

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

แหล่งสาโทเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์พื้นบ้านของไทยที่ได้จากการหมักข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์ด้วยราและยีสต์ซึ่งอยู่ในรูปของลูกแป้ง มีระยะเวลาหมักโดยรวมเป็นเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ เอนไซม์จากราจะเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล แล้วยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ ทำให้ได้น้ำสาโทที่มีแอลกอฮอล์เข้มข้นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นแหล่งสาโทจะถูกแยกออกจากส่วนที่เหลือได้น้ำซุ่นขาวซึ่งเป็นเอกลักษณ์พิเศษของแหล่งสาโท (ยุพกนิษฐ, 2543) ซึ่งสีขาวซุ่นนี้เกิดจาก คอลลอยด์ของสตาร์ช เซลลูโลส โปรตีน และจุลินทรีย์ที่หลงเหลือ แต่อนุภาคต่างๆ เหล่านี้อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเน่าบูดขณะอยู่ในภาชนะบรรจุทำให้กลิ่นรสเสียไปหรือเกิดการบวมระเบิดของภาชนะบรรจุอันเนื่องมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น หรือเกิดการจับรวมตัวตกเป็นตะกอนที่ก้นภาชนะบรรจุ ทำให้ลักษณะปรากฏไม่เป็นที่ยอมรับ การทำให้ใสจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าของแหล่งสาโทได้ การทำให้ใส่ที่ง่ายและเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางคือการกรองผ่านผ้ากรองโดยใช้ความดัน ซึ่งเป็นการทำให้สิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียต่าง ๆ ลดลง จะช่วยเก็บสาโทไว้ได้นาน โดยไม่ต้องใส่สารกันเสีย (เดลินิวส์, 2546) แต่ในปัจจุบันยังขาดการนำทฤษฎีการกรองมาประยุกต์ใช้ที่จะนำไปหาข้อมูลพื้นฐานซึ่งสามารถนำไปใช้กับกระบวนการการกรองสาโทในระดับอุตสาหกรรม ข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการเลือกสภาวะการกรอง สารช่วยกรอง หรือชนิดของผ้ากรองที่เหมาะสม ที่จะทำให้ได้อัตราการกรองสูงขึ้น และสาโทมีคุณภาพดีขึ้น

ส่วนกากสาโทซึ่งเป็นลักษณะเป็นของแข็งของแข็ง ซึ่งประกอบด้วยแป้งที่เหลือจากการย่อยเซลลูโลส โปรตีน และยีสต์ ส่วนมากจะถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือ ทำปุ๋ย (<http://board.dserver.org>) ทั้งๆที่ยังมีปริมาณของน้ำแหล่งสาโทเหลืออยู่ในปริมาณมาก วิธีการกดอัดได้น้ำเป็นวิธีที่จะลดการสูญเสียแหล่งสาโทได้ เป็นการเพิ่มรายได้จากปริมาณแหล่งสาโทที่แยกได้เพิ่มขึ้นดังกล่าว โดยที่กากเหล่านี้จะถูกนำไปบีบอัดผ่านผ้ากรอง เพื่อรีดเอาน้ำแหล่งสาโทแยกออกมาจากกากเหล้า แต่ในปัจจุบันปัจจัยต่างๆ เช่น ความดัน ชนิดของตัวกลางกรองที่มีผลต่อคุณสมบัติการกดอัดได้น้ำของสาโทยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ จึงเห็นความจำเป็นที่จะต้องนำองค์ความรู้ของทฤษฎีการกดอัดได้น้ำ มาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพการแยก

น้ำเหล้าสาโทออกจากกากสาเหล้าด้วยวิธีกดอัดไล่น้ำ นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์คุณภาพของเหล้าสาโทที่ได้จากการกรอง และ กดอัดไล่น้ำ เพื่อจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเหล้าสาโทให้ได้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยการกรอง ได้แก่ ความดัน ตัวกลางกรอง (ผ้ากรอง) สารช่วยกรอง ที่มีผลต่อคุณภาพสาโทและมีผลต่อค่าสมบัติเฉพาะของการกรอง ได้แก่ ความต้านจำเพาะของเค้กกรอง (specific cake resistance) ของน้ำเหล้าสาโท
2. เพื่อศึกษาปัจจัยการกดอัดไล่น้ำ ได้แก่ ความดัน ตัวกลางกรอง (ผ้ากรอง) สารช่วยกรอง ที่มีผลต่อคุณภาพสาโทที่ได้ และมีผลต่อค่าสมบัติเฉพาะของการกดอัดไล่น้ำ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การกดอัดไล่น้ำ (modified consolidation coefficient) ของกากสาเหล้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวอย่างเหล้าสาโทที่ใช้ในการทดลองการกรองและการกดอัดไล่น้ำเป็นตัวอย่างเหล้าสาโทที่หมักในระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale) โดยการหมักข้าวเหนียวด้วยลูกแป้งจาก แหล่งทำลูกแป้ง ต.รำพัน อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี
2. ทดสอบสมบัติการกรองและการกดอัดไล่น้ำด้วยอุปกรณ์ทดลองการกรอง และการกดอัดไล่น้ำด้วยความดันคงที่ (constant pressure filtration – expression cell)
3. คุณภาพสาโทที่ศึกษา
 - คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ความใส
 - คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณแอลกอฮอล์ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ปริมาณกรดทั้งหมด และค่าพีเอช
4. ปัจจัยที่แปร
 - ก. การกรอง
 - ความดัน 3 ระดับ
 - ผ้ากรอง 3 ชนิด
 - สารช่วยกรอง 2 ชนิด (ชนิดละ 3 ระดับความเข้มข้น)

ข. การกดอัดไล่น้ำ

- ความดัน 3 ระดับ
- ผ้ากรอง 3 ชนิด
- สารช่วยกรอง 2 ชนิด (ชนิดละ 3 ระดับความเข้มข้น)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทราบถึงผลของปัจจัยการกรองของน้ำเหล้าสาโท ได้แก่ ความดัน ตัวกลางกรอง (ผ้ากรอง) สารช่วยกรอง ที่มีต่ออัตราเร็วการกรอง ค่าสมบัติเฉพาะของการกรอง (ได้แก่ ความต้านจำเพาะของเค้กกรอง (specific cake resistance)) และคุณภาพสาโท
2. ทราบถึงผลของปัจจัยการกดอัดไล่น้ำของกากสาโท ได้แก่ ความดัน ตัวกลางกรอง (ผ้ากรอง) สารช่วยกรองที่มีต่อ ค่าสมบัติเฉพาะของการกดอัดไล่น้ำ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การกดอัดไล่น้ำ (modified consolidation coefficient) และคุณภาพสาโทที่ได้
3. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1. และ 2. ไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแยกน้ำเหล้าสาโทจากกากสาโทในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็กได้ และปรับปรุงคุณภาพเหล้าสาโทให้ดีขึ้น ซึ่งจะยังผลต่อการเพิ่มมูลค่าให้แก่เหล้าสาโทอีกด้วย

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาโท (กรกฤตย์ เขียวชาญไชยรัตน์ และ สิริรัตน์ จงจามรสีทอง, 2548)

สาโทจัดเป็นไวน์ข้าว (rice wine) หรือสุราแช่ชนิดหนึ่ง ซึ่งคำว่าสุราแช่ที่บัญญัติไว้ในพระราชบัญญัติสุรา พ.ศ. 2493 สุราแช่ หมายถึง สุราที่ไม่ได้กลั่น และรวมถึงสุราแช่ที่ได้ผสมกับสุรากลั่นแล้ว โดยมีแรงแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15 ดีกรี (สามิตตสาร, 2493 อ้างถึงในวรรัตน์ โชติวรรณพร, 2539) ดีกรีในที่นี้ หมายถึง หน่วยวัดความเข้มข้นแอลกอฮอล์ในสุราในหน่วยร้อยละโดยปริมาตร (มาตรฐานอุตสาหกรรมสุรา, 2516 อ้างถึงในวรรัตน์ โชติวรรณพร, 2539) สาโทยังจัดเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะขุ่น (miscellaneous alcoholic drink) อันเนื่องมาจากจุลินทรีย์และของแข็งที่เหลืตกค้างซึ่งแตกต่างจากสาเกซึ่งเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะใส (alcoholic beverage) (Yoshizawa, 1985) ถึงแม้ว่าลักษณะขุ่นขาวจะเป็นลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์อย่างหนึ่งของสาโท แต่การทำให้สาโทใสจะช่วยให้ลักษณะปรากฏของสาโทเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากกว่า อีกทั้งยังช่วยลดเศษข้าวและตะกอนซึ่งอาจเป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียขณะบรรจุเก็บในภาชนะ การกรองจึงสามารถช่วยให้เก็บสาโทไว้นาน โดยไม่ต้องใส่สารกันเสีย การกรองที่ใช้ในสาโทมีทั้งที่ใช้การกรองที่อาศัยตัวกลางกรองแต่เพียงอย่างเดียว และหรือการกรองที่อาศัยสารช่วยกรอง เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) (ยุพกนิษฐ์, 2543) สำหรับการกรองแบบเกิดเค้ก อัตราการกรอง ลักษณะเฉพาะ และคุณภาพของสารที่กรองได้ (filtrate) ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความดัน (Sousa and Mateus, 2002, Shimizu et al., 1993, Fillaudeau and Carrere, 2002) ลักษณะเฉพาะของตัวกลางกรอง (Marshall et al., 1993, Person et al., 1993, Jaffrin et al., 1993, Vladislavjevic et al., 2003) สรุปได้ว่าโดยทั่วไปความดันสูงขึ้นอัตราเร็วการกรองจะสูงขึ้น จำนวนอนุภาคที่มีใน feed ที่มากและมีขนาดเล็กจะอุดตัน (fouling) ตัวกลางกรองได้ง่าย ทำให้อัตราการกรองต่ำ สมบัติความชอบน้ำ ขนาดรูพรุนของตัวกลางกรองมีผลต่อทั้งอัตราการกรองและสมบัติของ filtrate เช่น ความขุ่น สี เป็นต้น

2.1.1 กระบวนการหมักสาโท (เดลินิวส์, 2546)

กระบวนการหมักสาโท เริ่มที่การนำข้าวเหนียว ไปนึ่ง นำมาผึ่งให้เย็น แล้วนำไปคลุกกับลูกแป้งที่บดให้เป็นผงแล้วโดยผสมน้ำลงไปเพื่อให้ลูกแป้งเคล้าได้ดี และช่วยให้จุลินทรีย์เจริญได้ เมื่อคลุกแป้งแล้ว จึงนำไปใส่ในโอ่งหรือภาชนะปากกว้าง ทั้งนี้เพื่อให้ข้าวและเชื้อ ได้รับอากาศเพียงพอ โดยใส่ข้าวลงเพียงประมาณ 1 ใน 3 หรือ 1 ใน 4 ของปริมาตรภาชนะ ปิดฝาหลวมๆ เช่น ผ้าพลาสติก หรือเอาไม้ปิดไว้ และหมักไว้ 3 วัน

เมื่อเวลาการหมักผ่านไปประมาณ 3 วัน เชื้อราจากลูกแป้งจะเจริญ และย่อยแป้งให้กลายเป็นน้ำตาล และเกิดน้ำซึมออกมา เรียกว่า “น้ำต้อย” จากนั้นจะเติมน้ำลงไปเพื่อละลายน้ำตาลที่เกิดขึ้น และสร้างสภาพที่ไม่มีอากาศ ซึ่งเหมาะสมกับยีสต์ และยีสต์ที่อยู่ในลูกแป้งก็จะหมักน้ำตาลให้กลายเป็นแอลกอฮอล์และกลั่นรสต่างๆ ต่อไป การเติมน้ำนี้เรียกว่า การ “ผ่านน้ำ” โดยปกติจะเติมเฉพาะน้ำ แต่บางรายอาจเติมน้ำตาลลงไปด้วย เพื่อเร่งการหมักแอลกอฮอล์ให้ได้ดีขึ้น เมื่อผ่านน้ำแล้ว จึงปิดฝาหมักต่อไปในภาชนะเดิม จนกว่าจะได้ความแรงแอลกอฮอล์ตามต้องการ โดยทั่วไปใช้เวลา 1 – 2 สัปดาห์ หรืออาจหมักถึง 1 เดือน แล้วจึงนำไปบรรจุขวดจำหน่าย

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของสาโท (ยุพกนิษฐ์ พวงวีระกุล, 2543)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของสาโท มี 3 ปัจจัย คือ

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสาโท เช่น สายพันธุ์ข้าว ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ (ลูกแป้ง) น้ำ เป็นต้น
2. การควบคุมกระบวนการผลิตสาโท เช่น การควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการหมักสาโทให้เหมาะสม การควบคุมภาวะปลอดเชื้อ เป็นต้น
3. ปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต ปรับปรุงวิธีการและภาชนะที่ใช้บรรจุ ปรับปรุงรสชาติ กลิ่น ความชุ่มชื้น เช่น การกรอง เป็นต้น

2.1.3 ลูกแป้ง (เจริญ เจริญชัย, www.surathai.net)

ในการผลิตสาโท หรือแม้แต่ในการผลิตสุรากลั่นก็ตาม จะต้องใช้ลูกแป้งนำไปผสมเข้ากับข้าวเหนียวนึ่งสุก เพื่อให้มีกระบวนการหมักสาโทเกิดขึ้น การที่จะได้สาโทที่มีคุณภาพดี เช่น แอลกอฮอล์

สูง หรือปราศจากรสเปรี้ยว ก็ขึ้นอยู่กับลูกแป้งเป็นสำคัญ การทำลูกแป้งโดยทั่วๆ ไป เริ่มจากนำแป้งข้าวเจ้ามาผสมกับสมุนไพรตามสูตรของแต่ละท้องถิ่นที่และผสมกับลูกแป้งชุดเก่า หรือนำผงลูกแป้งชุดเก่ามาโรยลงบนก้อนลูกแป้งที่ปั้นใหม่ เพื่อเป็นการต่อเชื้อ บ่มลูกแป้งที่ได้ไว้จนเชื้อขึ้นฟูดีแล้ว ก็นำไปตากให้แห้ง ใช้เป็นลูกแป้งต่อไป โดยทั่วไปลูกแป้งจะมีสูตรสมุนไพรตั้งแต่ 5-6 ชนิด ไปจนเป็นสิบๆ ชนิด สมุนไพรต่างๆ ที่ใช้มีหน้าที่ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนที่ไม่ต้องการ โดยเฉพาะเชื้อราชนิดที่สร้างสารพิษ แต่สมุนไพรดังกล่าวจะไม่ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและยีสต์ที่ใช้ในการหมักข้าวเหนียวให้เป็นแอลกอฮอล์และสร้างกลิ่นรสของสาโท มีการศึกษาของนักวิชาการหลายท่านได้ทำไว้ประมาณ 20 ปีมาแล้วยืนยันในเรื่องนี้ สมุนไพรที่มีฤทธิ์ดังกล่าว ได้แก่ ขิง ข่า ชะเอม พริกไทย กระเทียม ดีปลี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สมุนไพรเหล่านี้ไม่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นเชื้อสร้างกรดน้ำส้มสายชู ที่ทำให้สาโทมีรสเปรี้ยว ดังนั้นลูกแป้งบางแหล่งที่เตรียมไม่ดี จะมีเชื้อน้ำส้มสายชูปนเปื้อนมา ทำให้ได้สาโทที่มีคุณภาพไม่ดี

ตัวอย่างสูตรลูกแป้ง

แป้งข้าวเจ้า 400 กรัม

กระเทียม 6 กรัม

ขิง 6 กรัม

ข่า 6 กรัม

ชะเอม 6 กรัม

พริกไทย 6 กรัม

ดีปลี 2 กรัม

และใช้ลูกแป้งชุดก่อนมาผสมกับแป้งใหม่ ในอัตราส่วน 5 กรัมต่อแป้งที่จะปั้น 1 กิโลกรัม หรืออาจจะนำผงลูกแป้งชุดก่อนมาโรยลงบนผิวหน้าของลูกแป้งใหม่ซ้ำอีกก็ได้

2.2 การกรอง

การกรอง (filtration) เป็นการแยกอนุภาคซึ่งเป็นของแข็งที่ปนอยู่กับสารละลายใดๆ ที่ไม่ต้องการออก โดยให้สารละลายผ่านตัวกลางที่ใช้ในการกรอง ซึ่งอาจจะเป็นผ้ากรอง เยื่อกรอง (ชรินทร์ รุ่งเรืองศิลป์, 2533., Shirato et al, 1986) โดยการกรองนี้อาจจะใช้วิธีการกรองด้วยความดันคงที่ หรือกรองด้วยอัตราการไหลคงที่ก็ได้ อัตราเร็วของปริมาตรที่ได้จากกระบวนการกรองขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักดังต่อไปนี้ (Max and Klaus, 1981)

a) ความดันลดผ่านเค้กกรองและตัวกลางกรอง (ในงานวิจัยนี้คือ ผ้ากรอง)

- b) พื้นที่การกรอง
- c) ความหนืดของของเหลวในการกรอง (filtrate)
- d) ความต้านทานของเค้กกรอง
- e) ความต้านทานของตัวกลางกรอง

ซึ่งอัตราเร็วของการกรองเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่และความดันที่ให้อัตราเร็วในการกรองและ
เป็นสัดส่วนผกผันกับปัจจัยที่เหลือสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$q \equiv \frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{dv}{d\theta} = \frac{P}{\mu(R_c + R_m)} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- q = อัตราเร็วการกรอง (เมตรต่อวินาที)
- V = ปริมาตรของของเหลวที่กรองได้ (filtrate) (ลูกบาศก์เมตร)
- A = พื้นที่การกรอง (ตารางเมตร)
- v = ปริมาตรของของเหลวที่กรองได้ (filtrate) ต่อพื้นที่การกรอง
(ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร)
- P = ความดันลดผ่านตัวกลางกรอง (ผ้ากรอง) (ปาสคาล)
- R_c = ความต้านทานของเค้กกรอง (เมตร⁻¹)
- R_m = ความต้านทานของตัวกลางกรอง (ผ้ากรอง) (เมตร⁻¹)
- μ = ความหนืดของสารที่ได้ (filtrate) (ปาสคาล วินาที)
- θ = เวลาในการกรอง (วินาที)

เมื่อพื้นที่ในการกรองคงที่และถ้าสามารถอนุมานให้ R_c เป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักของของแข็ง
ที่ก่อตัวเป็นเค้กกรองได้

$$\text{ดังนั้น} \quad R_c = \alpha_{av} w \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

โดยที่ w คือ น้ำหนักของของแข็งที่ก่อตัวเป็นเค้กต่อพื้นที่การกรอง (W/A) และถ้าให้ w_m คือ
น้ำหนักของแข็งสมมุติที่เมื่อก่อตัวเป็นเค้กแล้วจะทำให้มีค่าความต้านทานเทียบเท่าแผ่นกรองจะ

$$\text{ได้} \quad R_m = \alpha_{av} w_m \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.1 จะได้

$$q = \frac{P}{\mu \alpha_{av} (w + w_m)} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

และเมื่อพิจารณาสมดุลมวลของการกรองสเลอรี่ (slurry) ใดๆที่มีความเข้มข้น S (กิโลกรัมของแข็งต่อกิโลกรัมสเลอรี่) โดยเมื่อกรองแล้วได้เค้กเปียกที่มีน้ำหนักของแข็งภายในเค้กเปียกเท่ากับ W และได้ปริมาตร filtrate เท่ากับ V ถ้าเค้กเปียกที่ได้ มีค่าความชื้นในรูป น้ำหนักเค้กเปียกต่อเค้กแห้งเท่ากับ m จะได้

สมดุลมวลสาร

น้ำหนัก slurry ทั้งหมด = น้ำหนักเค้กกรองเปียก + น้ำหนัก filtrate

$$W/S = mW + \rho V \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

ในที่นี้ ρ = ความหนาแน่นของ filtrate (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$W = \left(\frac{\rho s}{1-ms} \right) V \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

หารด้วยพื้นที่ในการกรองจะได้

$$w = \left(\frac{\rho s}{1-ms} \right) v \quad \text{และ} \quad w_m = \left(\frac{\rho s}{1-ms} \right) v_m \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\therefore \frac{dv}{d\theta} = \frac{\Delta P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av} (v+v_m)} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ดังนั้น

$$(v+v_m)dv = \frac{\Delta P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av}} d\theta$$

$$\int_{-v_m}^v (v+v_m)dv = \int_{-\theta_m}^{\theta} \frac{\Delta P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av}} d\theta$$

$$(v+v_m)^2 = \frac{2\Delta P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av}} (\theta - \theta_m)$$

เมื่อให้ $K_v = \frac{\Delta P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av}}$ และ ทำการ Differentiate ค่า θ จะได้

$$2(v+v_m) \frac{dv}{d\theta} = K_v$$

$$\therefore \frac{d\theta}{dv} = \frac{2}{K_v}(v + v_m)$$

ดังนั้นการกรองแบบเกิดเค้กที่อัตราการกรองแบบเกิดเค้กด้วยความดันคงที่ จึงสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Ruth, 1935 อ้างถึงใน Shirato et al, 1986)

$$\frac{d\theta}{dv} = \frac{1}{q} = \frac{2}{K_v}(v + v_m) \dots\dots\dots (2.9)$$

v_m	=	ปริมาตร filtrate สมมุติที่ให้ความต้านทานเทียบเท่าตัวสารกรองต่อพื้นที่การกรอง (ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร)
K_v	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกรอง ด้วยความดันคงที่ของ Ruth (ตารางเมตรต่อวินาที)
	$\equiv$	$\frac{2P(1-ms)}{\mu\alpha_{av}\rho s}$
m	=	สัดส่วนระหว่างน้ำหนักเค้กเปียกต่อเค้กแห้ง (กิโลกรัมเค้กเปียกต่อกิโลกรัมเค้กแห้ง)
S	=	ความเข้มข้นของสเลอรี (กิโลกรัมของแข็งต่อกิโลกรัมสเลอรี)
ρ	=	ความหนาแน่นของ filtrate (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
α_{av}	=	ค่าความต้านทานจำเพาะของเค้กกรอง (specific cake resistance) (เมตรต่อกิโลกรัม)

ดังนั้นจากข้อมูลของอัตราเร็วการกรอง (q) กับปริมาตร filtrate (v) ที่เปลี่ยนแปลงไปที่สภาวะการกรองต่างๆ นำมาพล็อต 1/q กับ v จะสามารถหาค่า specific cake resistance ได้จาก slope ของกราฟ ซึ่งค่า specific cake resistance นี้เป็นค่าที่ใช้แสดงสมบัติความต้านทานของเค้กกรอง

2.2.1 สารช่วยกรอง (Thomas E. Sulpizio., 1999)

สารช่วยกรองหมายถึงสารที่ใช้ในการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการกรอง ช่วยให้การไหลผ่านของของเหลวผ่านรูพรุนของตัวกลางกรองเกิดได้ง่ายขึ้น และทำให้ลักษณะทางกายภาพของ filtrate ดีขึ้น (เช่น ความใส) โดยสารช่วยกรองช่วยลดการอุดตันของอนุภาคของแข็งในตัวกลางกรอง โดยทั่วไปแล้วเติมลงในของเหลวที่จะใช้กรองทั้งในลักษณะผสมกัน (body feed)

และเคลือบก่อน (precoat) ที่ผิวหน้าของตัวกลางกรอง เพื่อให้ได้กรองที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของตัวกลางกรองมีลักษณะร่วนโปร่งทำให้การไหลผ่านของของเหลวเกิดได้ดีขึ้น หรือช่วยดูดซับอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่เป็นสาเหตุของการอุดตันไว้กับตัวสารช่วยกรองเอง ซึ่งสารช่วยกรองที่ดีมักมีคุณสมบัติ ความหนาแน่นต่ำ (low bulk density), การดูดซับสูง (high absorption) และมีรูพรุนมาก (high porosity)

ชนิดของสารช่วยกรองในกระบวนการแยกของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid separation) มักแยกเป็นสองกลุ่มคือ

a) inorganic mineral powders เช่น diatomite และ perlite เป็นต้น

b) organic fibrous materials เช่น cellulose และ cotton linter เป็นต้น

Diatomite ทำมาจาก diatomaceous earth ที่เกิดจากเปลือกของไดอะตอม (diatom) ที่ตายทับถมกันเป็นเวลานาน มีโครงสร้างสลับซับซ้อน มีความเป็นรูพรุนสูง ส่วนประกอบหลักของ diatomite เป็นซิลิกา นอกจากนั้นจะเป็น อลูมินา ออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของโลหะ (ลักษณะโครงสร้างจากกล้อง Scanning Electron Micrographs ดังภาพที่ 2.1) diatomite มีหลายเกรด ขึ้นกับกระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการให้ความร้อน เช่น การอบแห้ง, การเผา (calcine) การบดและการคัดขนาด

Perlite เป็นสารที่ผลิตได้จากการนำแร่ในธรรมชาติซึ่งเกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนแล้วเกิดการขยายตัว เป็นสารประกอบของซิลิเคียม โพแทสเซียม อลูมินัม ซิลิเกต มีลักษณะเป็นแผ่น โครงสร้างไม่ซับซ้อนเท่า diatomite และความหนาแน่นต่ำกว่า เหมาะกับการแยกอนุภาคหยาบๆขนาดเล็ก (ลักษณะโครงสร้างจากกล้อง Scanning Electron Micrographs ดังภาพที่ 2.1)

Cellulose และสารช่วยกรองอินทรีย์อื่นๆ เป็นสารพวกซัลไฟด์หรือซัลเฟตที่พบมากในไม้เนื้อแข็ง มีสัดส่วนของความยาวต่อความกว้างสูง (aspect ratio) มักใช้ร่วมกับ diatomite แต่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเท่า diatomite สามารถใช้ในงานที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 10 และเนื่องจาก cellulose เป็นสารที่เผาไหม้ได้ดังนั้นจึงง่ายต่อการกำจัดหลังใช้งาน หรือ เมื่อนำไปใช้กับการกรองสารที่มีสมบัติไม่เผาไหม้ (เช่นอนุภาคโลหะ) ก็จะสามารถจัดเก็บสารดังกล่าวได้อย่างสะดวก (ลักษณะโครงสร้างจากกล้อง Scanning Electron Micrographs ดังภาพที่ 2.1)

สารช่วยกรองอินทรีย์อื่นๆ เช่น cotton linter, อนุภาคแป้งมันฝรั่ง เส้นใยและแผ่นโพลิเมอร์ (polymeric fibers and flakes) สามารถใช้ร่วมกับ diatomite เพื่อช่วยให้ diatomite มีการ

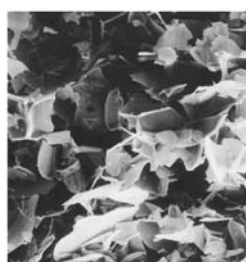
กระจายตัวได้ดีขึ้น และนอกจากนี้ถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ต่างๆ สามารถนำมาเป็นสารช่วยกรองในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากมีปริมาณของซิลิกาและคาร์บอนสูง

ภาพที่ 2.1

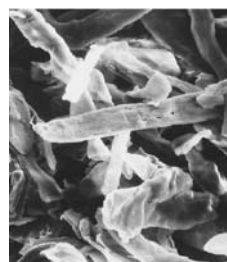
โครงสร้างของสารช่วยกรองเมื่อส่องด้วยกล้อง Scanning Electron Micrographs



Diatomite



Perlite

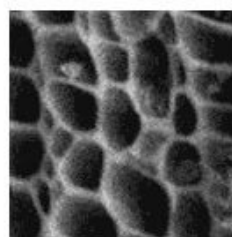
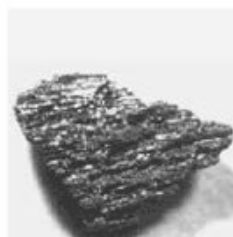


Cellulose

นอกจากนี้ยังมี Activated carbon หรือถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นธาตุคาร์บอนบริสุทธิ์ ในโครงสร้างแบบอสัณฐานรูป (amorphous) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมแตกต่างจากรูปแบบอื่นๆ เช่น เพชร หรือกราไฟต์ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี (ดังภาพที่ 2.2) แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ชนิดผงละเอียด และชนิดเม็ดหรือเกล็ด โดยชนิดผงละเอียดสามารถกระจายในน้ำได้ดีจึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น ใช้ฟอกสีและดูดกลิ่นในอุตสาหกรรมน้ำตาล การผลิตน้ำมันพืช อุตสาหกรรมอาหาร และการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ส่วนชนิดเม็ดหรือเกล็ด ใช้ในอุตสาหกรรมการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น เครื่องกรองอากาศ เครื่องกันก๊าซพิษ กันกรองบุหรี่ เป็นต้น (lib3.dww.go.th)

ภาพที่ 2.2

แสดงโครงสร้างของ Activated carbon ที่ขนาดต่างๆ (www.kef.com)



2.2.2 ตัวกลางกรองของการกรองแบบเกิดเค้กและการหาค่าความต้านทานตัวกลางกรอง

ตัวกลางกรอง คือสิ่งที่ดูดซับเอาสิ่งที่ต้องการกรองเอาไว้ที่ผิวของวัสดุเองหรือระหว่างช่องว่างของวัสดุกรอง เช่น กระดาษกรองและทราย ตัวกลางกรองนับว่าเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการกรอง ประสิทธิภาพของกระบวนการจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับตัวกลางกรองที่เลือกใช้ โดยมักพิจารณาถึงวัสดุที่นำมาผลิตเป็นตัวกลางกรอง พื้นที่ผิวสัมผัส ความเป็นรูพรุน เป็นต้น (Kim et al., 2002) ในการกรองแบบเกิดเค้กโดยสมบูรณ์อย่างอุดมคติ อนุภาคจะถูกดักจับอยู่บนผิวหน้าตัวกลางกรองเท่านั้น แต่โดยปกติแล้วจะมีอนุภาคขนาดเล็กถูกดักจับอยู่ภายในรูพรุนของตัวกลางกรองอยู่เสมอ ดังนั้นเมื่อมีการใช้ผ้ากรองซ้ำ ถึงแม้จะมีการล้างเอาเค้กกรองออกก็ตามแต่ ความต้านทานของตัวกลางกรองจะสูงกว่าตัวกลางกรองใหม่ (เนื่องจากการอุดตันของอนุภาคภายในรูพรุนผ้ากรองที่ไม่สามารถล้างออกได้) ดังนั้นค่าความต้านทานของตัวกลางกรองที่ใช้ซ้ำสามารถหาได้จากสมการ 2.1 ที่ดัดแปลงเป็นดังนี้

$$q = \frac{P}{\mu(R_c + R'_m)} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

$$R'_m = R_m + R_p \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{q} = \frac{\mu}{P}(R_c + R_m + R_p) \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ	R'_m	ความต้านทานของผ้ากรองหลังผ่านการใช้งาน (เมตร ⁻¹)
	R_m	ความต้านทานของผ้ากรองใหม่ (เมตร ⁻¹)
	R_p	ความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันภายในรูพรุนของผ้ากรอง (เมตร ⁻¹)
	R_c	ความต้านทานที่เกิดจากเค้กบนผิวหน้าของผ้ากรอง (เมตร ⁻¹)

ดังนั้น เมื่อกรองน้ำบริสุทธิ์ผ่านผ้ากรองก่อนใช้งานและผ้ากรองที่ได้รับการทำความสะอาดหลังใช้งานจะได้

$$\frac{1}{q_i} = \frac{\mu}{P}(R_m) \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\frac{1}{q_{wash}} = \frac{\mu}{P}(R'_m) = \frac{\mu}{P}(R_m + R_p) \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

q_i	อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวกลางกรองใหม่ (ผ้ากรอง) (เมตรต่อวินาที)
q_w	อัตราการไหลของน้ำหลังผ่านการกรองและจากการล้างด้วย ฟองน้ำ (เมตรต่อวินาที)

จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 จะสามารถหาค่าความต้านทานของตัวกลางกรองที่เปลี่ยนแปลงไปหลังใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้ผ้ากรองที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกรองได้

2.3.การกดอัดไล่น้ำ (Shirato et al., 1986)

กระบวนการกดอัดไล่น้ำ (expression) เป็นกระบวนการที่ของเหลวไหลผ่านผนังห้องกรองที่กักเก็บสารผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของผนังห้องกรองกดอัดสารผสม เมื่อน้ำของแข็ง-ของเหลวในรูป slurry บรรจุในอุปกรณ์กดอัดไล่น้ำแล้วให้ความดัน slurry ดังกล่าวจะถูกกรองเกิดเป็นเค้กกรองขึ้นภายในห้องกรอง ในช่วงนี้เรียกว่าช่วงการกรอง ภายในเค้กกรองจะมี moisture distribution ขึ้น โดยที่เค้กกรองที่ใกล้ห้องกรองจะมี moisture content ต่ำสุด ในขณะที่ตรงผิวหน้าของเค้กกรองจะมี moisture content สูงสุด เมื่อเค้กกรองเกิดขึ้นเต็มห้องกรอง (กดอัดไล่น้ำอย่างต่อเนื่อง) เค้กกรองจะได้รับแรงกดอัดจากผนังห้องกรอง ไล่น้ำออกจากเค้กกรอง ในขั้นตอนนี้เรียกว่า consolidation period ในช่วงนี้เมื่อปริมาณน้ำกรองไหลผ่านผนังห้องกรอง (ผ้ากรอง) เพิ่มขึ้น hydraulic pressure; P_L จะลดลง แรงกดอัดที่ผนังกระทำต่อเค้กกรอง จะถูกอนุภาคของแข็งภายในเค้กกรองแบ่งรับแรงดังกล่าวไว้ จึงทำให้ solid compressive pressure; P_S (แรงที่โครงสร้างของอนุภาคของแข็งถูกกระทำต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดขวาง) มีค่าสูงขึ้น

สมดุลแรง

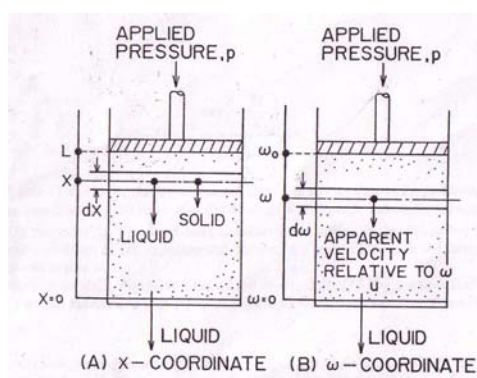
$$\frac{\partial P_L}{\partial \omega} + \frac{\partial P_S}{\partial \omega} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

ω คือ coordinate แสดงตำแหน่งภายในของผสม เป็นค่าแสดงปริมาตรของแข็งที่มีอยู่ภายในระหว่างระนาบใด ๆ กับผนังห้องกรอง (ผ้ากรอง) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดดังภาพที่ 2.3 (Shirato et al., 1986)

ภาพที่ 2.3

แสดงพฤติกรรมของการกดอัดไล่น้ำในพิกัด ω (B ซ้าย)

เปรียบเทียบกับพิกัด x (A ขวา) (Shirato et al., 1986)



ω - coordinate เป็น moving coordinate เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่ความหนาของวัตถุมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา เช่น กระบวนการกดอัดไล่น้ำ จากสมการที่ 2.15 เมื่อ integrate จะได้

$$P_L + P_S = P \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

P คือความดันในการกดอัดไล่น้ำที่ผนังห้องกรองมีต่อสารผสม จากสมการที่ 2.16 จะเห็นว่าในหน้าตัดขวางใดๆของห้องกรองซึ่งเป็นระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของของไหล (filtrate) ผลรวมของ P_L และ P_S จะเท่ากัน ที่ตำแหน่งเหนือหน้าแผ่นกรอง P_L จะเท่ากับศูนย์ เมื่อเข้าสู่ consolidation period ของเหลวจะถูกบีบอัดไหลออกผ่านผ้ากรองอย่างต่อเนื่อง ตำแหน่งที่ $P_L = 0$ จะขยายตัวขึ้น ห่างจากผ้ากรองไปเรื่อยๆ ค่า P_S ก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ แค้กรองจึงแน่นขึ้นเรื่อยๆ เช่นกันจนกระทั่งถึงความหนาของแค้ค่า $P_S = P$ การกดอัดไล่น้ำจึงยุติ

เมื่อกดอัดไล่น้ำด้วยความดันคงที่ P จนได้ความหนาแค้ สูงท้าย L_∞ ความหนาดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$L_\infty = (1+e) \omega_0 \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

ในที่นี้ e คือ void ratio เป็นค่าสัดส่วนระหว่างช่องว่างภายในแค้ต่อปริมาตรของแข็งที่อยู่ ในแค้ และ ω_0 คือ ปริมาตรของแข็งทั้งหมดที่บรรจุในห้องกรองต่อ 1 หน่วยพื้นที่หน้าตัดขวาง

2.3.1 ช่วงการกรอง (filtration period)

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{dv}{d\theta} = \frac{\Delta P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av} (v + v_m)} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{d(L-L_0)}{d\theta} = \frac{i^2 P(1-ms)}{\mu \rho s \alpha_{av} (L_0 - L + L_m)} \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

i	คือ	จำนวนด้านตัวกลางกรอง
L_0	คือ	ความสูงเริ่มต้นของของผสมในห้องกรอง
L_m	คือ	ความสูงสมมติของห้องกรองที่ให้ความต้านทานเทียบเท่าแผ่นกรอง
ถ้าให้ L_1	คือ	ความสูงสุดท้ายของช่วงการเกิดการกรอง

จากสมมูลมวล ซึ่ง

$$\text{น้ำหนักของ filtrate} = \text{น้ำหนัก slurry} - \text{น้ำหนักแค้เปียก}$$

$$(L - L_0) = \frac{1 - ms}{\rho_s} \rho_s \omega_0 \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\rho(L - L_0) = \frac{\rho_s \omega_0}{S} - m \rho_s \omega_0 \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง

2.3.2 ช่วงการกดอัดไล่น้ำ (consolidation period)

จาก Darcy's law ค่าความเร็วปรากฏ u ของ filtrate ที่ไหลผ่านตำแหน่งใดๆในเค้กกรองจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$u = \frac{1}{\mu \alpha \rho_s} \frac{\partial P_L}{\partial \omega} = -\frac{1}{\mu \alpha \rho_s} \frac{\partial P_s}{\partial \omega} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

เมื่อพิจารณาชั้นแคบๆใดๆในเค้ก จะได้สมมูลมวลดังนี้

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_c} = \frac{\partial u}{\partial \omega} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

ดังนั้นจะได้ consolidation equation ดังนี้

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_c} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(-\frac{1}{\mu \alpha \rho_s} \frac{\partial P_s}{\partial \omega} \right) \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

เมื่อ θ_c คือ เวลาในการกดอัดไล่น้ำ

ถ้าให้ modified consolidation coefficient C_e มีนิยามเป็น

$$C_e \equiv \frac{1}{\mu \alpha \rho_s (-de/dP_s)}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_c} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(C_e \frac{\partial e}{\partial \omega} \right) \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

หรือ

$$\frac{\partial P_s}{\partial \theta_c} = C_e \left\{ \frac{\partial^2 P_s}{\partial \omega^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dP_s} \left(\frac{\partial P_s}{\partial \omega} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

ถ้าให้ C_e เป็นค่าเฉลี่ยของ C_e ทั้งหมดระหว่างช่วง consolidation จะได้

$$\frac{\partial P_s}{\partial \theta_c} = C_e \frac{\partial^2 P_s}{\partial \omega^2} \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

ดังนั้นภายใต้การกดอัดไล่น้ำด้วยความดันคงที่ P จะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของ P_s ได้ เมื่อสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตเป็นดังต่อไปนี้

$$\text{I.C.} \quad p_s = p_{s1}; \quad 0 \leq \omega \leq \omega_0/i \quad \theta_c = 0$$

$$\text{B.C.1} \quad p_s = p; \quad \omega = 0 \quad \theta_c > 0$$

$$\text{B.C.2} \quad \frac{\partial p_s}{\partial \omega} = 0; \quad \omega = \omega_0/i$$

$P_{s,1}$ คือ การกระจายตัวของ P_s ณ จุดที่เริ่มเข้าสู่ consolidation period

B.C.2 หมายถึงจุดกึ่งกลางของเค้กในกรณีที่ $i = 2$ ถ้าในกรณีที่ $i = 1$ จะเป็นตำแหน่งที่ผิวด้านที่ไม่มีการกรอง ซึ่งความเร็วปรากฏของ filtrate จะมีค่าเท่ากับศูนย์ จาก I.C. และ B.C. ทั้ง 2 จะสามารถแก้สมการ 2.25 ได้ P_s -distribution ดังนี้

$$P_s(\omega, \theta_c) = P - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4P}{(2n-1)\pi} - \frac{2i}{\omega_0} \int_0^{\omega_0/i} P_{s,1} \cdot \sin \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2} \frac{i\xi}{\omega_0} \right\} d\xi \right] \times \sin \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2} \frac{i\omega}{\omega_0} \right\} \exp \left\{ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \frac{i^2 C_e}{\omega_0^2} \theta_c \right\} \quad (2.28)$$

ดังนั้นอัตราเร็วการเปลี่ยนแปลงปริมาณ $L_1 - L$ จะเท่ากับ i เท่าของค่าอัตราปรากฏ u จะได้

$$\frac{d(L_1 - L)}{d\theta_c} = -\frac{1}{\mu \rho_s} \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial P_s}{\partial \omega} \right)_{\omega=0} \quad (2.29)$$

เมื่อทำการ integrate สมการที่ 2.29 จะได้ปริมาณความหนาเค้กที่ลดลงดังนี้

$$L_1 - L = \frac{4\omega_0}{\mu \alpha_{av} \rho_s \pi C_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \left[\frac{2P}{(2n-1)\pi} - \frac{i}{\omega_0} \int_0^{\omega_0/i} P_{s,1} \sin \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2} \frac{i\xi}{\omega_0} \right\} d\xi \right] \times \left[1 - \exp \left\{ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \frac{i^2 C_e}{\omega_0^2} \theta_c \right\} \right] \quad (2.30)$$

นอกจากนี้ยังมีการนิยาม average consolidation ratio U_c ดังต่อไปนี้

$$U_c \equiv \frac{(L_1 - L)}{(L_1 - L_{\infty})} \quad (2.31)$$

A. การกดอัดไล่น้ำเค้กกรอง

ในกรณีที่เค้กกรองมีสมบัติการกดอัดตัวระดับปานกลาง P_s -distribution ภายในเค้กกรองสามารถแสดงได้ด้วย

$$P_{s,1} = P \left\{ 1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{i\omega}{\omega_0} \right) \right\} \quad (2.32)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad P_s = P \left\{ 1 - \sin \left(\frac{\pi i \omega}{2 \omega_0} \right) \cdot \exp \left(\frac{-\pi^2 T_c}{4} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

$$L_1 - L = \frac{4 \omega_0 P}{\mu \alpha_{av} \rho_s \pi C_e} \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-\pi^2 T_c}{4} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

$$U_c = \frac{L_1 - L}{L_1 - L_\infty} = 1 - \exp \left(\frac{-\pi^2 T_c}{4} \right) \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

B. การกดอัดไล่น้ำ semi-solid slurry

เมื่อความเข้มข้นสูงจนมีค่าสัดส่วน solid content; s ($\text{kg}_{\text{solid}}/\text{kg}_{\text{slurry}}$) สูงกว่า solid content ที่ผิวหน้าเค้กกรอง กล่าวคือเป็น การกดอัดไล่น้ำ semi-solid slurry ในกรณีนี้จะไม่มีการเกิดของ filtration ของผสมจะเข้าสู่ consolidation ตั้งแต่เริ่มต้น ถ้าให้ความเข้มข้นสม่ำเสมอทั่วเท่ากันทั้งของผสม ที่จุดเริ่มต้นการกดอัดไล่น้ำ (consolidation) ค่า P_s จะคงที่สามารถแสดงได้ด้วย

$$P_{s,1} = P_s (e_1) \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

ในที่นี้ $P_s (e_1)$ คือค่า P_s ที่ส่นองกับค่า void ratio; e_1 ซึ่งเป็น void ratio ณ ขณะเริ่มการกดอัดไล่น้ำจะได้

$$P_s = P - \frac{4}{\pi} \{ P - P_s (e_1) \} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin \left\{ \frac{(2n-1)\pi i \omega}{2 \omega_0} \right\} \times \exp \left\{ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} T_c \right\} \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

$$L_1 - L = \frac{8 \omega_0 \{ P - P_s (e_1) \}}{\mu \alpha_{av} \rho_s \pi^2 C_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} T_c \right\} \right] \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

$$U_c = \frac{L_1 - L}{L_1 - L_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \cdot \exp \left\{ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} T_c \right\} \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

$$\text{เมื่อ} \quad T_c = \frac{i^2 C_e \theta_c}{\omega_0^2} \quad \dots\dots\dots(2.40)$$

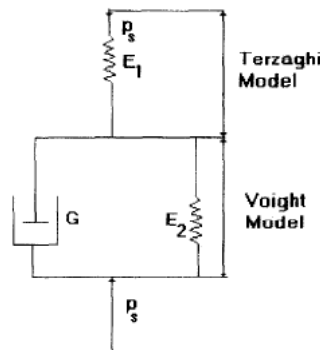
ค่า C_e มีหน่วยเช่นเดียวกับค่า diffusivity คือ ตารางเมตรต่อวินาที ค่า C_e ยิ่งสูง กระบวนการกดอัดไล่น้ำจะยิ่งเร็วขึ้น กล่าวคือ กระบวนการไล่น้ำเป็นกระบวนการที่ชั้นที่ pack แน่นจะขยายตัว (diffuse) เข้าสู่ชั้นเค้กทั้งหมดในทิศทางที่ห่างไปเรื่อยๆจากแผ่นกรอง ดังนั้นถ้าทราบค่า α และความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ P_s จะสามารถหาค่า C_e ได้ด้วยวิธี graph fitting

C. Secondary consolidation

จากบทที่ผ่านมา consolidation equation ดังสมการที่ 2.25, 2.26 และ 2.27 เป็นสมการที่ได้จาก Terzaghi model ซึ่งมีสมมติฐานที่เปรียบเทียบให้พฤติกรรมทาง dynamic ของโครงสร้างอนุภาคเป็นดังเช่นสปริง กล่าวคือเมื่อ P_s เพิ่มขึ้นโครงสร้างของอนุภาคจะกดอัด (บีบตัว) อยู่ในสภาพที่สนองตอบต่อ P_s ในทันที แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างจะไม่บีบอัดตัวไปสู่สภาวะนั้นๆ ในทันที แต่ต้องการเวลาชั่วระยะหนึ่งในการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปริมาตรของ void ที่ลดลงจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ส่วนที่เปลี่ยนแปลงโดยทันทีเมื่อ P_s เพิ่มขึ้น (primary consolidation) กับส่วนที่เปลี่ยนแปลงต่อไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (secondary consolidation) ซึ่งในส่วนที่สองนี้สามารถแสดงได้ด้วย Voight model เมื่อรวมกับ Terzaghi model จะสามารถแสดงพฤติกรรมที่สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.4 (Shirato et al., 1986, Mihoubi et al., 2003)

ภาพที่ 2.4

Terzaghi-Voight model (Shirato et al., 1986)



ซึ่งค่า U_c ในการกดอัดไล่น้ำของเค็กกรองสามารถแสดงได้ดังนี้

$$U_c = (1-B) \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_c\right) \right] + B[1 - \exp(-\eta\theta_c)] \quad \dots\dots\dots(2.41)$$

$$= \frac{(L_1 - L) - B(L_1 - L_\infty)\{1 - \exp(-\eta\theta_c)\}}{(L_1 - L_\infty)(1-B)} \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

และ ค่า U_c ในการกดอัดไล่น้ำของ semi-solid slurry สามารถแสดงได้ดังนี้

$$U_c = (1-B) \left[1 - \sum_{N=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 (2N-1)^2} \exp\left(-\frac{(2N-1)^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{i^2 C_e}{\omega_0^2} \theta_c\right) \right] + B[1 - \exp(-\eta\theta_c)] \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

ค่า B เป็นค่าของสัดส่วนปริมาตร filtrate ที่ได้จาก creep ต่อปริมาตร filtrate ที่ได้ทั้งหมด และ η คือค่าคงที่ที่แสดงค่าอัตราการกอดอัดไล่น้ำที่ได้จาก creep และที่เวลา $\theta_c \gg 0$ ถ้าพลอตกราฟระหว่าง $\ln(1-U)$ vs. θ_c จะได้สมการเส้นตรงที่สามารถหาค่า creep constant β และ η ได้ จากจุดตัดแกน Y และ slope ตามลำดับ

2.4 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sherwood และคณะ (1991) ทดลองทำการกรอง bentonite โดยวัดปริมาณของของแข็งที่หลุดลอดออกจากเค้กกรอง โดยได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเกิด creep กับปริมาตรของของแข็งในเค้กกรอง โดยผู้เขียนได้สรุปโดยรวมว่าในกระบวนการกรองถือว่ามียธิพลของ creep เกิดขึ้นน้อยมาก

Chang และ Lee (1998) ทำการทดลองเพื่อหาการเกิด creep ใน biological sludge ได้เสนอกลไกการเกิด creep ของเค้กกรองชนิดนี้ว่ามีอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ 1) อนุภาคจะจัดเรียงตัวในตำแหน่งที่คงตัว (stable stage) เกิดแรง shear stress สูงอันเกิดจากแรงหนีตัวของพื้นผิวที่เกิดการดูดกลืนน้ำระหว่างอนุภาคด้วยกันเอง และ 2) เกิดการจับตัวของน้ำหรือมีน้ำติดอยู่ในอนุภาคของ sludge รวมทั้งสรุปว่า creep เกิดขึ้นในอัตรา 50 เปอร์เซ็นต์ของกระบวนการกอดอัดไล่น้ำ (รวมช่วงของกระบวนการกรอง) ที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่ผู้เขียนยังไม่ได้กล่าวว่า creep มียธิพลอย่างไรต่อทั้งกระบวนการกรองและการกอดอัดไล่น้ำ

Czekaj และคณะ (2001) จากประเทศสเปน ได้ทดลองกรองเบียร์ด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเพื่อศึกษาถึงความต้านทานในการกรองเมื่อใช้แผ่นกรองต่างชนิดกัน โดยเลือกใช้ผ้ากรอง 3 ชนิดด้วยกันคือ cellulose acetate (CA), polycarbonate (PC) และ polyvinylidene difluoride (PVDF) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากันคือ 0.22 ไมโครเมตร พบว่า PC มีความต้านทานสูงสุดตามมาด้วย PVDF และ CA ซึ่งให้เหตุผลว่า CA มีความเป็นรูพรุน (porosity) มากกว่าจึงให้อัตราการไหลของ filtrate ที่สูงกว่า

ประมุข ภาวะกุลสุขสถิตย์ และ จารุพัสด์ พลทรัพย์ (ปี 2549) ได้ศึกษาการลดจำนวนจุลินทรีย์ภายในเหล้าสาโทโดยวิธีอัลตราฟิลเตรชันพบว่าสาโทที่ผ่านการกรองแล้วจะมีจำนวนจุลินทรีย์ที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสาโทที่ไม่ได้ผ่านการกรองคือมีความสามารถในการกรองเชื้อจากค่าเริ่มต้นที่ 5 log cfu ต่อมิลลิลิตร ให้เหลือน้อยกว่า 1 log cfu ต่อมิลลิลิตรและการใช้ความ

ดันทั้งสองระดับในการกรอง คือ 66.7 และ 133.4 กิโลปาสกาล ให้ผลการลดลงของจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ไม่แตกต่างกัน

Fillaudeau และคณะ (2006) ได้ทำการกรองเปปรีโดยใช้ polyvinylchloride (PVC) เป็นแผ่นกรองแต่เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของแผ่นกรอง คือ 0.6 0.8 1.1 และ 1.5 ไมโครเมตร พิจารณาผลของความดัน ที่มีต่ออัตราการไหลของ permeate พบว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 และ 0.8 ไมโครเมตร ให้อัตราการไหลของ filtrate คงที่แม้ว่าความดันจะสูงขึ้น แต่ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 และ 1.5 ไมโครเมตร ให้อัตราการไหลของ filtrate สูงขึ้นแปรผันตรงกับความดัน

Kamst และคณะ (2007) ได้ทำการทดลองแยกของเหลวออกจากเค้กกรองของน้ำมันปาล์ม โดยวัดการจมตัว (deformation) ของเค้กกรองที่ความดันคงที่ พบว่าเค้กกรองดังกล่าวเกิด creep ได้สมการ non-linear ที่อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเค้กกรองเป็นฟังก์ชันของทั้งความดันที่ใช้และเวลา

และ Christensen และคณะ (2007) ได้ทดลองแยกเอาของเหลวออกจาก Activated sludge เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิด creep โดยผลที่ได้เกิด creep ขึ้นมากที่สุดถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการกักอัดไล่น้ำของ Activated sludge ทางผู้เขียนได้สรุปว่าปริมาตรของของแข็งที่เปลี่ยนแปลงในเค้กกรองของทั้งกระบวนการกรองและการกักอัดไล่น้ำ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความดันเพียงอย่างเดียว แต่มีผลของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เพราะฉะนั้นจึงน่าจะมีการพิจารณาปรับปรุงทฤษฎีการกรองใหม่ โดยพิจารณาผลของ creep เข้าร่วมด้วย