ คือ โมลาร์แอมซอร์ปติวิตี (molar absorptivity)
b คือ ความกว้างของเซลล์ หน่วย เซนติเมตร
c คือ ความเข้มข้น



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (<http://www.mfu.ac.th>)

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับเมมเบรนและพืชน้ำมัน รวมทั้งการเพิ่มความเข้มข้นของนิวเทรียนต์มีอยู่มากมาย แต่ในส่วนนี้จะกล่าวสรุปถึงข้อมูลงานวิจัยโดยย่อของกระบวนการที่เกี่ยวข้องหรือมีความน่าสนใจที่สำคัญและการนำเทคโนโลยีเยื่อแผ่นไปประยุกต์ใช้ ดังนี้

Chen R.C. และคณะ (2008) ศึกษาการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและการลดกรดของน้ำมันรำข้าวในระดับโรงงานนำร่อง สภาวะการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตดังนี้ 300 บาร์ 313 K น้ำหนักรำข้าว 1.03 กิโลกรัม พบว่าให้ยิลด์น้ำมัน 15.7% ประกอบด้วย กรดไขมันอิสระ 3.75% โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 20.5 กิโลกรัม เวลาสกัด 8 ชั่วโมง สำหรับสภาวะการลดกรดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้ ช่วงความดัน 200-300 บาร์ ช่วงอุณหภูมิ 343-363 K และมีอัตราการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 900-2,700 กรัม พบว่าความสามารถในการกำจัดกรดไขมันอิสระ ณ ความดัน 250 บาร์ อุณหภูมิ 353 K น้ำหนักน้ำมัน 13 กรัม มีค่า 97% และมีอัตราการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 2,700 กรัม ผลการศึกษาผลของชนิดตัวแปรต่อความสามารถการกำจัดพบว่า ความดันและอัตราการใช้คาร์บอนไดออกไซด์มีผลอย่างยิ่งต่อการสกัดน้ำมันและการลดกรด

Zullaikah S. และคณะ (2009) ศึกษาการแยกออโรซานอลออกจากน้ำมันรำข้าวดิบโดยใช้กระบวนการตกผลึกแบบสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกนั้น ออโรซานอล โมโนแอซิติกลิเซอรอล กรดไขมันอิสระ สควาลีน วิตามินอี และไฟโตสเตอรอล ถูกทำให้เข้มข้นในเฟสของเหลว ในขณะที่เฟสของแข็งส่วนใหญ่ประกอบด้วยไตรกลีเซอรอล และสเตอรอลอีเธอร์ ส่วนเฟสที่มีออโรซานอลที่เข้มข้นจากขั้นตอนแรกถูกเก็บ ณ อุณหภูมิห้อง 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมเฮกเซนแล้วเก็บ ณ อุณหภูมิ 5±1°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตัวแปรที่มีผลต่อการแยกออโรซานอลจากน้ำมันรำข้าวดิบถูกศึกษาเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม โดยออโรซานอลที่ได้มีความบริสุทธิ์ 93-95% และนำกลับมาได้ 59%

ศศิธร สรรพอคำ (2554) ศึกษาการสกัดแกมมาออโรซานอลและโปรตีนจากรำข้าวและกากรำข้าว ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตสามารถสกัดน้ำมันที่มีแกมมา-ออโรซานอลความเข้มข้นสูงจากรำข้าวและกากรำข้าวได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเข้มข้นสูงถึง 15,000 – 19,000 ppm ในขณะที่การใช้น้ำภาวะกึ่งวิกฤตสามารถสกัดโปรตีนจากรำข้าวได้ถึงร้อยละ

100 อย่างไรก็ตาม การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวของโปรตีนจากรำข้าวภายใต้ภาวะกึ่งวิกฤต พบว่าโปรตีนจะสลายเป็นกรดอะมิโนได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 30 นาที

Jesus และคณะ (2010) ศึกษาการใช้กากจากการกลั่นกรดของน้ำมันข้าว (RFAD-RBOS) ที่ได้จากการอุตสาหกรรมเพื่อแยกแอมมาออไรซานอลออกโดยใช้วิธีการแยกเหนือวิกฤติแล้วเปรียบเทียบกับวิธีการซอกซ์เลต โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกด้วยวิธีเหนือวิกฤติคือความดัน 30 MPa อุณหภูมิ 303 K ให้ค่ายิลด์สูงสุด $39 \pm 1\%$ อัตราการได้แอมมาออไรซานอลคืนสูงสุด 31.3% w/w

Sereewatthanawut และคณะ (2011) ศึกษาการรีไฟน์และการเพิ่มความเข้มข้นของแอมมาออไรซานอลในน้ำมันรำข้าวด้วยเทคโนโลยีเยื่อแผ่นระดับนาโน โดยใช้ชุดกรองแบบไหลขวาง ที่สภาวะความดัน 5-30 บาร์ และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งในกระบวนการแยกประกอบด้วย 1. แยกกลีเซอไรด์จากแอมมาออไรซานอล 2. การกำจัดกรดไขมันอิสระ โดยสามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ ผลการทดลองที่ได้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของแอมมาออไรซานอลจาก 0.95% ของสารป้อนเป็น 4.1% ของน้ำมันผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ $< 0.2\%$ โดยน้ำหนัก พร้อมกับการสูญเสียแอมมาออไรซานอลปริมาณน้อย

Ying Kong และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพการแยกของเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชันชนิดพอลิอิมิดสำหรับการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่จากการกรองน้ำมันหล่อลื่นเพื่อกำจัดไซ ซึ่งเมมเบรนพอลิอิมิดมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 4.5 นาโนเมตร สภาวะที่ใช้ในการทดลอง อุณหภูมิ 18-25 องศาเซลเซียส และมีปั๊มเป็นตัวควบคุมอัตราการไหล และความดัน โดยความดันที่ใช้ในการทดลอง 1.5-4.0 เมกะปาสคาล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่ามากกว่า 12 ลิตรต่อตารางเมตรชั่วโมง และมีความต้านทานการกักกัน 96 ค่าเพอร์มิเทฟลักซ์มีค่ามาก เมื่อความดัน อุณหภูมิ หรืออัตราการไหลของสารป้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น และความดันในการใช้งานมีผลเพียงเล็กน้อยต่อสภาพการกักกันของน้ำมันหล่อลื่น สภาพการกักกันจะเพิ่มขึ้นเร็วมากเมื่อความดันไม่ถึง 2.2 เมกะปาสคาล

Cecilia Pagliero และคณะ (2007) ศึกษาการเกิดฟอสฟอรีนในการกำจัดกัมของน้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง ด้วยเมมเบรน Polyvinylidene fluoride (PVDF) และใช้เฮกเซนเป็นตัว

ทำละลาย เมมเบรนระดับอัตราฟิเตรชันมี MWCO 6000±800 ดาลตัน เป็นชุดกรองแบบปิดตาย สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ความดัน 2 บาร์ และ 6 บาร์ อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า เมมเบรน PVDF สามารถกักกันฟอสโฟไลปิดได้ถึง 95% และสามารถกำจัดกัมของน้ำมัน ดอกทานได้มากกว่าน้ำมันถั่วเหลือง

Tres M.V. และคณะ (2009) ศึกษาการแยกบิวเทนจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้กระบวนการเมมเบรน ที่ช่วง MWCO 1-5 กิโลดาลตัน โดยเตรียมสารป้อนอัตราส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองต่อ นอร์มอลบิวเทน เป็น 1:3 และ 1:1 ความดันที่ใช้ในสายป้อนเป็น 10-20 บาร์ และความดันตกคร่อม 1-10 บาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมมเบรนระดับอัตรา ช่วง MWCO 4 กิโลดาลตัน ที่อัตราส่วนของสารป้อน 1:3 ความดันสารป้อน 20 บาร์ และ ความดันตกคร่อม 10 บาร์ และที่อัตราส่วนของสารป้อน 1:1 ความดันสารป้อน 25 บาร์ และ ความดันตกคร่อม 1 บาร์ และเมมเบรนระดับอัตรา ช่วง MWCO 5 กิโลดาลตัน ที่อัตราส่วนของสารป้อน 1:3 ความดันสารป้อน 25 บาร์ และความดันตกคร่อม 1 บาร์ และที่อัตราส่วนของสารป้อน 1:1 ความดันสารป้อน 10 บาร์ และความดันตกคร่อม 1 บาร์ สามารถแยกนอร์มอลบิวเทนและน้ำมันถั่วเหลืองได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง

Ribeiro A.P.B. และคณะ (2008) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดกัมของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้เยื่อแผ่น ชนิดเซรามิกส์ ที่มีขนาดรูกรอง 0.01 ไมโครเมตร โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ที่สภาวะ ความดัน 1-2 บาร์ และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความดัน 2 บาร์ มีความสามารถในการกำจัดกัมได้ถึง 99.7% และไม่มีการสูญเสียปริมาณโทโคฟีรอลในน้ำมันดิบ

Raman และคณะ (1996) ศึกษาชนิดเมมเบรนชนิดแผ่นจำนวน 6 แบบในกระบวนการกรองระดับนาโนฟิเตรชันในการลดกรดหรือดีซิดของระบบเมทานอล-กรดโอเลอิก, เมทานอล-กรดไขมันอิสระผสม (กรดโอเลอิกและกรดลิโนเลอิก) และเมทานอล-น้ำมันรำข้าวดิบ-กรดไขมันอิสระ พบว่าเมมเบรนให้ค่าความสามารถการกักกันสูงดังนี้ กรดโอเลอิก >90% และสารผสมระหว่างกรดลิโนเลอิกและกรดโอเลอิก >95% นอกจากนี้อัตราการกักกันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นกรดโอเลอิกมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดฟัลลิ่ง

Koseoglu และคณะ (1990) พบว่าการใช้ RO และ UF สามารถเก็บคืนตัวทำละลายจากมิสเซลล่าได้ เมมเบรนต้องมีความทนทานต่อตัวทำละลาย ผลการศึกษาให้ค่าการกักกันสูง นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการประยุกต์ใช้เมมเบรนร่วมกับการกลั่นแบบปกติเพื่อเก็บคืนเฮกเซน

Lilitchan และคณะ (2008) ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแกมมาอโรซานอลในรำข้าวด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้วิธี External Standard Calibration ใช้ความยาวคลื่นที่ 314 นาโนเมตร เนื่องจากในงานนี้เลือกใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และเฮกเซนมีช่วง UV Cut-Off ที่ 190-195 นาโนเมตร พบว่าช่วงเส้นตรงของกราฟของแกมมาอโรซานอล 3-20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร