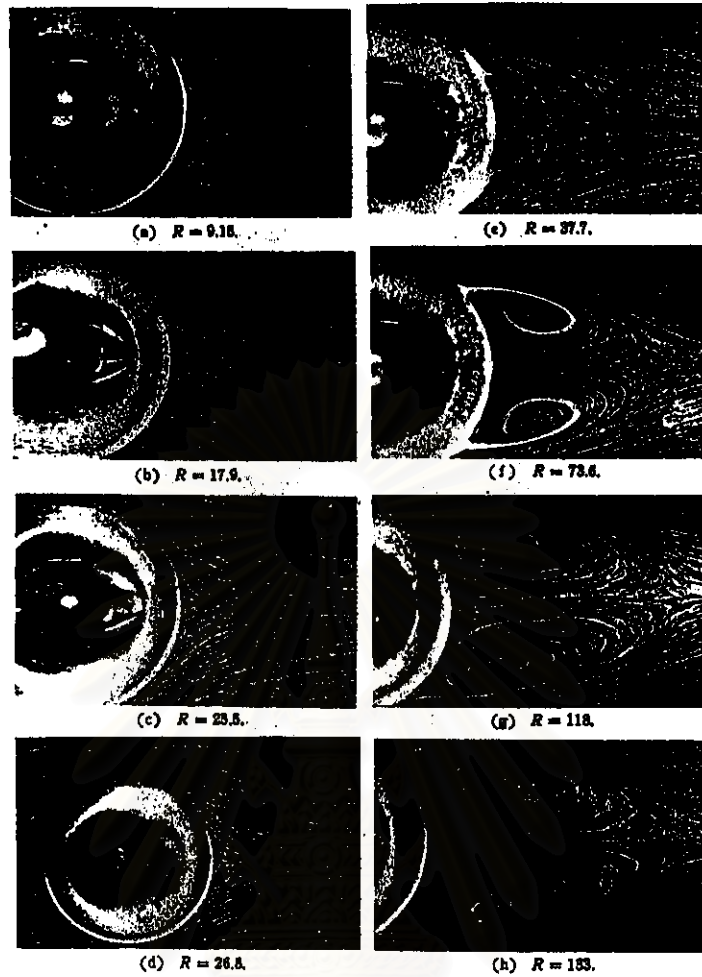


บทที่ 6

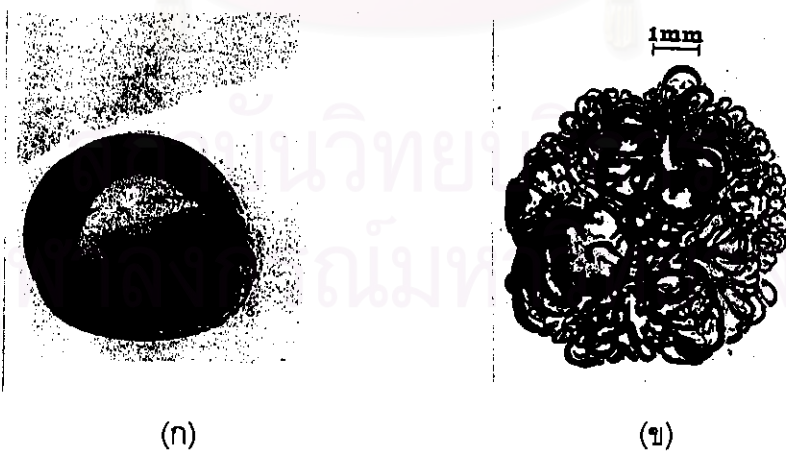
วิเคราะห์ผลการทดลอง

การใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรองเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ช่วยทำให้อัตราการกรองมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากปัญหาสำคัญของกระบวนการกรองคือ เกิดการสะสมของอนุภาคบนเยื่อแผ่น ทำให้อัตราการกรองลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการปล่อยคลื่นเสียงให้เคลื่อนที่ในตัวกลางจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่งสามารถทำให้อนุภาคมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้นและทำให้เกิดคาวิเทชัน (cavitation) โดยคาวิเทชันที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยเราตั้งสมมุติฐานว่า

1. คาวิเทชันแบบคงตัว (stable cavitation) จะสามารถกำจัดอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นได้เนื่องจากคาวิเทชันที่เกิดขึ้นจำนวนมากนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปมา รวมทั้งมีการลดและขยายขนาดตลอดเวลา เกิดเป็นสายของฟองขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียกว่า ไมโครสตรีมมิง (microstreaming) นอกจากนั้นการเคลื่อนที่ของคาวิเทชันจะทำให้เกิดการปั่นป่วนภายในของเหลวบริเวณด้านหลัง ดังรูปที่ 6.1 เมื่อคาวิเทชันเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่มีอนุภาคสะสมอยู่ จึงทำให้เกิดแรงเฉือน (shear force) ขึ้นที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น อนุภาคบางส่วนจะหลุดออกมาปนกับสายป้อน ทำให้ความหนาของชั้นอนุภาคที่สะสมบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นต่ำลงเป็นผลให้อัตราการกรองมีค่าสูงขึ้น
2. คาวิเทชันแบบไม่คงตัว (transient cavitation) การยุบตัวของคาวิเทชันประเภทนี้ ช่วยทำให้อนุภาคที่สะสมอยู่ลดน้อยลงได้ โดยแบ่งได้ออกเป็น 3 ลักษณะคือ
 - 2.1 ทำให้เกิดความดันและอุณหภูมิที่สูงบริเวณที่คาวิเทชันเหล่านั้นเกิดการยุบตัว เมื่อมีการเคลื่อนที่ของเสียงในตัวกลางของเหลวจะเกิดบริเวณอัด (compression) และ บริเวณขยาย (rarefaction) ของโมเลกุล โดยการเกิดคาวิเทชันจะเกิดในช่วงขยาย เนื่องจากมีความดันในของเหลวต่ำกว่าความดันไอ (vapor pressure) ของของเหลวและจะเกิดการยุบตัวและมีขนาดเล็กลงในบริเวณอัดแสดงดังรูปที่ 6.2 เพราะมีความดันภายนอกสูงกว่าความดันภายในคาวิเทชันส่งผลให้บริเวณที่มีการยุบตัวเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการกรองเพิ่มมากขึ้นได้



รูปที่ 6.1 การเคลื่อนที่ของคาวีเทชันในตัวกลางของเหลวที่เรย์โนลด์สเบอร์ต่างกัน ทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณด้านหลังของฟอง



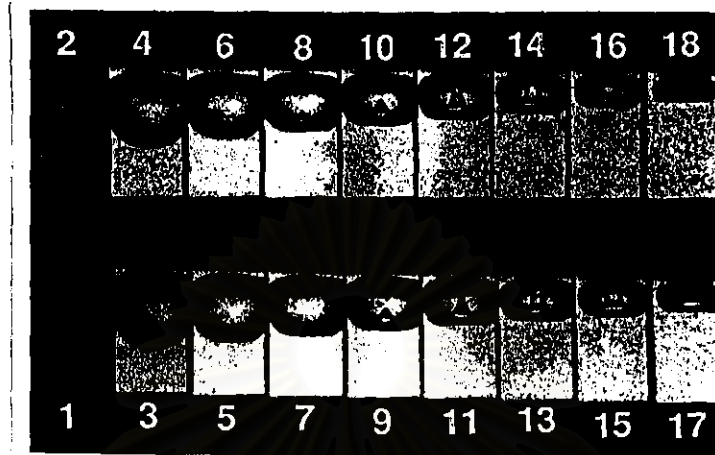
รูปที่ 6.2 คาวีเทชันในตัวกลางของเหลว

(ก) ก่อนการยุบตัว

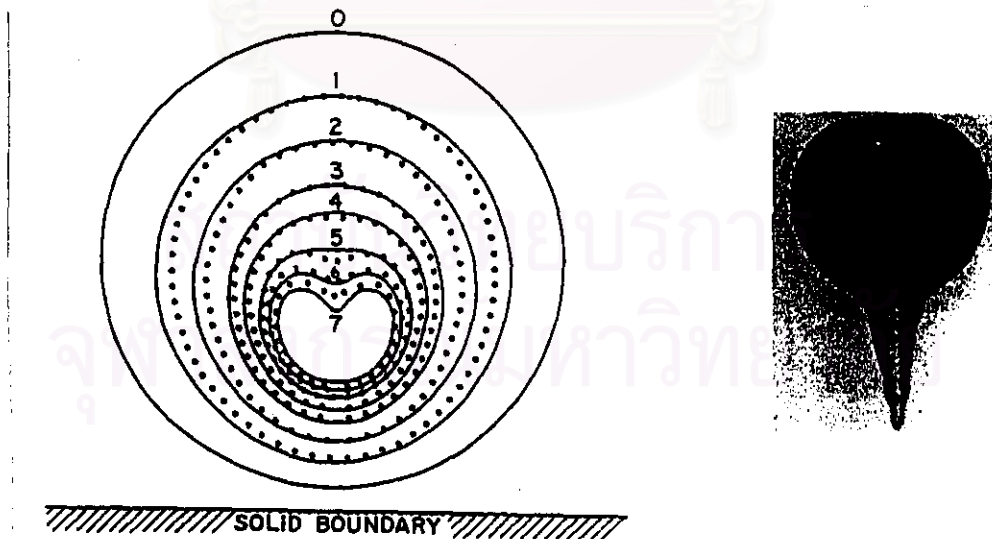
(ข) หลังการยุบตัว

- 2.2 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (shock wave) โดยเกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิตีที่เพิ่มขึ้นบริเวณผิวของของแข็ง จะส่งผลให้ผิวของของแข็งถูกทำลายหรือเกิดเป็นรอยแตก จุดเริ่มต้นของฟอง (nuclei) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ส่วนใหญ่ คือ ฟองอากาศหรือฟองก๊าซที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งในส่วนของขรุขระหรือที่มีวัสดุแปลกปลอมติดอยู่
- 2.3 ทำให้เกิดแรงเจาะทะลุ (pitting force) เนื่องจากการยุบตัวของคาวิตีที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้ผิวของแข็ง การยุบตัวของคาวิตีประเภทนี้มีลักษณะแตกต่างจากการยุบตัวในหัวข้อ 2.2 คือ ทำให้เกิดการยุบตัวที่ไม่สมมาตร จึงก่อให้เกิดแรงเจาะทะลุ (microjet) พุ่งเข้าสู่ผิวของแข็ง ผิวของแข็งจึงถูกกระทบอย่างแรง หากผิวของแข็งบริเวณนี้มีวัสดุแปลกปลอมติดอยู่ก็จะหลุดออกไปได้ เป็นคุณสมบัติการทำความสะอาดของคลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย รูปที่ 6.3 และ 6.4 แสดงลักษณะการยุบตัวของคาวิตีซึ่งทำให้เกิดแรงเจาะทะลุที่บริเวณผิวของแข็ง และยังทำให้เกิดความดันซึ่งมีค่าสูงมาก ดังกราฟรูปที่ 6.5 เมื่อพิจารณากระบวนการกรองซึ่งมีอนุภาคสะสมกันอยู่บริเวณผิวเยื่อแผ่น การยุบตัวของคาวิตีในลักษณะนี้จะทำให้อนุภาคที่สะสมถูกแรงเจาะทะลุกระทำจนเกิดเป็นรูบนผิวหน้าของเค้ก ดังรูปที่ 6.6

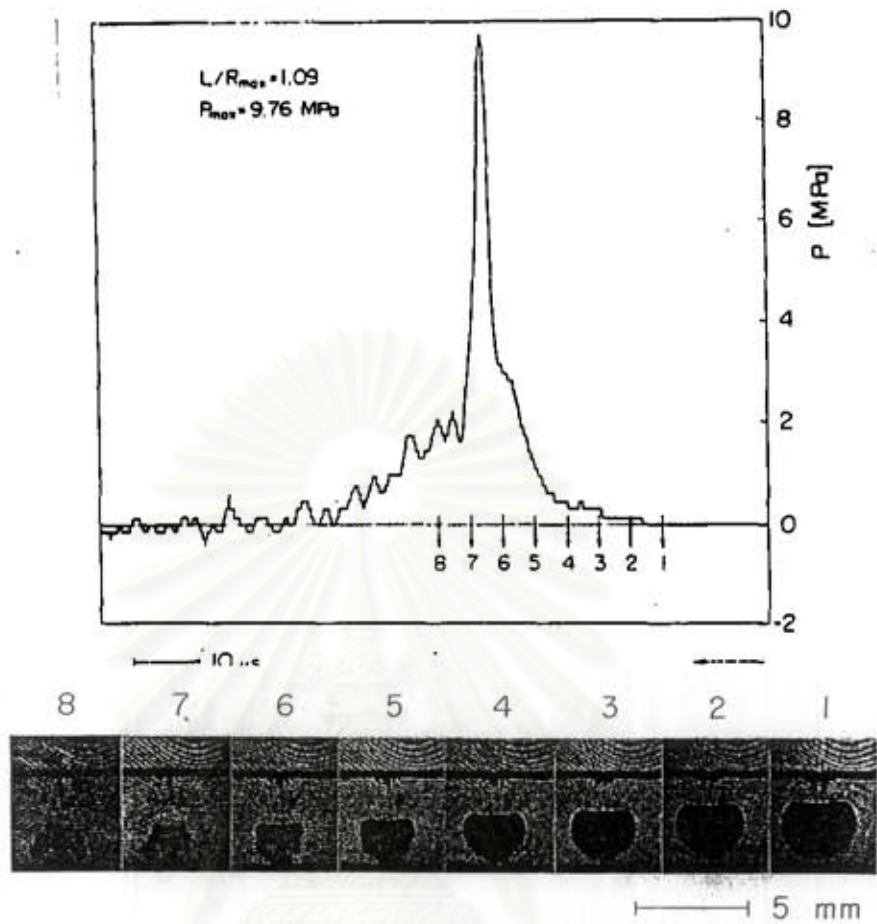
รูปที่ 6.7 แสดงภาพถ่ายของอนุภาคดินเหนียวที่สะสมเป็นชั้นบางๆบนผิวหน้าของเยื่อแผ่นในสื่อน66 ที่ติดตั้งบนเครื่องกรอง มีการผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้ม 1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 1 ตัว ซึ่งจะสังเกตเห็นการหลุดออกของอนุภาคดินเหนียวเนื่องจากคาวิตีที่เวลาต่างๆ เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที ซึ่งจากภาพถ่ายจะเห็นได้ชัดว่า คลื่นเหนือเสียงสามารถกำจัดชั้นของดินเหนียวที่สะสมบนเยื่อแผ่นได้อย่างรวดเร็ว จนสามารถสังเกตเห็นบริเวณสีขาว ซึ่งคือเยื่อแผ่นที่สะอาดไม่มีอนุภาคดินเหนียวสะสมอยู่ และการกำจัดดินเหนียวนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในบริเวณที่ตรงกับตำแหน่งที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพอดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปก็สามารถกำจัดอนุภาคดินเหนียวในบริเวณใกล้เคียงรอบข้างได้ด้วย



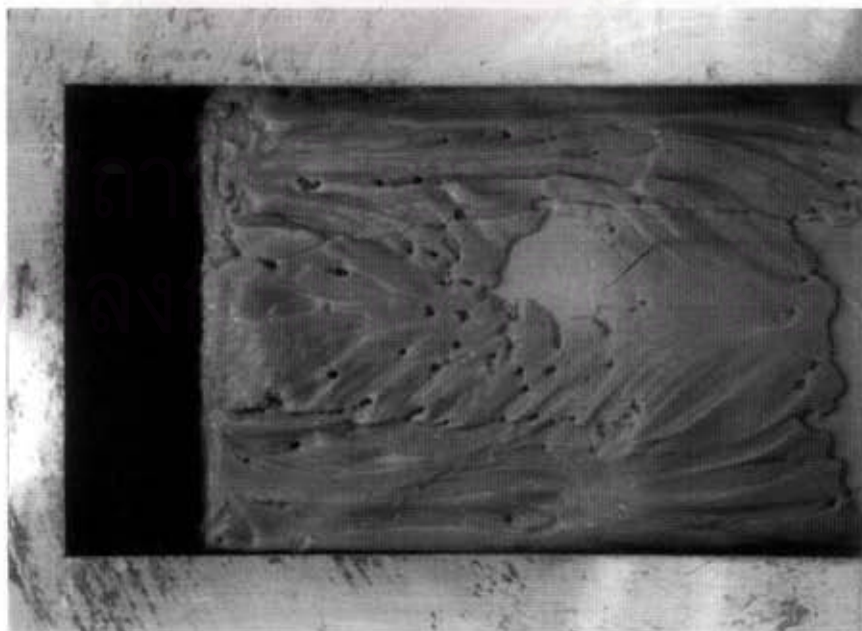
รูปที่ 6.3 ภาพถ่ายลักษณะการยุบตัวของคาวีเทชันบริเวณใกล้ผิวของแข็ง (ด้านบน).



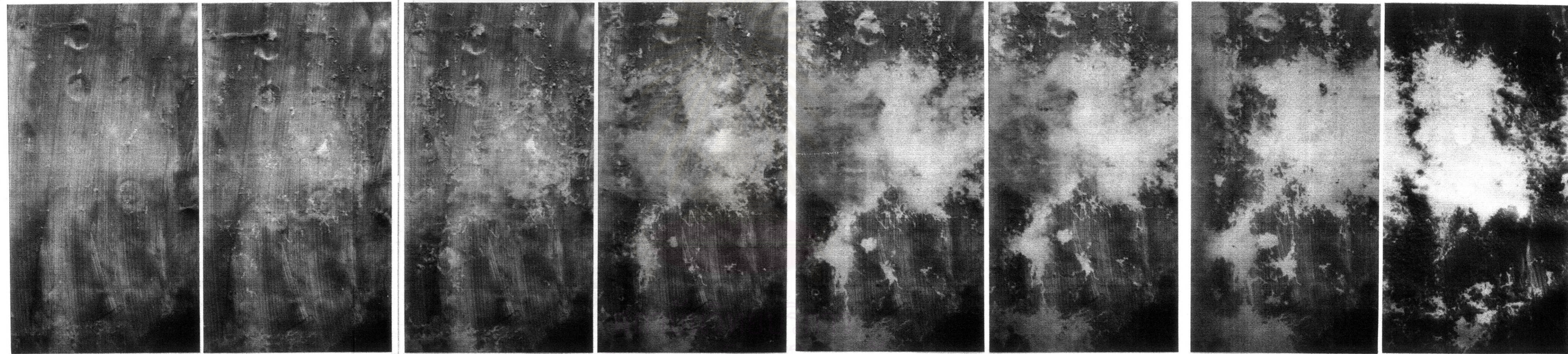
รูปที่ 6.4 คาวีเทชันที่ยุบตัวทำให้เกิดแรงเจาะทะลุบนผิวของแข็ง



รูปที่ 6.5 ภาพถ่ายและกราฟแสดงค่าความดันของการยุบตัวของคาวีเทชันใกล้ผิวของแข็ง



รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของค้ำเมื่อคาวีเทชันยุบตัวทำให้เกิดแรงเจาะทะลุ



รูปที่ 6.7 ภาพถ่ายแสดงการกำจัดอนุภาคดินเหนียวบนเยื่อแผ่น
ด้วยควาวิชั่นที่เวลาต่างๆเป็นเวลาประมาณ 20 วินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1 เปรียบเทียบอัตราการกรองที่ได้จากการกรองที่ใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

6.1.1 ทิศทางในการปล่อยคลื่นเหนือเสียง

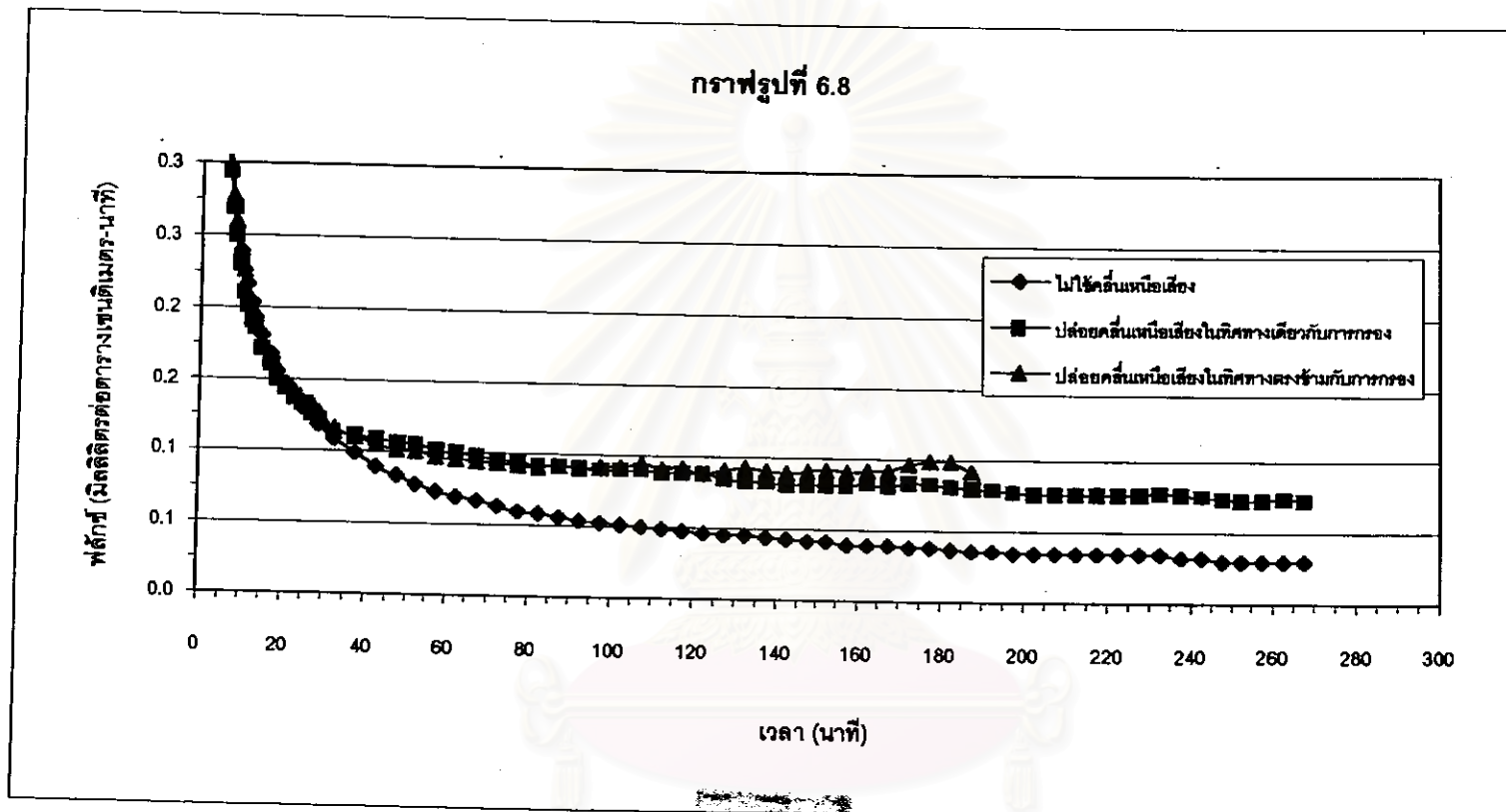
พิจารณากราฟรูปที่ 6.8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลา เมื่อทำการกรองแบบไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงและเมื่อมีการส่งคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามและทิศทางเดียวกับการกรอง พบว่า การใช้คลื่นเหนือเสียงทั้ง 2 กรณีจะสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้ประมาณ 2.4 และ 2.9 เท่า ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 6.9 พบว่า การกรองแบบปกติและแบบที่มีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงทิศทางเดียวกับการกรอง ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่นจะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการกรอง คือ ประมาณ 100% แต่สำหรับการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที คลื่นเหนือเสียงจะเริ่มทำลายเยื่อแผ่นสังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การเก็บกักที่มีค่าลดลงตามลำดับ ยีสต์สามารถรั่วผ่านออกมาด้านเพอมีอเทได้ แสดงว่าการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง ทำให้เกิดรูบนเยื่อแผ่น ค่าความสามารถในการเก็บกักจึงมีค่าลดต่ำลง

การปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกันและทิศตรงข้ามกับการกรองจะส่งผลแตกต่างกัน คือ การปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรองทำให้อัตราการกรองมีค่าสูงกว่า เนื่องจากเมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางนี้คลื่นเสียงจะเดินทางผ่านของเหลวในสายเพอมีอเทแล้วจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นรองรับและตะแกรงลวดก่อนที่จะไปถึงเยื่อแผ่นและอนุภาคที่สะสมบนผิวของเยื่อแผ่นดังรูปที่ 6.10 ซึ่งการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณต่างๆ คือ ช่องเพอมีอเท, แผ่นรองรับและตะแกรงลวด จะทำให้พลังงานของคลื่นเสียงถูกดูดซับและสูญเสียพลังงานไปบางส่วน แต่ยังคงมีพลังงานที่มีความเข้มพอที่จะทำให้เกิดคาวีเทชันทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น คือด้านที่สัมผัสกับสายป้อนที่มีอนุภาคยีสต์สะสมอยู่ โดยจุดกำเนิดของฟองคือ ฟองก๊าซที่อยู่บนผิวของเยื่อแผ่นเอง และเมื่อคาวีเทชันเหล่านี้เกิดการยุบตัว ก็จะทำให้เกิดแรงกระแทกให้อนุภาคยีสต์ที่สะสมที่อยู่บนเยื่อแผ่นหลุดออกไปได้ ดังรูปที่ 6.11 ส่วนในอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่น คือ ด้านที่สัมผัสกับสายเพอมีอเท เนื่องจาก ความดันภายในของเหลวในสายเพอมีอเทมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงทำให้คาวีเทชันเทรสโลลด์มีค่าต่ำด้วย การเกิดคาวีเทชันจึงง่ายขึ้น โดยในบริเวณนี้ จุดกำเนิดของฟองอาจเกิดจากฟองอากาศที่ติดอยู่จากแผ่นตะแกรงหรือผิวของแผ่นรองรับ ดังรูปที่ 6.11 และเนื่องจากการเกิดคาวีเทชันเกิดขึ้นจำนวนมากบนผิวของเยื่อแผ่น ดังนั้นเยื่อแผ่นอาจเกิดเป็นรูขึ้นได้หากได้รับแรงกระแทกเนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชันเหล่านี้อย่างรุนแรงและเป็นระยะเวลาหนึ่งติดต่อกัน จากผลลัพธ์นี้ส่งผลให้ฟลักซ์การกรองมีค่าสูงขึ้น โดยแรงกระแทกส่วนใหญ่จะทำให้เกิดรูในส่วนที่สัมผัสกับแผ่นรองรับในบริเวณที่ไม่ได้เป็นรูให้เพอมีอเทผ่านดังแสดงในรูปที่ 6.12 ถึงแม้ว่า เยื่อแผ่นในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับแผ่นรองรับนั้น คลื่นเหนือเสียงที่เดินทางมาบางส่วนจะถูกดูดซับด้วย

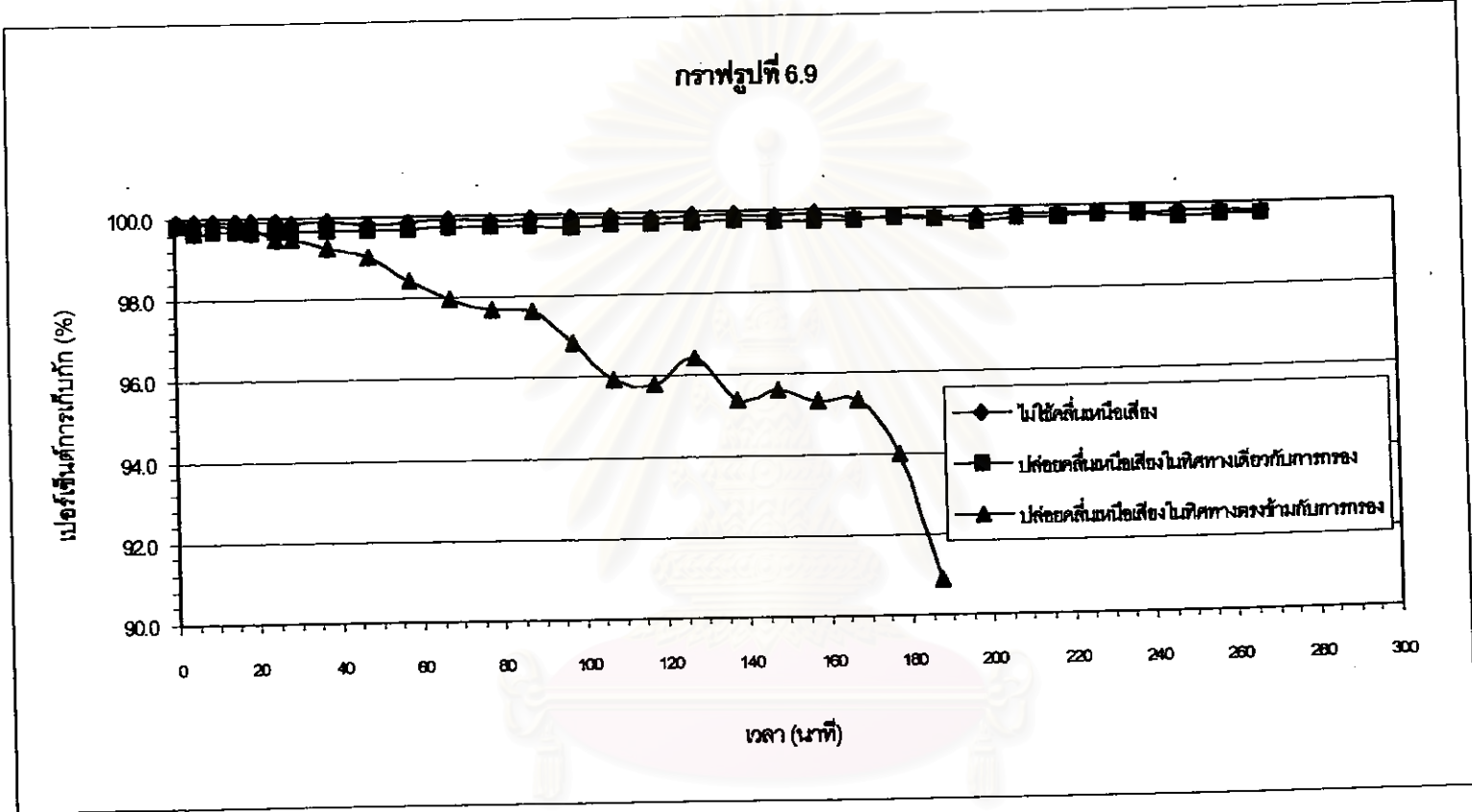
ตะแกรงและเยื่อแผ่น ก่อนจะถึงบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นที่สัมผัสกับอนุภาคที่สะสม แต่ในบริเวณที่มีแผ่นรองรับอยู่ คลื่นเหนือเสียงบางส่วนจะถูกดูดซับมากขึ้นจากการเดินทางผ่านแผ่นรองรับอีกชั้นหนึ่ง ถึงกระนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากแรงกระแทกที่เกิดขึ้นได้รุนแรงในบริเวณที่มีวัสดุของแข็งรองรับอยู่จากการยุบตัวของคาวีเทชันบนผิวหน้าของเยื่อแผ่น ผลจากการดูดซับคลื่นเหนือเสียงในแผ่นรองรับจะน้อยกว่า สังเกตได้จากเยื่อแผ่นที่ผ่านการทดลองมาแล้วในรูปที่ 6.15 (ข) พบว่าพื้นที่ของเยื่อแผ่นบริเวณที่สัมผัสกับแผ่นรองรับจะถูกทำลายจากคลื่นเหนือเสียงมากกว่าบริเวณที่ไม่มีแผ่นรองรับ เนื่องจากแผ่นรองรับถูกเจาะรูไว้เพื่อให้สารไหลผ่านออกไปในสายเพอมีเอทได้

สำหรับกรณีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการกรอง คลื่นเหนือเสียงจะเคลื่อนที่ผ่านช่องสายป้อนและอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นแล้วจึงเคลื่อนที่กระทบเยื่อแผ่น การเกิดคาวีเทชันในบริเวณนี้จะเกิดจากจุดเริ่มต้น คือฟองอากาศที่อยู่ภายในของเหลวและที่ติดอยู่บนผิวของชั้นอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่น ดังนั้นพลังงานส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับการเกิดคาวีเทชันในบริเวณผิวหน้าของเค้กนี้ ดังรูปที่ 6.13 พลังงานที่เหลือผ่านไปกระทบเยื่อแผ่นจึงมีค่าต่ำ จนไม่สามารถทำลายเยื่อแผ่นได้ในเวลาปฏิบัติการณ์ได้เท่ากับกรณีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรองข้างต้น ดังเห็นได้จากรูปที่ 6.15 (ก) ซึ่งจะเห็นว่าจากการสังเกตด้วยตาเปล่า จะไม่เห็นรูที่เกิดจากการทำลายของคลื่นเหนือเสียง รวมทั้งเมื่อนำเยื่อแผ่นนี้ไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดอนุภาคที่สะสมภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น แล้วทำการวัดค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (R_m) จะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าต้านทานของเยื่อแผ่นใหม่ ดังนั้นพลังงานเสียงส่วนใหญ่ที่ตกกระทบบนชั้นอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น จะทำให้เกิดคาวีเทชันบริเวณผิวหน้าของชั้นอนุภาคและกำจัดอนุภาคบางส่วนให้หลุดออก จึงทำให้ความหนาของชั้นอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นลดต่ำลง ซึ่งเป็นการลดค่าความต้านทานการกรอง อัตราการกรองของระบบจึงมีค่าสูงขึ้น

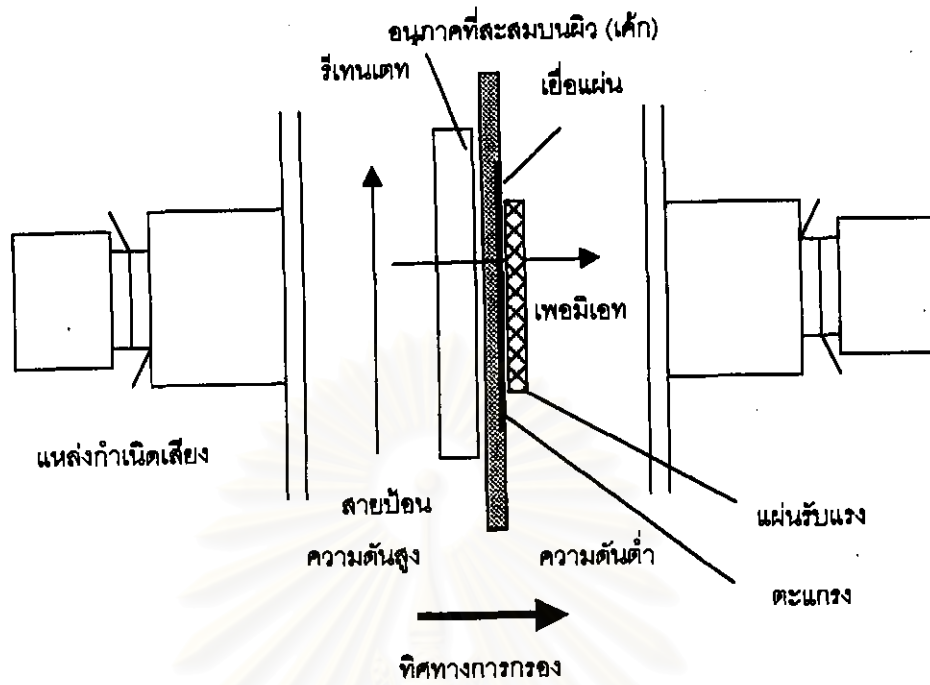
รูปที่ 6.15 เป็นรูปแสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองแบบใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวและทิศทางตรงข้ามกับการกรอง ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ชัดเจน ในกรณีหลังจะมีรูเล็กๆเกิดขึ้นบนผิวเยื่อแผ่นจำนวนมาก โดยเฉพาะในบริเวณตรงกับแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพอดีและเป็นบริเวณที่มีแผ่นลูมิเนียมรองรับ รวมทั้งบริเวณขอบของรูที่เจาะให้เพอมีเอทไหลผ่านเยื่อแผ่นออกไป



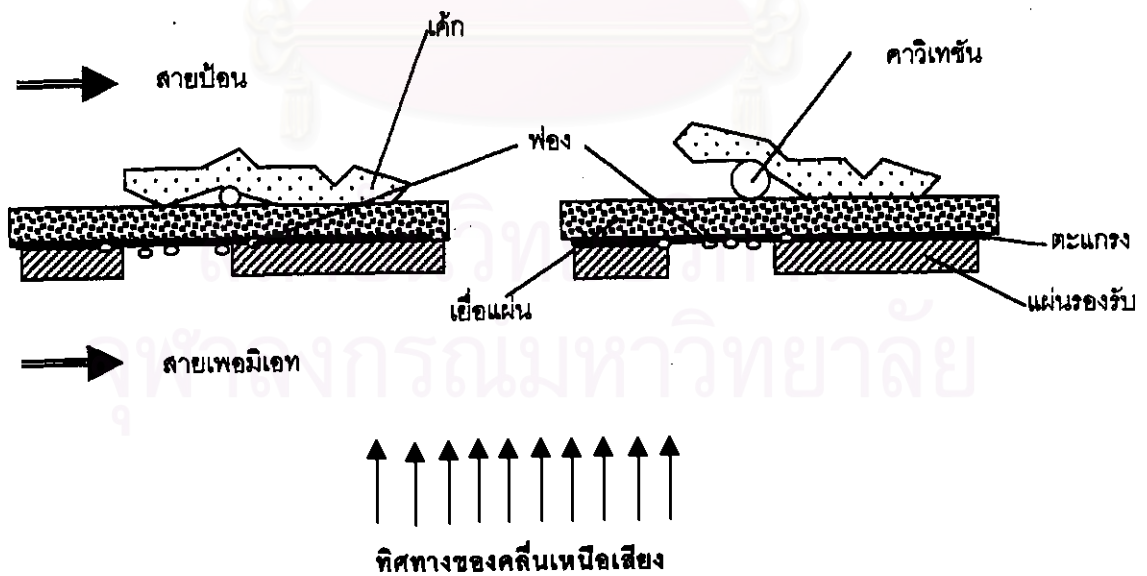
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการทรง ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และกำลัง 20 วัตต์ต่อตัว



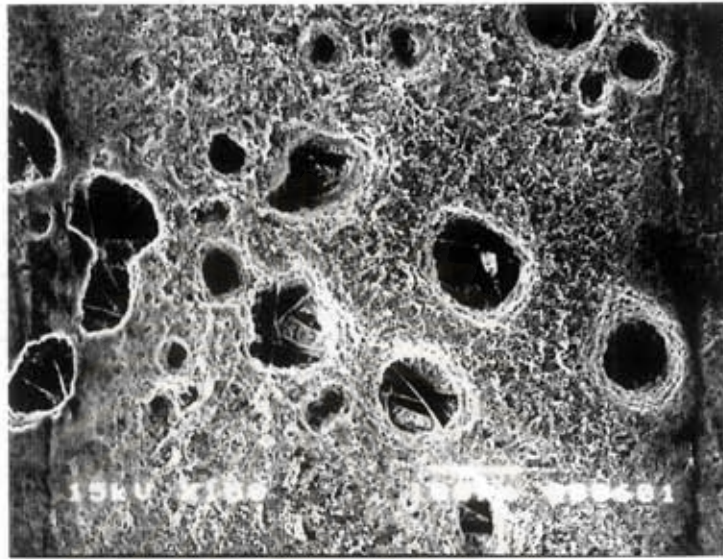
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเก็บกักกับเวลา เมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการทรง ที่ความดันक्रमเยื่อแผ่น 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และกำลัง 20 วัตต์ต่อตัว



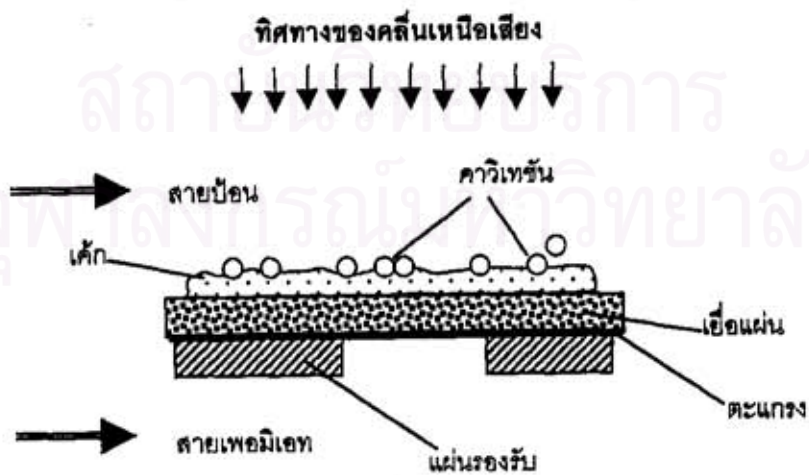
รูปที่ 6.10 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาผลของการปล่อยคลื่นเหนือเสียง ในทิศทางตรงข้ามและทิศทางเดียวกับการกระรอก



รูปที่ 6.11 การหลุดออกของอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นเนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชัน เมื่อมีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกระรอกและมีผลให้เยื่อแผ่นเป็นรู



รูปที่ 6.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 150 เท่า แสดงลักษณะของเยื่อแผ่นด้านที่สัมผัสกับสายป้อนที่เกิดรูเนื่องจาก การยุบตัวของคาวิตีเทชั่นเมื่อมีการปล่อยคลื่นเหนือเสียง ในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง

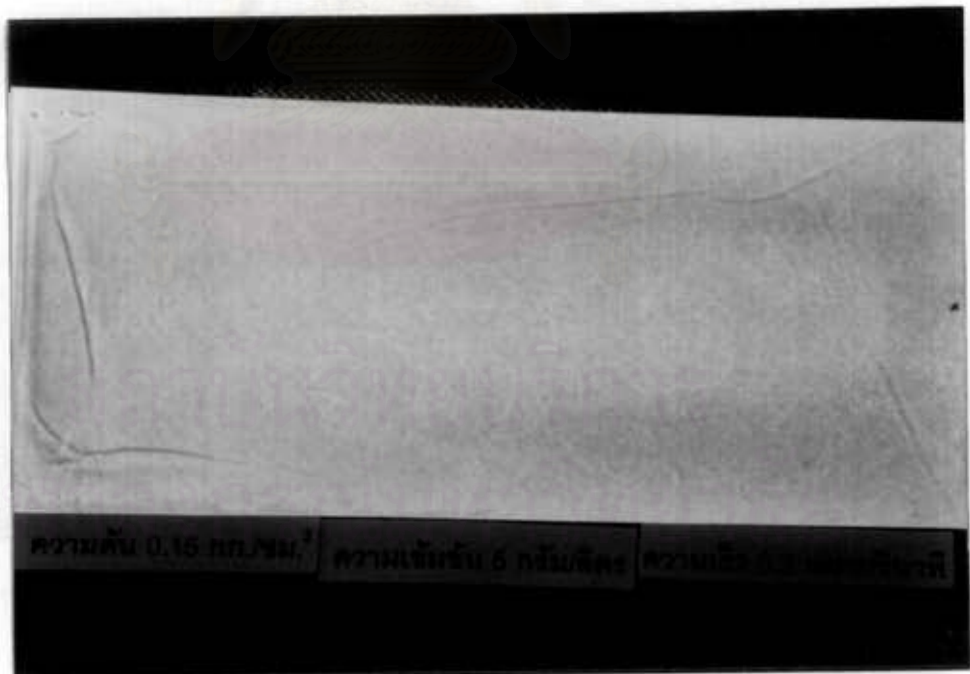


รูปที่ 6.13 ลักษณะของคาวิตีเทชั่นที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่าน ในทิศทางเดียวกับการกรอง

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าความต้านทานการกรองเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวและตรงข้ามกับการกรองและเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

	ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง	ปล่อยคลื่นทิศทางเดียวกับการกรอง	ปล่อยคลื่นทิศทางตรงข้ามกับการกรอง
R_m (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^5$	3.38	3.38 ^(ก)	3.33 ^(ก)
R_c (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^5$	355.11	135.37	112.19
R_p (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^5$	7.49	11.63	8.76
R_t (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^5$	365.98	150.37	124.27

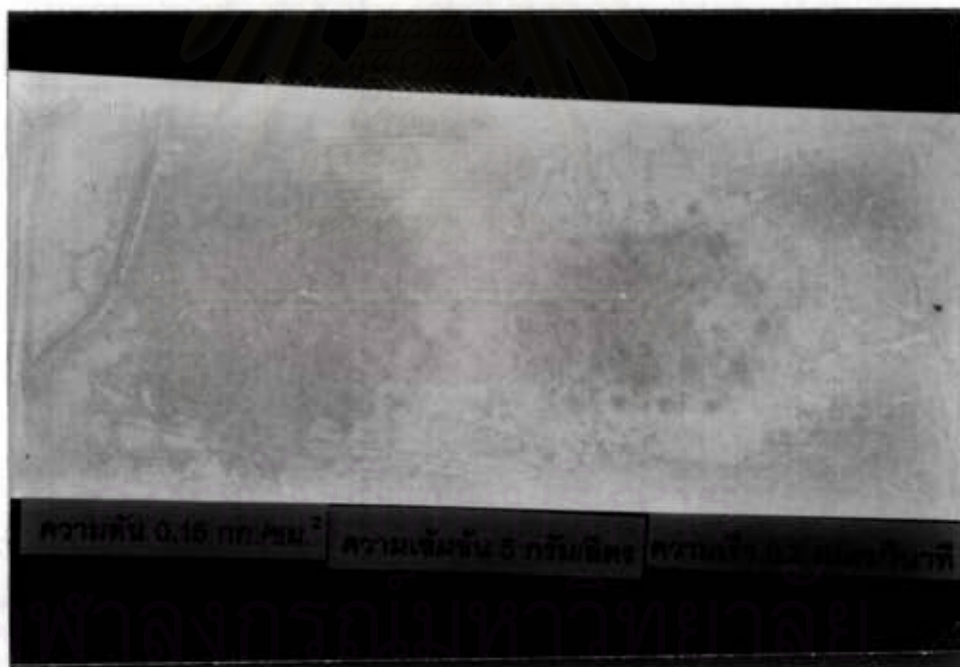
หมายเหตุ (ก) ค่า R_m นี้ได้จากการวัดค่าความต้านทานเยื่อแผ่นหลังจากแช่โซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว



รูปที่ 6.14 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองโดยไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านกรองแบบใช้คลื่นเหนือเสียง เมื่อ

(ก) ปลดปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการกรอง

(ข) ปลดปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง

จากตารางที่ 6.1 พบว่า การใช้คลื่นเหนือเสียงทั้ง 2 กรณี จะสามารถลดค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมบนผิวเยื่อแผ่น (R_p) ได้มากกว่า 62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มอัตราการกรองให้แก่ระบบ ดังสมการ 3.1 และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่น (R_p) พบว่า ในทุกกรณี ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานเนื่องจากการสะสมบนผิวเยื่อแผ่นมาก เนื่องจากขนาดของยีสต์โดยเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 5-10 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนของเยื่อแผ่นมาก ดังนั้นโอกาสและจำนวนของยีสต์ที่จะเข้าไปอุดตันในรูพรุนจึงน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นจึงมีผลกระทบต่ออัตราการกรองน้อยกว่าค่าความต้านทานเนื่องจากการสะสมบนผิวเยื่อแผ่นมาก และพบว่าเมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียงทั้ง 2 กรณี ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นที่ได้จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการกรองแบบปกติ สามารถอธิบายได้ว่า การยุบตัวของคาวิตेशनในของเหลวบริเวณใกล้ผิวหน้าของชั้นอนุภาคที่สะสมเนื่องจากการปล่อยคลื่นเหนือเสียงทิศทางเดียวกับการกรอง จะทำให้เกิดแรงเจาะทะลุกระทบลงบนผิวหน้าของเด็กนั้น ซึ่งนอกจากจะทำให้อนุภาคเหล่านี้หลุดออกไปแล้ว ยังจะทำให้อนุภาคบางส่วนเข้ามาสะสมในรูพรุนของเยื่อแผ่นเพิ่มมากขึ้นกว่าการกรองแบบปกติ เช่นเดียวกับการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง การยุบตัวของคาวิตेशनจะเกิดขึ้นบริเวณผิวเยื่อแผ่นทั้งสองด้าน ดังนั้นจะมีอนุภาคบางส่วนถูกแรงกระทำจากคลื่นเหนือเสียง ทำให้มีการสะสมของอนุภาคในเยื่อแผ่นเพิ่มมากขึ้น

ในการทำการทดลองต่อไป จึงเลือกใช้การปล่อยคลื่นเหนือเสียงทิศทางเดียวกับการกรอง เนื่องจากสามารถเพิ่มอัตราการกรองให้สูงขึ้นและไม่ทำลายเยื่อแผ่น

6.1.2 ระยะเวลาห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น

เนื่องจากเมื่อคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ออกจากตัวกำเนิดจะมีแอมพลิจูดที่ลดลงทั้งในแนวแกน (แกน z ในรูปที่ 6.16) และแนวแกนรัศมี (แกน x ในรูปที่ 6.16) ซึ่งหมายถึงจะทำให้เกิดบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบแตกต่างกัน ทั้งในแง่ของความเข้มของคลื่นเหนือเสียงและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ นั่นคือ ที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นน้อย ความเข้มของเสียงที่ตกกระทบบนเยื่อแผ่นก็จะมีค่าสูง แต่พื้นที่ที่คลื่นเหนือเสียงเดินทางไปตกกระทบก็จะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้บริเวณที่ได้รับผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงบนเยื่อแผ่นมากที่สุด และมีความเข้มของ

คลื่นเหนือเสียงมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการกำจัดอนุภาคเหล่านี้ได้ เพื่อให้ได้สมรรถนะในการกำจัดอนุภาคด้วยคลื่นเหนือเสียงสูงสุด

สมมติให้ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีลักษณะเหมือนลูกสูบ (piston) ดังรูปที่ 6.16 ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ a สามารถคำนวณค่าความดันของเสียงที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเสียงนี้ ที่จุด p ใดๆ ได้จากสมการ

$$p(r, \theta, t) = j(\rho c U_0 k / 2\pi) \int_S (e^{k(\omega t - kr) / r}) dS \dots\dots\dots(6.1)$$

โดย $k = \omega / c = 2\pi f / c = 2\pi / \lambda$

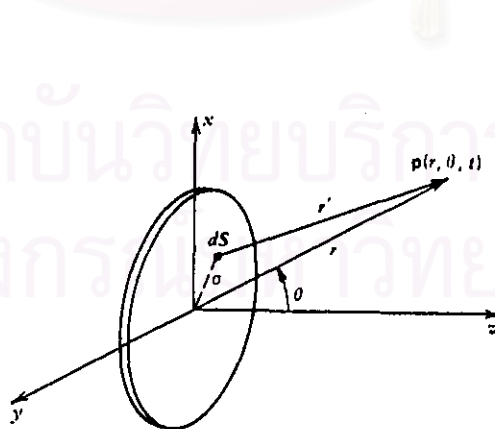
$U_0 =$ แอมพลิจูดของความเร็วของอนุภาค (เมตรต่อวินาที)

$c =$ ความเร็วของเสียงในตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน (เมตรต่อวินาที)

$\rho =$ ความหนาแน่นของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

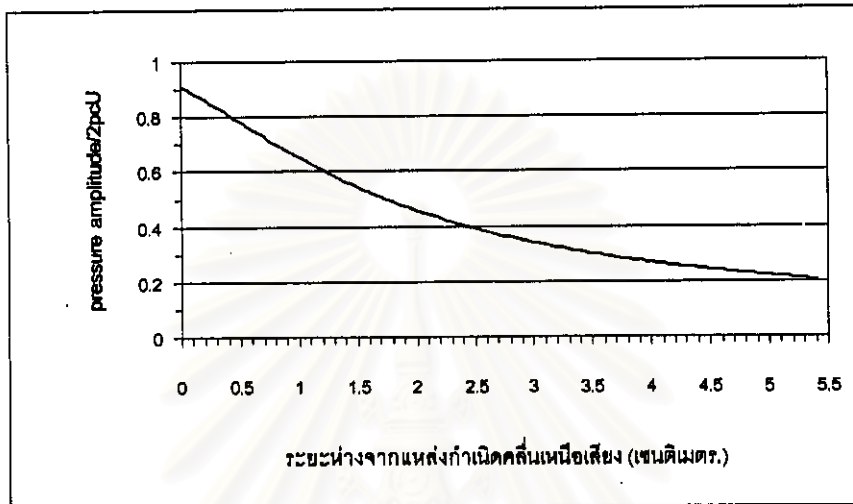
หากพิจารณาตามแนวแกน z (ที่ค่า r ต่างๆ และ $\theta = 0$) จากสมการ (6.1) สามารถคำนวณขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นเสียงตามแนวแกน z ได้ดังสมการ

$$p(r, 0) = 2\rho c U_0 \left| \sin \left\{ 0.5kr \left[\sqrt{1 + (a/r)^2} - 1 \right] \right\} \right| \dots\dots\dots(6.2)$$



รูปที่ 6.16 รูปแสดงการกำหนดแกนของการเดินทางของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด

ในการทดลอง ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.0 เซนติเมตร และใช้ความถี่เท่ากับ 27.3 กิโลเฮิรซ์ เมื่อแทนค่าในสมการ (6.2) จะได้ผลการคำนวณแอมพลิจูดของคลื่นที่มีค่าลดลงตามแนวแกน z ดังรูปที่ 6.17 (รายละเอียดของการคำนวณ ดูเพิ่มเติมจากภาคผนวก จ)



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมพลิจูดของความดันกับระยะทางที่คลื่นเหนือเสียงเดินทางไป

จากรูปที่ 6.17 พบว่า ระยะที่แอมพลิจูดของเสียงในแนวแกนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าที่แหล่งกำเนิดไม่เกิน 75 เปอร์เซ็นต์ คือ ประมาณ 4.5 เซนติเมตร ดังนั้นในการทำการทดลอง จึงเลือกทำการศึกษาระยะห่างระหว่างเยื่อแผ่นกับแหล่งกำเนิดเสียงที่ระยะ 1.5, 2.6, 3.7 และ 4.7 เซนติเมตร หรือคิดเป็น 0.27, 0.47, 0.67 และ 0.85 เท่าของความยาวคลื่น (ความยาวคลื่นของคลื่นเหนือเสียงความถี่ 27.3 กิโลเฮิรซ์ ผ่านตัวกลางน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 5.5 เซนติเมตร)

ในการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกจะทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นต่อความเข้มของคลื่นเหนือเสียงและพื้นที่ที่คลื่นเสียงตกกระทบ โดยการสังเกตจากความรุนแรง, ความเร็วและพื้นที่ที่การยุบตัวของคาวิเทชันเกิดขึ้นบนกระดาษตะกั่ว ซึ่งนำไปติดตั้งในเครื่องกรองแทนเยื่อแผ่น แล้วทำการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มและใช้ช่วงเวลาเท่ากัน คือ 30 วินาที โดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับกระดาษตะกั่วให้มีค่าต่างๆ เมื่อคลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มสูงเดินทางตกกระทบของแข็ง เช่น กระดาษ

ตะกั่ว ซึ่งมีจุดกำเนิดของฟองอยู่บนผิวของกระดาศตะกั่วนี้ รวมทั้งฟองอากาศที่อยู่ในของเหลว ดังนั้นจะมีคาบวิเทชันจำนวนมากเกิดขึ้น และเมื่อคาบวิเทชันที่อยู่ใกล้ผิวของกระดาศตะกั่วเหล่านี้ยุบตัว จะก่อให้เกิดแรงกระแทกและแรงเจาะทะลุบนผิวของกระดาศตะกั่วเกิดเป็นรูซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.18 จะเห็นว่าที่ระยะห่างน้อย จะทำให้กระดาศตะกั่วเป็นรูอย่างรวดเร็ว แต่เกิดเฉพาะในบริเวณพื้นที่ที่ตรงกับตำแหน่งการติดตั้งของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเท่านั้น ซึ่งสังเกตได้จากเส้นวงกลมในรูปซึ่งมีขนาดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงและเป็นบริเวณที่ตรงกับตำแหน่งการติดตั้งของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพอดี และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับกระดาศตะกั่วให้มากขึ้น จะสังเกตเห็นว่าความรุนแรงของคลื่นเหนือเสียงน้อยลง สังเกตได้จากการขาดเป็นรูของกระดาศตะกั่วมีพื้นที่น้อยลงหรืออาจเรียกได้ว่าเกิดช้ากว่า แต่พื้นที่ของบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบจะกว้างขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.18 การใช้กระดาษตะกั่วทดสอบความชื้นและบริเวณเสียงที่คลื่นเหนือเคลื่อนที่ผ่าน ที่ความถี่ 27.3 กิโลเฮิรซ์, กำลัง 40 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที โดยมีระยะห่างระหว่าง ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับกระดาษตะกั่ว เท่ากับ

(ก) 1.5 เซนติเมตร

(ข) 2.0 เซนติเมตร



(ค)



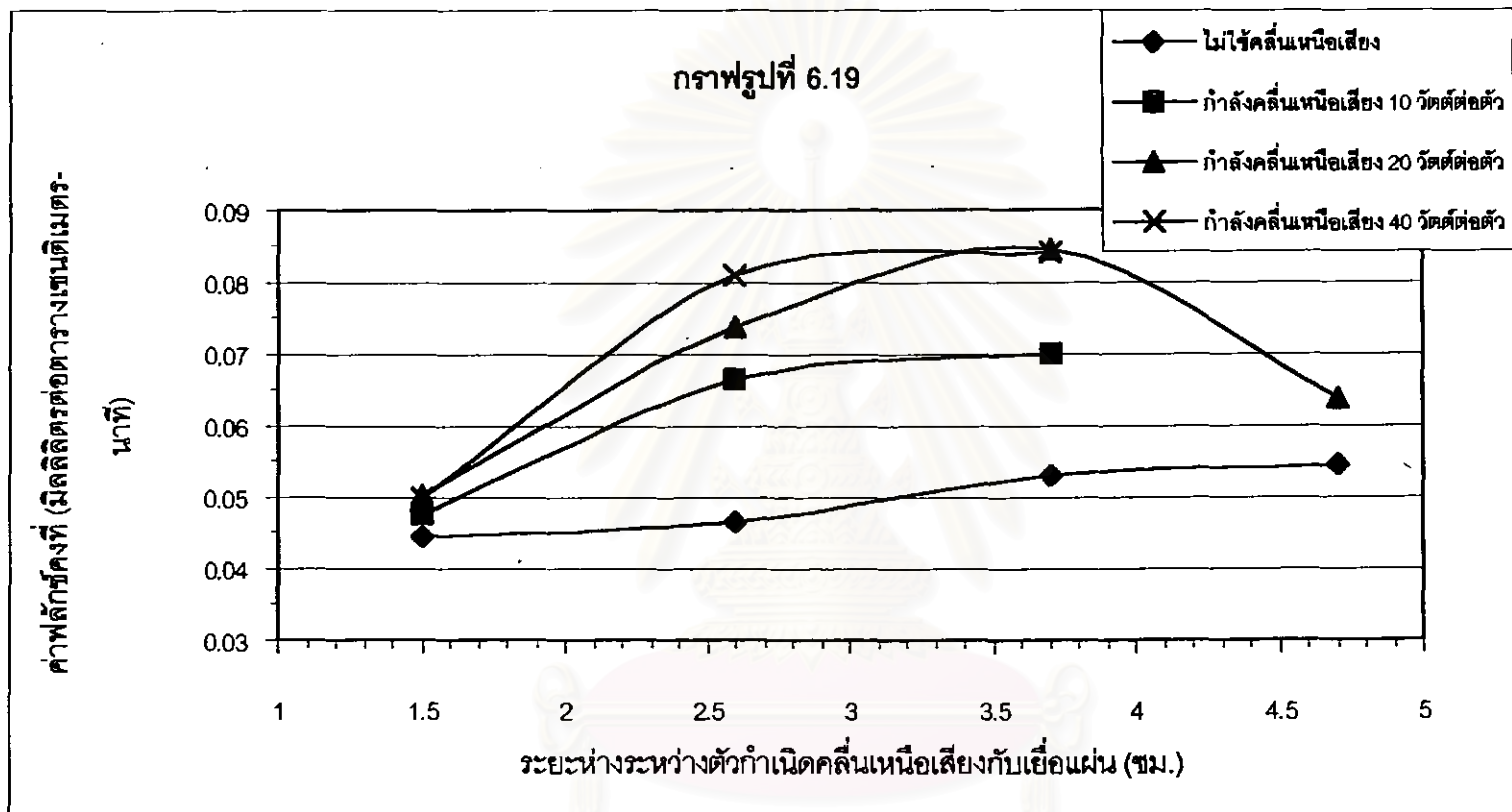
(ง)

รูปที่ 6.18 (ต่อ) การใช้กระดาษตะกั่วทดสอบความชื้นและบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน ที่ความถี่ 27.3 กิโลเฮิรตซ์, กำลัง 40 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที โดยมีระยะห่าง ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับกระดาษตะกั่ว เท่ากับ

(ค) 2.5 เซนติเมตร

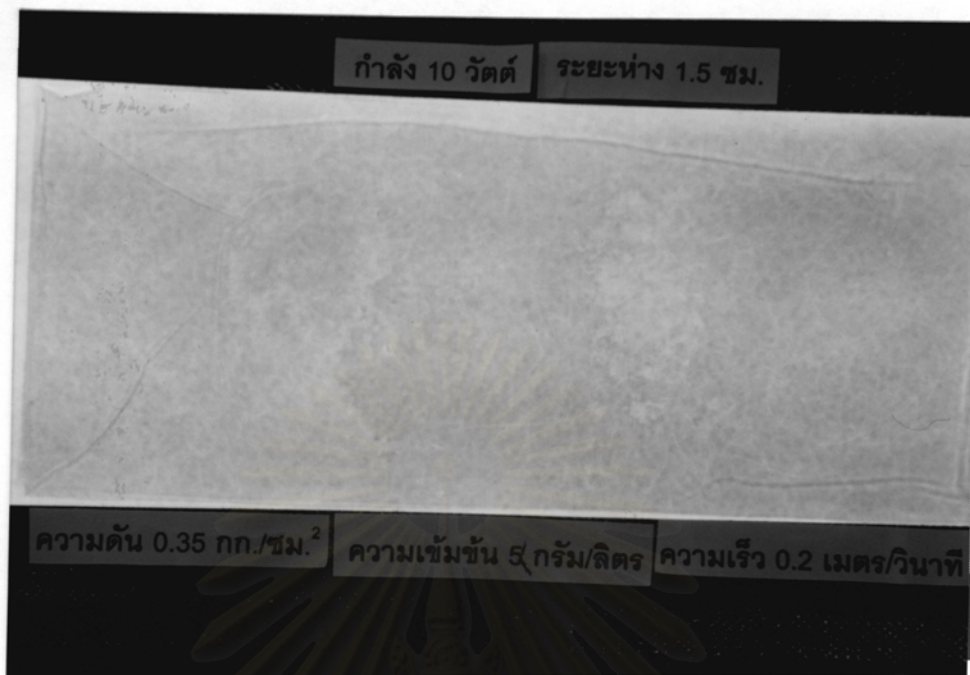
(ง) 3.0 เซนติเมตร

สำหรับการทดลองในส่วนที่สอง เป็นการวัดค่าอัตราการกรองเมื่อระยะห่างระหว่างเยื่อแผ่นกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีค่าต่างๆกัน ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 6.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์สุดท้ายกับระยะห่างระหว่างเยื่อแผ่นกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงมีค่า 0, 0.88, 1.76 และ 3.53 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาทีและความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า การใช้คลื่นเหนือเสียงจะสามารถเพิ่มฟลักซ์การกรองได้ในทุกกรณี โดยเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเท่ากัน (0.88 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 1.5, 2.6 และ 3.7 เซนติเมตร พบว่า เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียง ฟลักซ์คงที่ของการกรองจะเพิ่มขึ้นจากการกรองที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง 7.34, 42.80 และ 31.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน เมื่อมีการใช้ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้นเป็น 1.76 และ 3.53 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลอง จะเห็นได้ชัดเจนว่า สมรรถนะในการเพิ่มฟลักซ์การกรองของคลื่นเหนือเสียงมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบระหว่างที่ระยะห่าง 1.5 และ 2.6 เซนติเมตร เนื่องจากที่ระยะห่าง 1.5 เซนติเมตร ถึงแม้ว่าความเข้มของเสียงจะมีค่าสูง คือ มีค่าแอมพลิจูดของคลื่นลดลงจากตัวกำเนิดเหลือประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ แต่พื้นที่ที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบก็มีค่าน้อย ดังที่ได้แสดงผลมาแล้วกับการทดลองด้วยกระดาษตะกั่ว จึงทำให้สามารถกำจัดอนุภาคได้ในพื้นที่แคบ แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่นมากขึ้นเป็น 2.6 เซนติเมตร พื้นที่ที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบก็มีวงกว้างขึ้น ถึงแม้ว่าค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงจะลดลงเหลือประมาณ 42 เปอร์เซ็นต์ของค่าแอมพลิจูดจากตัวกำเนิดเสียงตัวเดียวกัน แต่ค่าความเข้มของเสียงนี้ก็ยังมีค่าสูงพอที่จะกำจัดอนุภาคได้เช่นเดียวกัน ค่าฟลักซ์คงที่การกรองจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระยะห่างต่อไปอีกคือ เป็น 3.7 เซนติเมตร (แอมพลิจูดจะเหลือประมาณ 31 เปอร์เซ็นต์) จะพบว่า ค่าฟลักซ์การกรองจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ความเข้มของเสียงเท่ากัน เนื่องจากว่า ถึงแม้การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบ แต่ในขณะเดียวกัน ก็เป็นการลดขนาดแอมพลิจูดของคลื่นด้วย ดังนั้นความรุนแรงของคavitation ที่เกิดขึ้นก็มีค่าลดลง รวมไปถึงค่าความเข้มเสียงที่ลดลงนี้ อาจจะมีค่าไม่สูงพอที่จะเอาชนะจุดที่ทำให้เกิดคavitation (cavitation threshold) ได้ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ระยะห่าง 4.7 เซนติเมตร สมรรถนะในการเพิ่มของฟลักซ์การกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะ 3.7 เซนติเมตร สำหรับเยื่อแผ่นที่ใช้ในการทดลอง ทั้งที่ 3 ระยะห่างได้นำมาแสดงในภาพถ่ายดังรูปที่ 6.20 ซึ่งพอจะสังเกตเห็นบริเวณที่คลื่นเหนือเสียงสามารถกำจัดอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่นได้ ซึ่งก็แสดงผลในลักษณะที่สอดคล้องกับผลการทดลองและการวิเคราะห์ในส่วนที่หนึ่ง

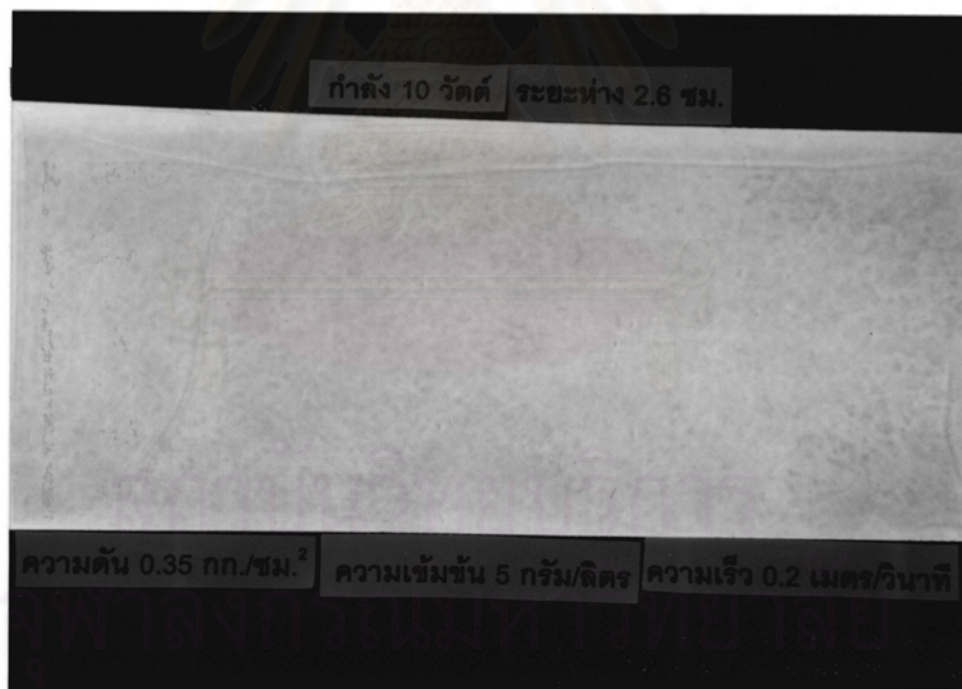


รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์คงที่กับระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแก้วหู เมื่อใช้กำลังแตกต่างกัน ที่ความดันคร่อมเยื่อแก้วหู 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร

สำหรับการทดลองส่วนที่สาม เป็นการทดลองโดยวิธีการเรืองแสงด้วยสารเคมี (chemiluminescence) ทำได้โดยการใช้สารละลายลูมินอล (3-Aminophthalhydrazide) เป็นสารในสายป้อน ผ่านเข้าเครื่องกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นเป็นระยะ 1.5, 2.6 และ 3.7 เซนติเมตรตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพถ่ายในรูปที่ 6.21 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมากขึ้น พื้นที่ที่คลื่นเหนือเสียงตกกระทบซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีแสงสีฟ้าจะมีบริเวณกว้างกว่าที่ระยะห่างน้อย เนื่องจากภาพถ่ายกระทำในทิศทางตั้งฉากกับเครื่องกรอง ซึ่งเยื่อแผ่นบางส่วนจะถูกบังด้วยตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 2 ตัวที่ติดตั้งอยู่ด้านนอกของเครื่องกรองพอดี สังเกตได้จากบริเวณที่มีการเรืองแสงที่เกิดขึ้นในกรณีระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร การเรืองแสงเป็นสีฟ้าจะเกิดขึ้นเฉพาะในส่วนพื้นที่ที่ตรงกับตำแหน่งของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงพอดี จึงแทบจะไม่สามารถสังเกตบริเวณที่มีการเรืองแสงได้ ส่วนรูปที่ 6.21 (ข) และ (ค) การเรืองแสงจะเกิดขึ้นทั้งในบริเวณที่ตรงกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (แต่มองไม่เห็นจากภาพถ่ายเพราะถูกบัง) และเกิดขึ้นในบริเวณรอบข้างด้วย ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณที่มีแสงสีฟ้าในภาพถ่าย



(ก)

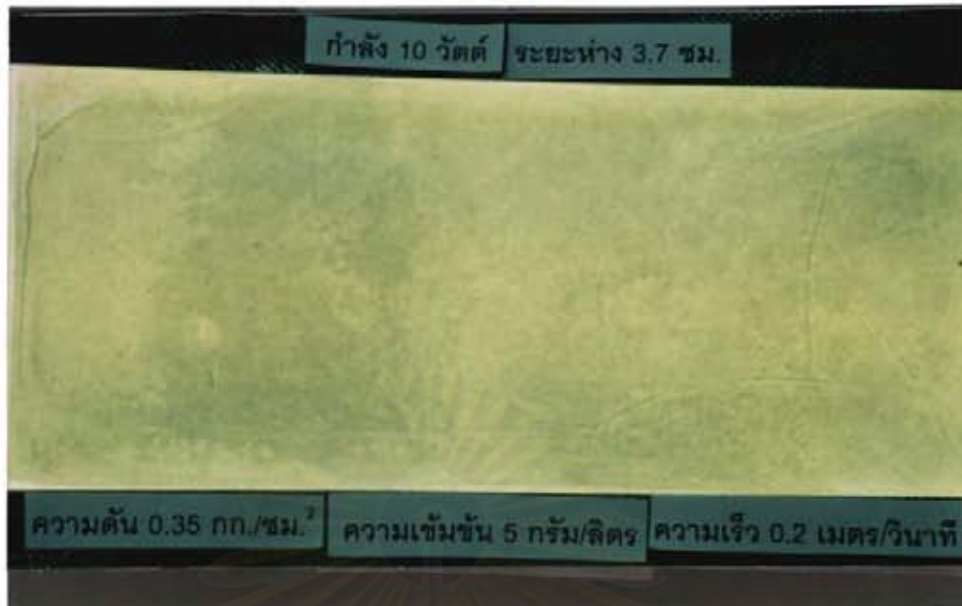


(ข)

รูปที่ 6.20 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่มีการส่งผ่านคลื่นเหนือเสียง
ที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างกัน

(ก) 1.5 เซนติเมตร

(ข) 2.6 เซนติเมตร



(ค)

รูปที่ 6.20 (ต่อ) ภาพถ่ายแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่มีการส่งผ่านคลีนเหนือเสียง ที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลีนเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างกัน

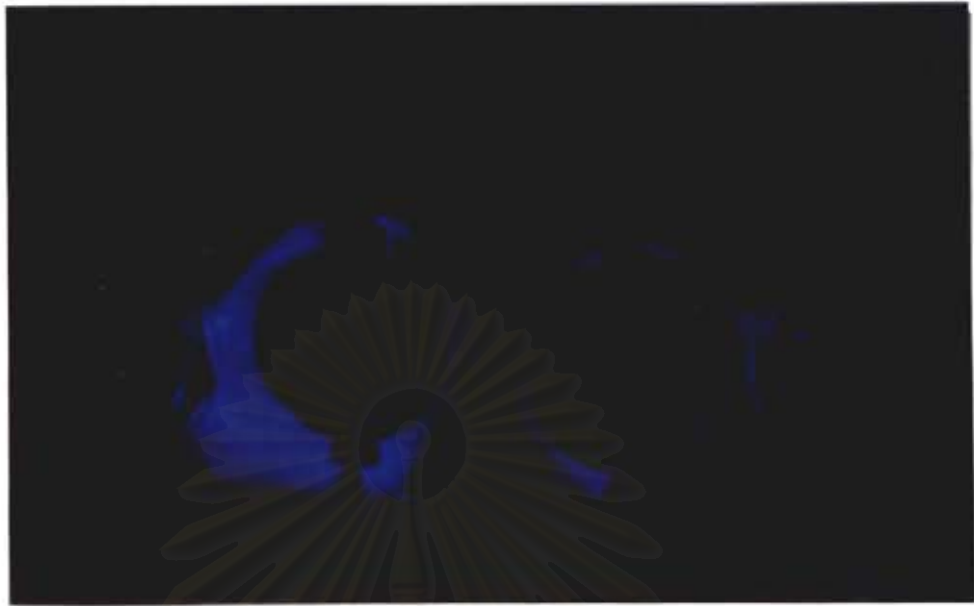
(ค) 3.7 เซนติเมตร



(ก)

รูปที่ 6.21 ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงด้วยสารเคมี (chemiluminescence) เนื่องจากคลีนเหนือเสียง ที่ระยะระหว่างตัวกำเนิดคลีนเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างกัน

ก) 1.5 เซนติเมตร



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.21 (ต่อ) ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงด้วยสารเคมี (chemiluminescence) เนื่องจากคลื่น
เหนือเสียง ที่ระยะระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเซ็นเซอร์มีค่าต่างกัน

ข) 2.6 เซนติเมตร

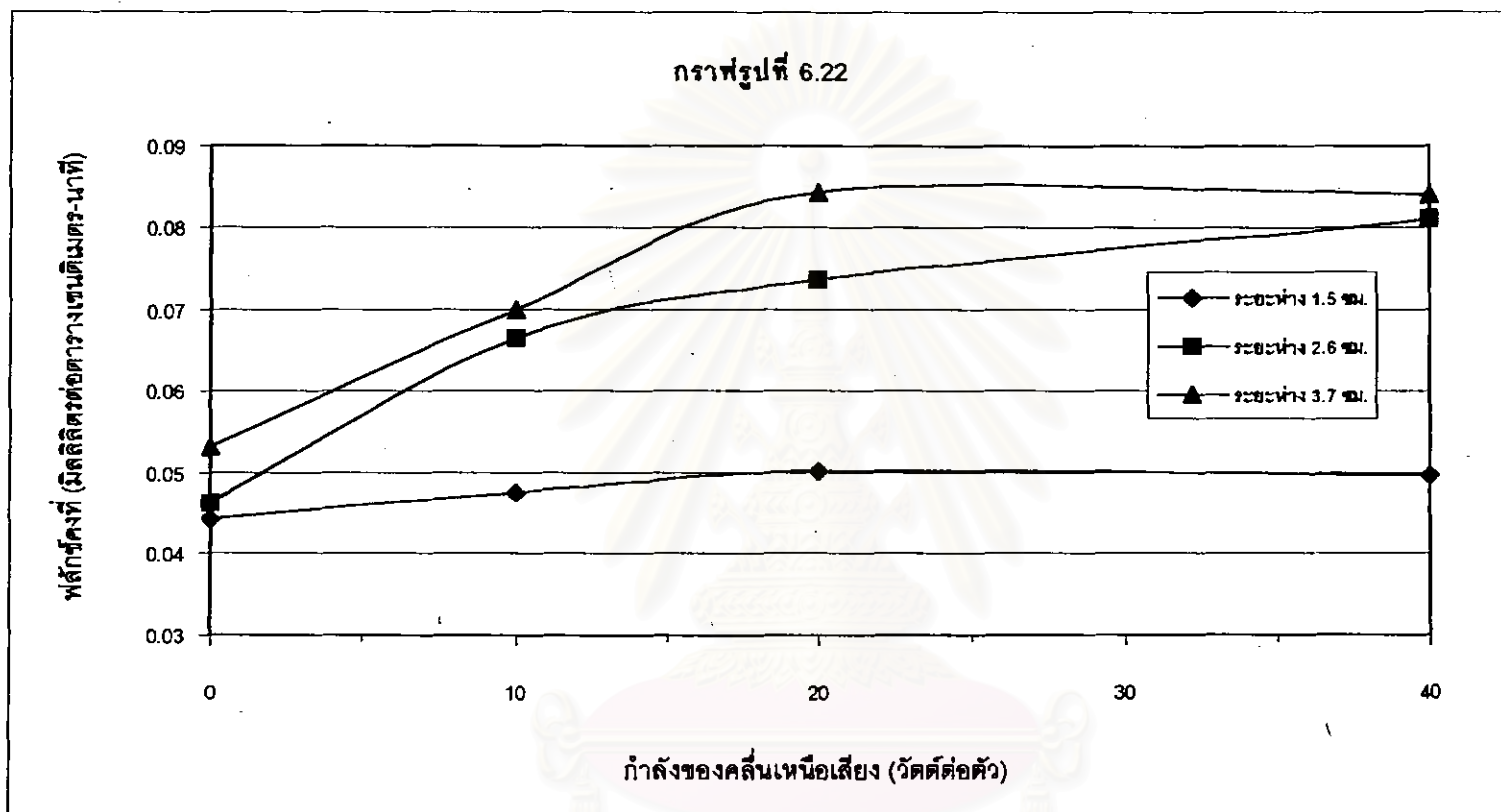
ค) 3.7 เซนติเมตร

สำหรับกรณีที่ทำการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นที่เหมาะสมนั้นคือระยะ 3.7 เซนติเมตร แต่เนื่องจากที่ระยะ 3.7 เซนติเมตร จะทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในสายป้อนได้ในช่วงกว้างเพียงพอที่จะศึกษาต่อไป เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดของปั๊มที่ใช้ ดังนั้นจึงเลือกระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่า 2.6 เซนติเมตร เป็นระยะที่เลือกใช้เพื่อทำการทดลองศึกษาตัวแปรอื่นต่อไป

6.1.3 ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง

ในการทดลองศึกษาจะใช้ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 2 ตัวติดตั้งจากภายนอกเครื่องกรองน้ำ เมื่อก้าวถึงคำว่า กำลังของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง จะต้องพิจารณาความเข้มของคลื่นเหนือเสียงจากตัวกำเนิดคลื่น คือ ต้องทราบพื้นที่หน้าตัดในการปล่อยคลื่นเหนือเสียงนั้น เนื่องจากความเข้มของคลื่นเหนือเสียงเป็นตัวแปรสำคัญที่จะบอกถึงการเกิดคาวิตีชัน แต่เพื่อความสะดวกในการแสดงตัวเลขจะขอแสดงในรูปของกำลังของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 10, 20 และ 40 วัตต์ต่อตัว แทนความเข้มของคลื่นเหนือเสียง 0.88, 1.76 และ 3.53 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.22 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์คงที่กับกำลังของคลื่นเหนือเสียงที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่นเท่ากับ 1.5, 2.6 และ 3.7 ซม., ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาทีและความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่า ที่ระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นเท่ากัน การเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงจะทำให้อัตราการกรองที่ได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มแอมพลิจูดของคลื่น (P_w) จะส่งผลให้ค่าความดันที่ได้จากการยุบตัวของคาวิตีชันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการ (4.3) แต่อย่างไรก็ตาม จะพบว่าที่ระยะห่างน้อย คือที่ 1.5 ซม. การเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงจะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถึงแม้จะเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงเป็น 2 หรือ 4 เท่าตัว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความดันสูงสุดที่เกิดจากการยุบตัวของคาวิตีชันและขนาดของคาวิตีชันก่อนจะเกิดการยุบตัวจะขึ้นกับแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียง ดังสมการที่ (4.3) และ (4.9) ตามลำดับ เมื่อแอมพลิจูดมีขนาดมากขึ้น ขนาดของคาวิตีชันก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการยุบตัวมีค่ามากขึ้น จนอาจจะมามีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการยุบตัวอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ค่าความดันที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวจึงมีค่าลดลงถึงแม้จะเพิ่มแอมพลิจูดของคลื่นก็ตาม นั่นคือการเพิ่มความเข้มของคลื่นเสียงก็มีขีดจำกัดเช่นกัน ดังผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเข้มเสียงหรือแอมพลิจูดของคลื่นมากกว่า 1.76 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มของอัตราการกรอง เนื่องจากความดันที่เกิดจากการยุบตัวของคาวิตีชันซึ่งส่งผลต่อการกำจัดอนุภาคจะมีค่าลดลง แต่คลื่นเหนือเสียงยังสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้ระดับหนึ่ง ถึงแม้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิตีชันจะลดลงก็ตาม โดยการเพิ่มแอมพลิจูดให้สูงขึ้นจะทำให้



รูปที่ 6.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์คงที่กับกำลังของคลื่นเหนือเสียง เมื่อระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่นมีค่าต่างๆ ที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิจากการยุบตัวของคาวีเทชันมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังสมการที่ (4.2) ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอัตราการกรองจึงสูงขึ้นได้

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ระยะห่างเพิ่มขึ้น คือที่ 2.6 ซม. จะพบว่า การเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงจะทำให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะจากกำลัง 10 วัตต์ เป็น 20 วัตต์ เนื่องจากเมื่อระยะเพิ่มขึ้น ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงที่เดินทางไปถึงอนุภาคจะมีค่าลดลงดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.1.2 ดังนั้นที่กำลังเพิ่มขึ้นเป็น 20 วัตต์ ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงที่เดินทางถึงอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่นก็ยังมีค่าไม่มากเกินไปที่จะทำให้อคาวีเทชันมีขนาดใหญ่จนกระทั่งการยุบตัวจะเกิดอย่างไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการเพิ่มกำลังหรือความเข้มเสียงจึงเป็นการเพิ่มความรุนแรงของคาวีเทชันที่เกิดขึ้น ส่งผลให้อัตราการกรองที่ได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มกำลังเป็น 40 วัตต์ ผลของคลื่นเหนือเสียงก็เริ่มมีน้อยลง ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟที่มีค่าน้อยลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับที่ระยะห่าง 1.5 ซม. ดังที่กล่าวมาแล้ว และสำหรับที่ระยะห่าง 3.7 ซม. การเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงจาก 10 วัตต์ เป็น 20 วัตต์ ก็จะมีผลต่ออัตราการกรองให้เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน ในขณะที่เมื่อเพิ่มกำลังเป็น 40 วัตต์ อัตราการกรองที่ได้มีค่าคงที่เมื่อเทียบกับที่กำลัง 20 วัตต์ ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับที่กล่าวแล้วข้างต้น

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าความต้านทานการกรองที่กำลังและระยะห่างต่างๆกัน จากการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ระยะห่าง 2.6 และ 3.7 ซม. การใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานเนื่องจากการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น (R_p) ลดลงและความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุน (R_p) มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานรวม (R_t) มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้พลังงานคลื่นเสียงที่มากขึ้นกับกระบวนการกรอง แต่การเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงก็มีข้อจำกัด ดังเห็นได้จากการทดลองที่ผ่านมาว่า เมื่อเพิ่มพลังงานจาก 20 วัตต์ เป็น 40 วัตต์ ค่าฟลักซ์การกรองก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว และยังอาจส่งผลให้อนุภาคหรือเยื่อแผ่นถูกทำลาย และสำคัญที่สุด ด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ จึงจำเป็นต้องศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดเพื่อให้ได้สมรรถนะการกรองสูงสุด พลังงานจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกปฏิบัติงาน เนื่องจากการให้พลังงานเสียงมากเกินไปจะทำให้สูญเสียพลังงานบางส่วนไปโดยไม่เกิดประโยชน์ สำหรับในงานวิจัยนี้แหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นไม่สามารถทนการดำเนินการที่กำลัง 40 วัตต์ได้ติดต่อกันเป็นเวลานาน เพราะจะเกิดความร้อนขึ้นภายในอุปกรณ์ส่งกำลังไฟฟ้ารวมทั้งตัวกำเนิดเอง, การสั่นสะเทือนของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง, การผุกร่อนของแผ่นอะคริลิก, ปัญหาด้านเสียง ดังนั้นในการทำการทดลองต่อไปจำเป็นต้องลดพลังงานให้เหลือ 20 วัตต์ต่อตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เพื่อจะรักษาอุปกรณ์ให้ปฏิบัติการได้อย่างต่อเนื่อง

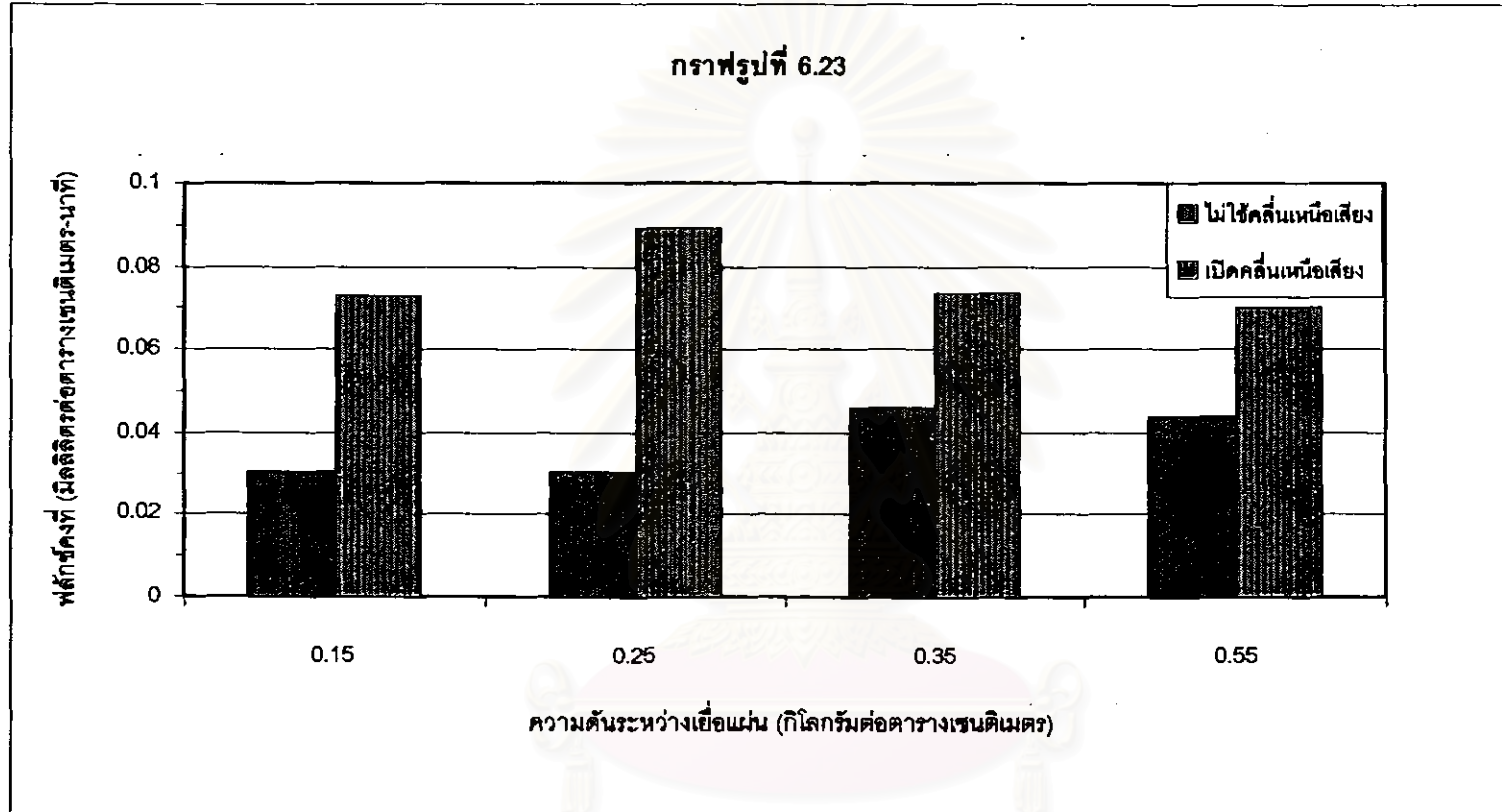
ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานการกรองที่กำลังของคลื่นเหนือเสียงและระยะห่างมีค่าต่างๆ กัน

กำลัง (วัตต์)	ค่าความต้านทาน (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^6$ ที่ระยะ											
	1.5 เซนติเมตร				2.6 เซนติเมตร				3.7 เซนติเมตร			
	R_m	R_c	R_p	R_l	R_m	R_c	R_p	R_l	R_m	R_c	R_p	R_l
0	3.96	550.11	9.12	563.19	4.45	547.88	4.48	556.82	4.48	474.36	4.43	483.27
10	4.34	538.92	8.74	552.00	4.39	364.32	13.58	382.29	4.52	354.56	8.56	367.66
20	4.18	501.96	6.14	512.27	4.13	336.93	7.42	348.48	4.38	289.18	11.38	304.92
40	4.52	499.39	8.45	512.36	4.35	293.39	9.62	307.36	4.21	290.75	10.57	305.53

6.1.4 ความดันคร่อมเยื่อแผ่น

จากรูปที่ 6.23 เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนความดันคร่อมเยื่อแผ่นตั้งแต่ 0.15, 0.25, 0.35 และ 0.55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ค่าอัตราการกรองที่ได้เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียง จะมีค่าสูงกว่าค่าอัตราการกรองที่ได้จากการกรองปกติ 2.43, 2.96, 1.60 และ 1.60 เท่าตามลำดับ โดยที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะให้ค่าฟลักซ์การกรองสูงสุด คือ เท่ากับ 0.862 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเซนติเมตร-นาทิจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของการกรองเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นก็จะทำให้อุณหภูมิที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นอัดตัวกันแน่นขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการสะสมบนผิวเยื่อแผ่น (R_c) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลตรงกันข้ามคือ ทำให้ค่าฟลักซ์ของการกรองลดลง

ในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับการกรอง จะต้องพิจารณาทั้งทฤษฎีของการกรองและของคลื่นเหนือเสียงรวมกันไปเพื่อหาค่าความดันที่เหมาะสมต่อไป ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองว่ามีค่าความดันที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวที่จะช่วยเพิ่มค่าฟลักซ์การกรองได้มากที่สุด การเพิ่มความดันคร่อมเยื่อแผ่นหรือของระบบนั้น จะส่งผลให้ค่าความเข้มเสียงต่ำสุดที่ต้องการในการเกิดคาวิเทชัน (cavitation threshold) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการเกิดคาวิเทชันที่ความดันคร่อมเยื่อแผ่นสูงขึ้นจะยากขึ้น ในทางตรงข้าม จากสมการ (4.3) และ (4.4) จะเห็นว่า การเพิ่มความดันของระบบ (ค่า P_0 ในสมการ) จะทำให้คาวิเทชันที่เกิดขึ้นนี้ยุบตัวได้รวดเร็วขึ้น และมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้น ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันคร่อมเยื่อแผ่นต่อค่าความเข้มเสียงต่ำสุดที่ทำให้



รูปที่ 6.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์คงที่กับความดันคร่อมเยื่อแผ่น
 ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร
 และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร

เกิดคาวิตีชันและความรุนแรงของคาวิตีชันที่เกิดการยุบตัวขึ้น มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลง อัตราการกรองในทิศทางตรงข้ามกัน และเมื่อพิจารณาพร้อมกับทฤษฎีของการกรองจึงทำให้เกิดค่า ความดันคร่อมเยื่อแผ่นที่เหมาะสมค่าสำหรับการใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรอง

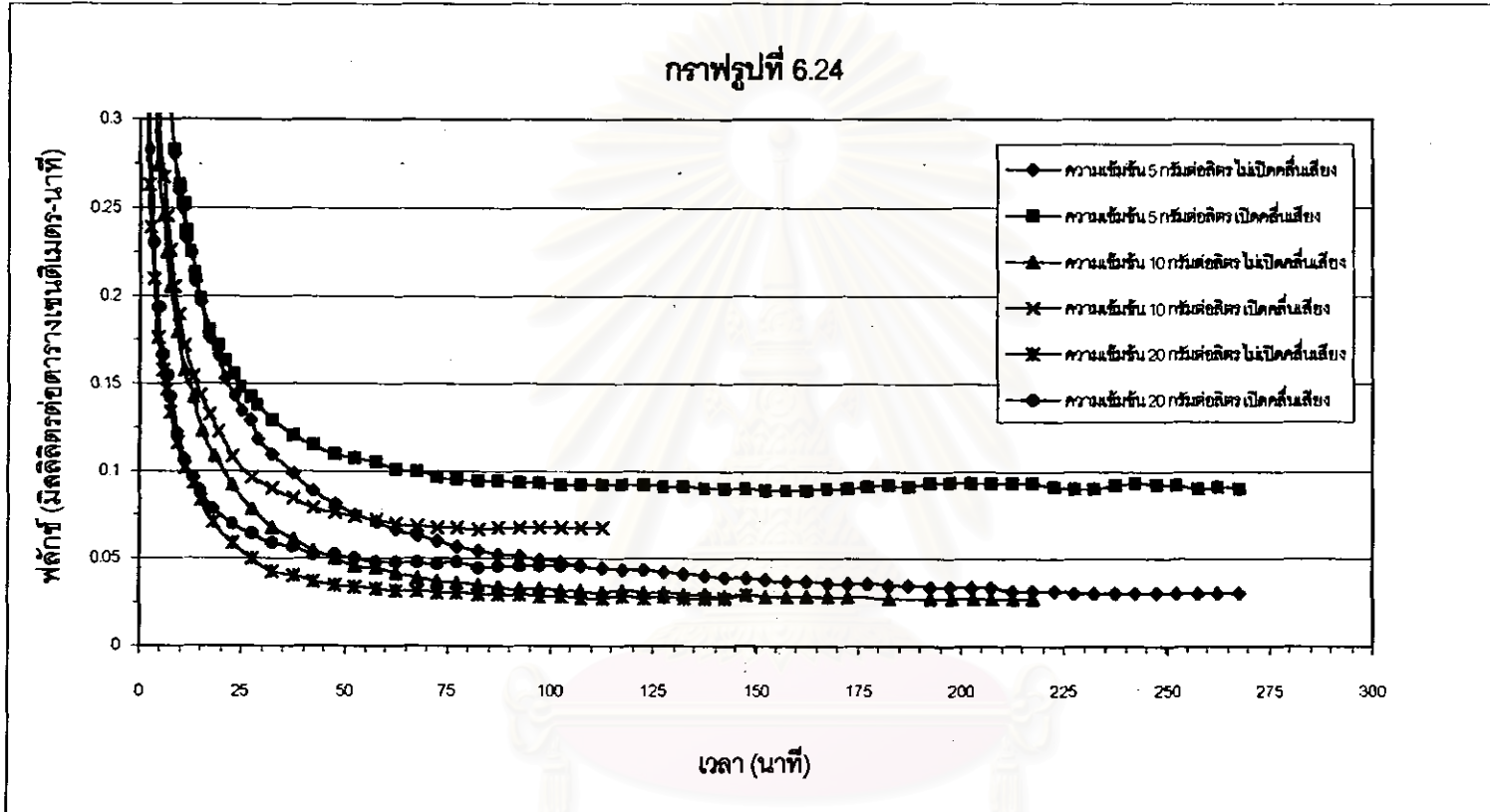
ในการกำจัดอนุภาคซึ่งอาศัยแรงที่เกิดจากการยุบตัวและปริมาณของคาวิตีชันที่มากพอ จึงจะทำให้การกำจัดอนุภาคเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยค่าความต้านทานการกรองจาก การทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.3 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานรวมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามความ ดันคร่อมเยื่อแผ่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคลื่นเหนือเสียงก็สามารถลดค่าความต้านทานรวมของระบบให้มีค่า ลดลงได้จนทำให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นความดันคร่อมเยื่อแผ่นซึ่งเป็นความดันในตัว กลางที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านเป็นตัวแปรสำคัญอันหนึ่งสำหรับระบบการกรองที่มีการใช้คลื่น เหนือเสียง

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่นต่างๆ

ความดัน (กิโลกรัม ต่อตาราง เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานการกรอง (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^6$							
	ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง				เปิดคลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 20 วัตต์			
	R_m	R_c	R_p	R_t	R_m	R_c	R_p	R_t
0.15	3.38	355.11	7.42	365.91	3.38	135.37	11.63	150.38
0.25	3.83	598.11	7.92	609.86	4.05	183.50	15.73	203.28
0.35	4.48	473.36	4.43	482.27	4.38	289.16	11.38	304.92
0.55	5.24	911.18	5.33	921.75	5.09	553.53	16.37	574.99

6.1.5 ความเข้มข้นของสายป้อน

รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ มีค่าเท่ากับ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ทั้งในกรณีที่มีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง จากผลการ ทดลองจะพบว่า เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ค่าฟลักซ์คงที่ของการกรองจะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 0.027 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที แสดงว่าค่าฟลักซ์คงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น ของสารละลายยีสต์ที่ใช้กรอง (ในช่วงของค่าความเข้มข้นที่ทำการทดลอง) แต่ทำให้ระบบเข้าสู่ ภาวะการกรองคงที่ได้เร็วขึ้นถ้าความเข้มข้นมีค่ามากขึ้น ค่าความต้านทานการกรอง ดังจะเห็นได้ จากผลการทดลองดังตารางที่ 6.4 จะเห็นว่าค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากอนุภาคบนผิว เยื่อแผ่น (R_c) มีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกความเข้มข้น นอกจากนั้นแล้ว จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่ม



รูปที่ 6.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อใช้ความเข้มข้นยีสต์มีค่าต่างๆ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อดัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร

ขึ้นจะมีผลทำให้ค่าพลັกซ์การกรองเข้าสู่ค่าคงที่เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคที่มีปริมาณมาก ทำให้สามารถสะสมบนผิวเยื่อแผ่นได้รวดเร็ว

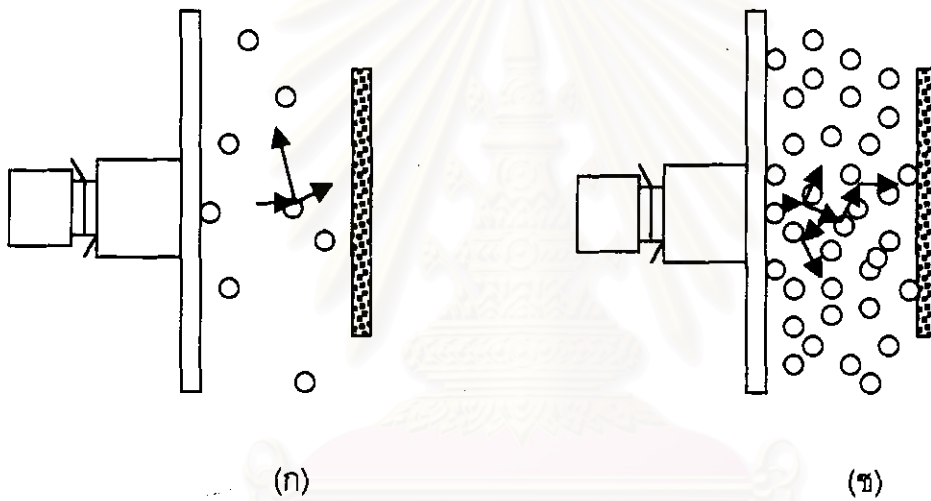
สำหรับในกรณีที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง จะพบว่า คลื่นเหนือเสียงจะสามารถช่วยเพิ่มค่าพลັกซ์การกรองได้ที่ทุกความเข้มข้น โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอีสต์เท่ากับ 5, 10 และ 20 กรัมต่อลิตร พลັกซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงคิดเป็น 200, 150 และ 62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นั่นคือ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น สมรรถนะของคลื่นเหนือเสียงต่อการกำจัดอนุภาคจะมีค่าน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงขึ้น จะเกิดการสะท้อนและหักเหเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 6.25 จึงส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นที่ตกกระทบบนชั้นอนุภาคมีค่าลดลง เกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นจึงทำให้สามารถกำจัดอนุภาคบนเยื่อแผ่นได้น้อยลง

เพื่อยืนยันคำอธิบายเกี่ยวกับการสะท้อนและหักเหของคลื่นเมื่อเดินทางไปในสารละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคที่ต่างกัน จึงได้ทำการทดลองโดยการวัดค่าความต่างศักย์ของพลังงานไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆในแนวตั้งในภาชนะที่บรรจุด้วยสารละลายอีสต์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 4 ค่า ซึ่งมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ก้นภาชนะ ดังรูปที่ 6.26 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือ ไฮโดรโฟน (hydrophone) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า ที่พลังงานเสียงที่มีค่าแอมพลิจูดสูง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากไฮโดรโฟนก็จะมีค่าสูง จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.5 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายอีสต์สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ (หรือค่าแอมพลิจูดของคลื่นนั่นเอง) ที่วัดได้ในตำแหน่งต่างๆมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับค่าที่ใกล้แหล่งกำเนิดเสียง (คือ ที่ระยะห่างเท่ากับ 0 ซม.) โดยเฉพาะที่ค่าความเข้มข้นอีสต์เท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จะมีค่าลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตาม การวัดพลังงานเสียงในรูปของพลังงานไฟฟ้าในลักษณะนี้สามารถกระทำได้เฉพาะที่ความเข้มเสียงต่ำๆ เนื่องจากขีดจำกัดของไฮโดรโฟน แต่ในงานวิจัยนี้ เป็นการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มสูง ดังนั้นเราไม่สามารถใช้ทฤษฎีของคลื่นเสียงโดยทั่วไปมาอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด เนื่องจากทฤษฎีเหล่านั้นมีสมมติฐานว่า เป็นคลื่นเสียงที่มีแอมพลิจูดต่ำมาก ถึงกระนั้นก็ตาม พฤติกรรมของคลื่นเสียงก็มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน จึงพอนำมายืนยันคำอธิบายของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า หากมีปริมาณของอนุภาคในตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านมากขึ้น จะส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นมีค่าลดลงเนื่องจากการสะท้อนและหักเหของคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคและน้ำมีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้การใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรองที่มีค่าความเข้มข้นของอนุภาคหรืออีสต์สูงขึ้น พลังงานของคลื่นที่ส่งผ่านมายังอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่นมีค่าต่ำลง สมรรถนะของคลื่นเหนือเสียงต่อการกำจัดอนุภาคเหล่านี้จึงน้อยลงตามลำดับ

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าความต้านทานการกรองที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	ค่าความต้านทานการกรอง (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^9$							
	ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง				เปิดคลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 20 วัตต์			
	R_m	R_c	R_p	R_t	R_m	R_c	R_p	R_t
5.0	3.82	598.11	7.92	609.85	4.05	183.50	15.73	203.28
10.0	3.81	614.80	8.66	627.27	3.92	257.14	13.37	274.43
20.0	3.92	659.65	9.89	673.46	3.95	380.30	16.38	400.63

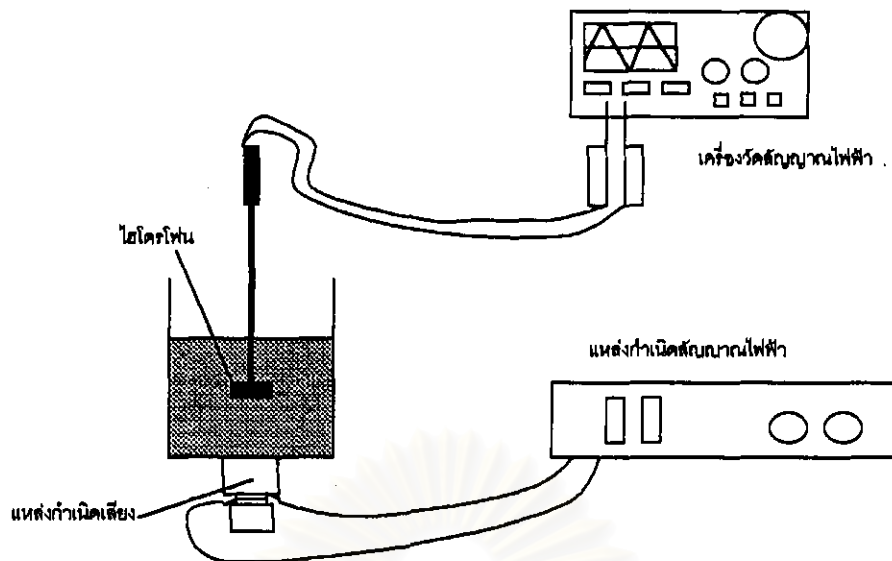


รูปที่ 6.25 รูปแสดงการเปรียบเทียบของการเดินทางของคลื่นเหนือเสียงผ่านตัวกลางที่มี

(ก) ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ

(ข) ความเข้มข้นของอนุภาคสูง

สถาบันวิจัยการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.26 แผนผังแสดงวิธีการทดสอบผลของความชื้นของอนุภาคในตัวกลางที่คลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่าน

ตารางที่ 6.5 ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อความชื้นของตัวกลางแตกต่างกัน

ความชื้น (กรัมต่อลิตร)	ค่าความต่างศักย์ (มิลลิโวลต์) ที่วัดได้ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (เซนติเมตร)					
	0.0	1.0	1.5	3.0	3.5	4.5
0	320	200	120	144	160	112
5	336	184	136	136	160	112
10	392	184	120	136	168	128
20	80	56	32	40	32	24

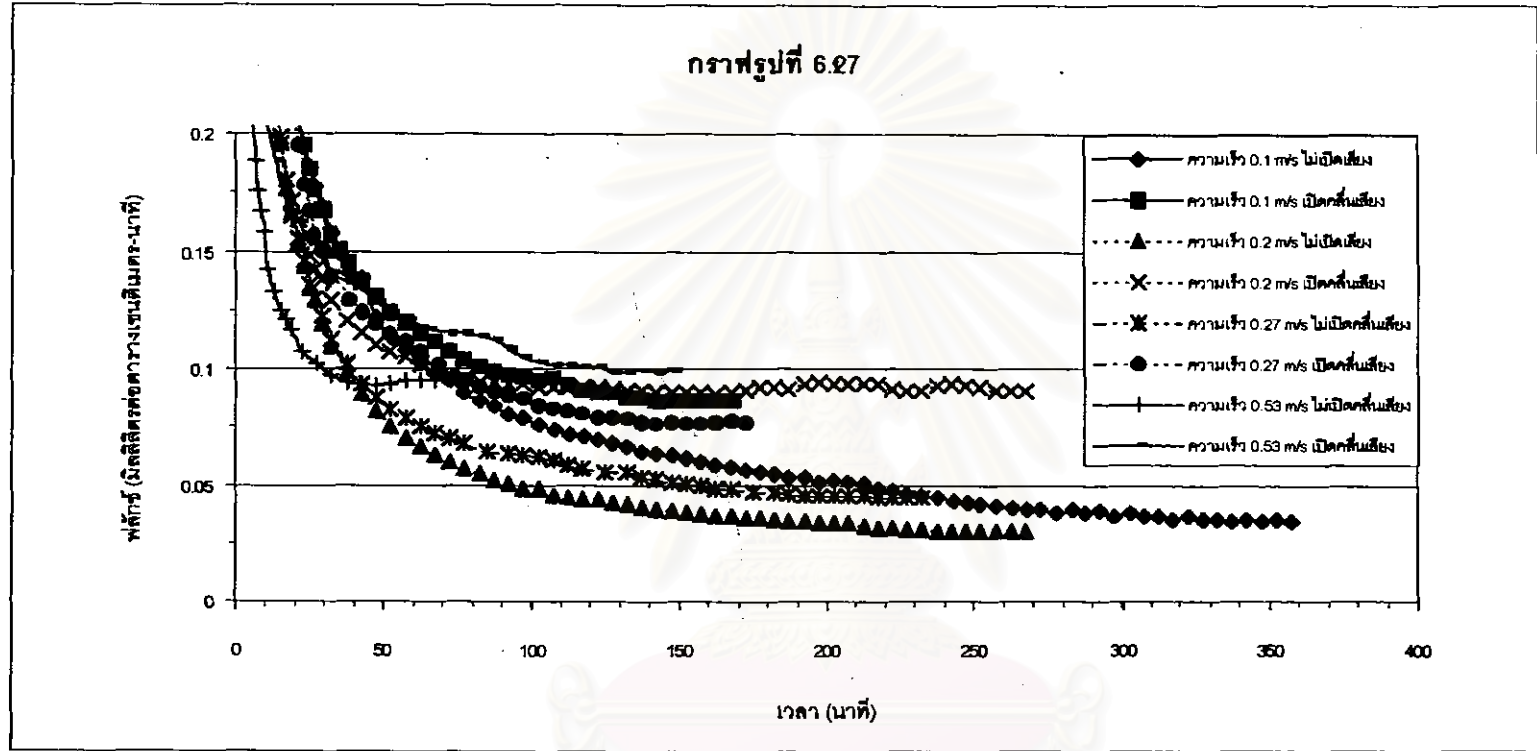
6.1.6 ความเร็วของสายป้อน

จากกราฟรูปที่ 6.27 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์การกรองกับเวลา ที่ค่าความเร็วของสายป้อนต่างๆ ทั้งในกรณีที่มีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง โดยเฉพาะที่ความเร็วของสายป้อนมีค่าต่ำ ค่าฟลักซ์คงที่ของการกรองจะมีค่าเท่ากันโดยประมาณ แต่เมื่อความเร็วของสายป้อนมีค่าสูงขึ้น คือที่ 0.53 เมตรต่อวินาที ค่าฟลักซ์คงที่ของการกรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากความเร็วของสายป้อนซึ่งจะช่วยในการกำจัดอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่น ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 เมื่อมีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ความเร็วของสายป้อนเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.27 และ 0.53 เมตรต่อวินาที ค่าฟลักซ์คงที่ของการกรองจะมีค่ามากขึ้นคิดเป็น 149, 200, 72 และ 6.1 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับเมื่อเทียบกับเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง เมื่อความเร็วของสายป้อนมีค่าต่ำคือระหว่าง 0.1 และ 0.27 เมตรต่อวินาที สมรรถนะของคลื่นเหนือเสียงต่อการกำจัดอนุภาคจะไม่ขึ้นกับค่าความเร็วของสายป้อน หากพิจารณาในแง่ผลของความเร็วของสายป้อนที่มีต่อลักษณะของคลื่นที่เดินทางผ่าน เนื่องจากความเร็วของเสียงในน้ำมีค่าประมาณ 1500 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วของสายป้อนที่ใช้ในการทดลองมาก ดังนั้นความเร็วของสายป้อนจึงไม่น่าส่งผลต่อลักษณะของคลื่นเสียงที่เดินทางผ่าน แต่เนื่องจากค่าความเร็วที่ใช้ในการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าความเร็วของสายป้อนที่ใช้กันทั่วไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยในการกำจัดอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่นด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากความเร็วของสายป้อนที่มีค่าสูง คือ มากกว่า 1 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงไม่ส่งผลให้เห็นความแตกต่างในช่วงความเร็วของสายป้อนที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วของสายป้อนสูงขึ้น คือที่ 0.53 เมตรต่อวินาที แรงเฉือนที่เกิดจากสายป้อนเริ่มส่งผลต่อค่าฟลักซ์คงที่ของการกรอง ดังนั้น ความหนาของชั้นอนุภาคจะมีค่าน้อยลงมากเมื่อเทียบกับที่ความเร็วสายป้อนอื่นๆ ซึ่งจะสังเกตได้จากค่าความต้านทานการกรองของอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น (R_p) ดังแสดงในตารางที่ 6.6 มีค่าความต้านทานรวมที่ความเร็ว 0.53 เมตรต่อวินาที น้อยกว่าค่าที่ความเร็วในสายป้อนต่ำกว่ามาก ดังนั้นสมรรถนะของคลื่นเหนือเสียงต่อการกำจัดอนุภาคจึงมีค่าน้อยลง เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของชั้นอนุภาคมีปริมาณอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นต่ำอยู่แล้ว การกำจัดอนุภาคเหล่านี้ด้วยคลื่นเหนือเสียงจึงกระทำได้อย่างดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ความเร็วของสายป้อนมีค่าต่ำ นอกจากนั้นเมื่อความเร็วของสายป้อนสูงขึ้น การพัดพาควิเทชันที่เกิดขึ้นให้ออกไปจากระบบก็จะมีมากขึ้น ซึ่งควิเทชันเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญในการกำจัดอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น ดังนั้นผลของคลื่นเหนือเสียงจึงลดลง

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าความต้านทานการกรองที่ความเร็วของสายป้อนต่างๆ

ความเร็ว ในสาย ป้อน (เมตร ต่อวินาที)	ค่าความต้านทานการกรอง (ต่อเซนติเมตร) $\times 10^6$							
	ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง				เปิดคลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 20 วัตต์			
	R_m	R_c	R_p	R_t	R_m	R_c	R_p	R_t
0.10	3.72	521.84	9.92	535.48	3.75	194.96	14.86	213.57
0.20	3.82	598.11	7.92	609.85	4.05	183.50	15.73	203.28
0.27	3.63	403.03	7.57	414.23	3.92	225.58	11.76	241.26
0.53	3.79	186.91	6.38	197.08	3.81	172.34	10.54	186.69



รูปที่ 6.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อใช้ความเร็วของสายป้อนมีค่าต่างๆ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันक्रमเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.7 ช่วงเวลาในการปลดปล่อยคลื่น

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของระยะเวลาที่เปิดคลื่นเหนือเสียงและตำแหน่งเวลาในการเปิดคลื่นเหนือเสียงในระหว่างการกรอง ซึ่งได้แบ่งการทดลองเป็น 4 ส่วน คือ

- 1) ในระหว่างกระบวนการกรองปกติ จะเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่างกัน เป็นระยะเวลา 4.5 นาที เพื่อศึกษาความแตกต่างของการเพิ่มอัตราการกรองจากคลื่นเหนือเสียงที่ตำแหน่งเวลาต่างๆกัน
- 2) ในระหว่างกระบวนการกรองปกติ จะเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงหลังจากทำการกรองผ่านไป 2 นาที โดยจะเปิดคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีและ 4.5 นาทีตามลำดับ เนื่องจากการทดลองในหัวข้อที่แล้วพบว่า อัตราการกรองสามารถเพิ่มขึ้นได้ภายในเวลา 30-45 วินาทีหลังจากเปิดคลื่นเหนือเสียง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา
 - ก. ระยะเวลาที่อัตราการกรองมีค่าลดลงจนเท่ากับอัตราการกรองก่อนเปิดคลื่นเหนือเสียง
 - ข. อัตราเร็วของการลดลงของอัตราการกรองที่เพิ่มขึ้นจากการใช้คลื่นเหนือเสียงแล้วปิดคลื่นเหนือเสียงทันที เปรียบเทียบกับเมื่อยังคงเปิดคลื่นเหนือเสียงอย่างต่อเนื่อง
- 3) จากผลการทดลองใน 2 หัวข้อข้างต้นพบว่า ทันทีที่เปิดคลื่นเหนือเสียง อัตราการกรองเพิ่มขึ้นอย่างมากในเวลา 30 วินาที และเมื่อปิดคลื่นเหนือเสียงทันทีอัตราการกรองจะลดลงจนมีค่าเท่าเดิม ภายในเวลา 30 วินาที ดังนั้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการรักษาอัตราการกรองให้มีค่าสูงตลอดเวลา จึงทำการทดลองเปิด-ปิดคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีอย่างต่อเนื่อง แล้วเปรียบเทียบอัตราการกรองที่ได้กับเมื่อไม่เปิดคลื่นเหนือเสียง
- 4) เริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงตั้งแต่เริ่มต้นจนเข้าสู่สภาวะคงที่ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการกรองที่ได้กับค่าจากกระบวนการกรองปกติ ซึ่งเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงหลังจากอัตราการกรองเข้าใกล้สภาวะคงที่ และค่าจากกระบวนการกรองปกติที่ไม่ได้เปิดคลื่นเหนือเสียง

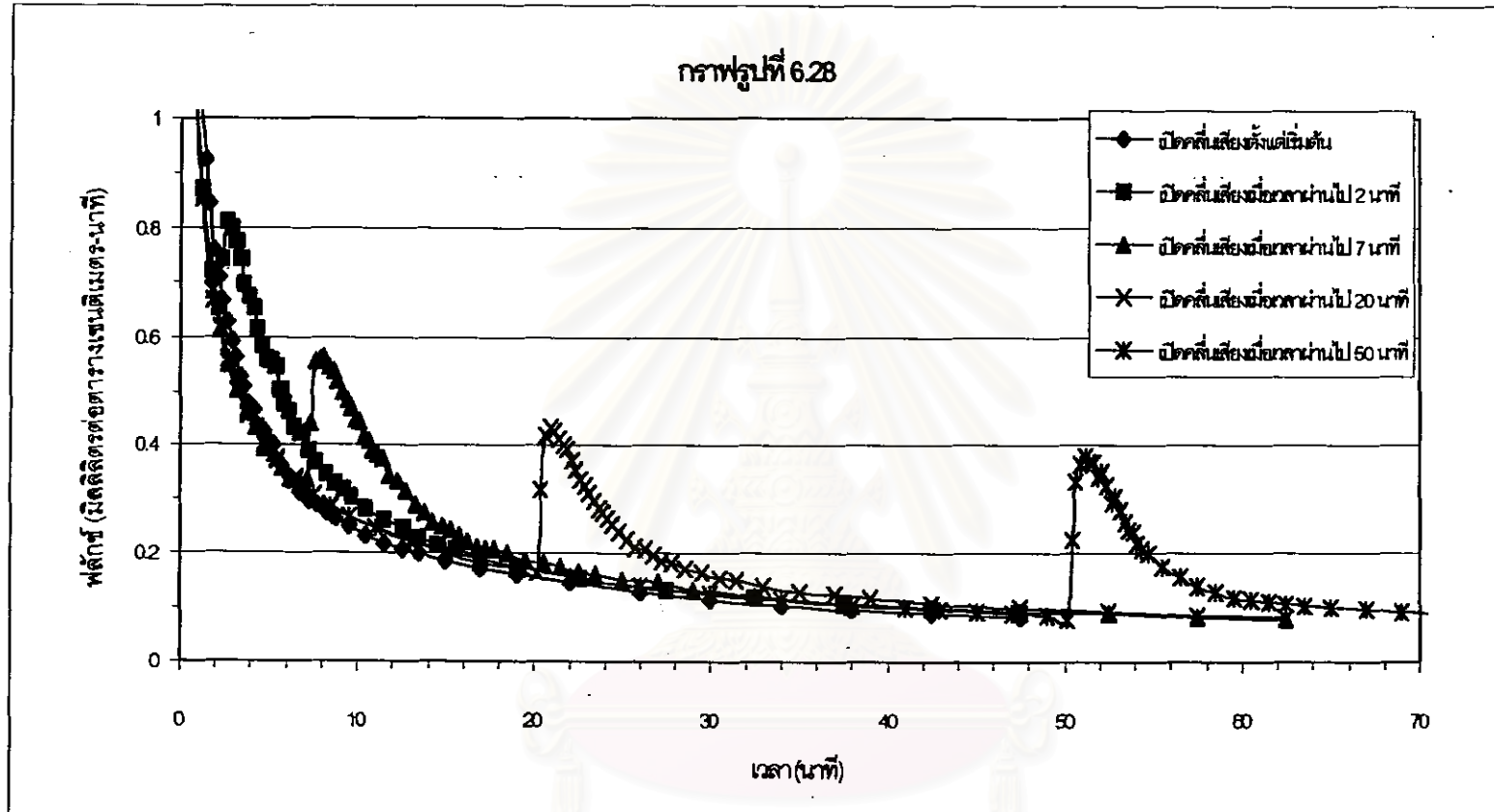
ผลการทดลองของส่วนที่ 1 แสดงดังกราฟรูปที่ 6.28 ซึ่งในระหว่างกระบวนการกรองปกติ จะเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงเมื่อเวลาผ่านไป 0, 2, 7, 20, 50 และที่ฟลักซ์คงที่ เป็นเวลา 4.5 นาทีแล้วปิดคลื่นเหนือเสียง จะมีการวัดปริมาณเพอมีเอททุก 15 วินาทีเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำขึ้น พบว่ามีจุดที่โด่ง (peak) เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าอัตราการกรองเพิ่มสูงขึ้นกว่าการกรองแบบปกติประมาณ

16%, 24%, 66%, 163%, 385% และ 307% ตามลำดับ โดยส่วนที่เพิ่มโตงขึ้นมา เนื่องจากการที่คลื่นเหนือเสียงเข้าไปรบกวนสภาวะปกติของระบบ และระบบจะเริ่มเข้าสู่จุดคงที่ใหม่อีกครั้งเมื่อยุติการให้คลื่นเหนือเสียง โดยสังเกตว่าการเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงที่เวลาเมื่อค่าอัตราการกรองเข้าใกล้สภาวะคงที่ การเปิดคลื่นเหนือเสียงจะทำให้อัตราการกรองเพิ่มสูงมากขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากที่ใกล้สภาวะคงที่จะมีการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเปิดคลื่นเหนือเสียงจะสามารถกำจัดอนุภาคได้ง่ายกว่าบริเวณผิวเยื่อแผ่นที่มีการสะสมของอนุภาคน้อย จึงทำให้อัตราการกรองสูงกว่าการกรองปกติมาก และจากกราฟจะพบว่า ทุกการทดลองอัตราการกรองสูงสุดที่ได้รับจะเกิดขึ้นเมื่อเปิดคลื่นเหนือเสียงภายในระยะเวลาเพียง 30-45 วินาทีแล้วจะมีค่าลดลงทันที

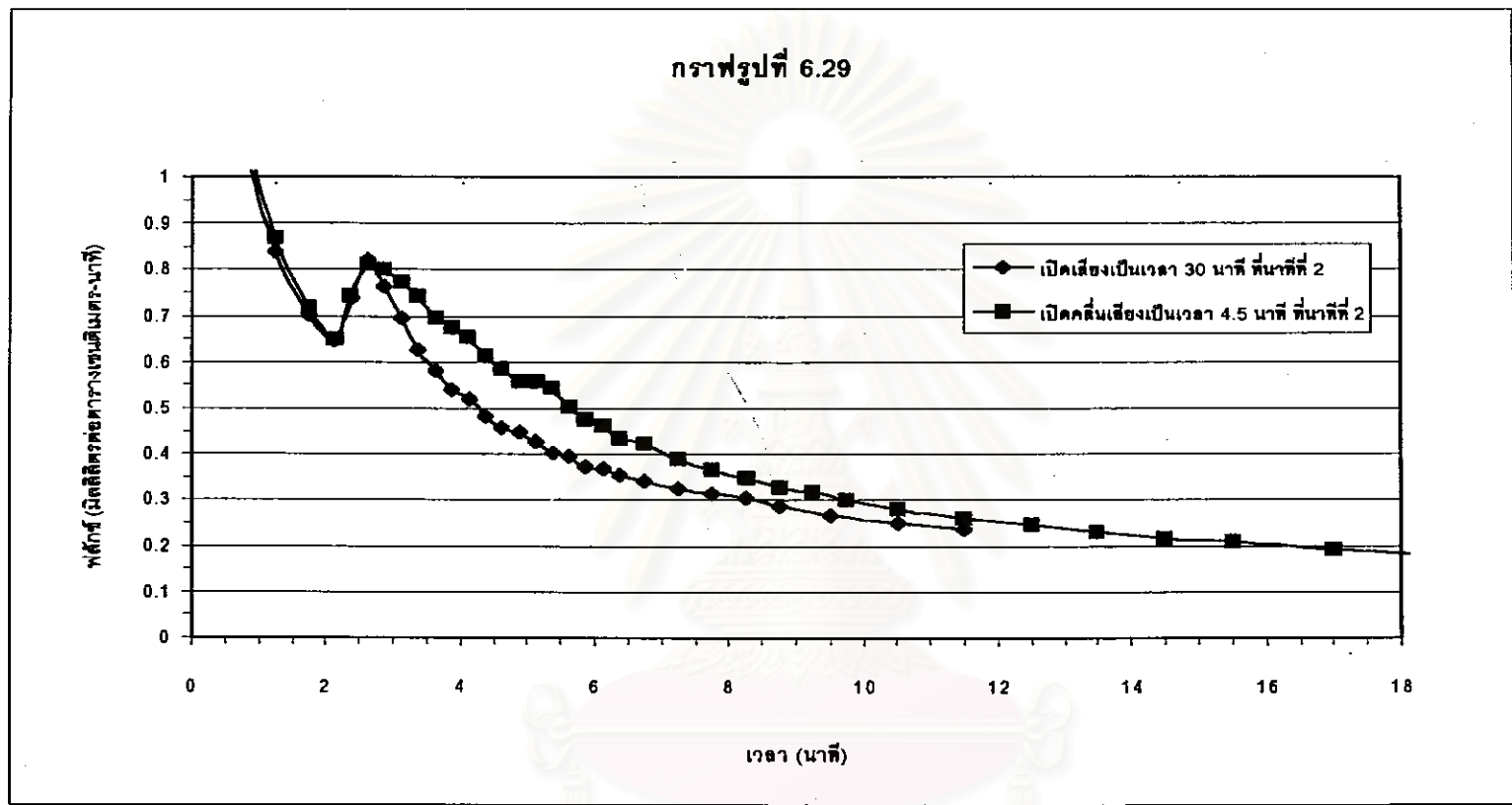
กราฟรูปที่ 6.29 แสดงผลการทดลองในส่วนที่ 2 พบว่า ฟลักซ์การกรองที่ตำแหน่งเวลาก่อนการเปิดคลื่นเหนือเสียงมีค่าเท่ากับ 0.65 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่ และเมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 30 วินาที ฟลักซ์การกรองจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.86 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่ และเมื่อเปิดคลื่นเหนือเสียง ภายในเวลาประมาณ 30-45 วินาที ฟลักซ์การกรองจะลดลงจนมีค่าเท่ากับค่าก่อนเปิดคลื่นเหนือเสียงคือ 0.65 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่ เมื่อเปรียบเทียบกับอีกการทดลองหนึ่ง ที่เปิดคลื่นเหนือเสียงอย่างต่อเนื่องไปตลอด พบว่า จะใช้เวลาประมาณ 90 วินาที ฟลักซ์การกรองจึงมีค่าลดลงเท่ากับค่าก่อนเปิดคลื่นเหนือเสียง สรุปได้ว่า การลดลงของฟลักซ์ในกรณีเปิดคลื่นเหนือเสียงทันทีจะเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อเปิดคลื่นเหนือเสียงอย่างต่อเนื่อง

กราฟรูปที่ 6.30 แสดงผลการทดลองในส่วนที่ 3 พบว่าไม่สามารถควบคุมให้ฟลักซ์การกรองมีค่าคงที่ได้ เนื่องจากจุดที่โตงขึ้นมาเกิดจากการรบกวนระบบในระยะเวลาสั้นๆเท่านั้น ดังนั้นการเปิดคลื่นเหนือเสียงอีกครั้งทันทีหลังจากการรบกวนของระบบครั้งก่อนหน้านั้น จะไม่ทำให้เกิดจุดที่โตงขึ้นมาเท่ากับการรบกวนระบบครั้งแรก ทำให้ไม่สามารถควบคุมให้อัตราการกรองมีค่าสูงขึ้นตลอดเวลาได้

กราฟรูปที่ 6.31 แสดงผลการทดลองในส่วนที่ 4 พบว่าฟลักซ์คงที่ของระบบที่เริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงเมื่ออัตราการกรองเข้าใกล้สภาวะคงที่และระบบที่เปิดคลื่นเหนือเสียงตั้งแต่เริ่มต้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าการกรองปกติ 241% และ 300% ตามลำดับ การเปิดคลื่นเหนือเสียงตั้งแต่เริ่มต้นจะให้อัตราการกรองมีค่าสูงกว่า เนื่องจากการเปิดคลื่นเหนือเสียงตั้งแต่เริ่มต้น การกำจัดอนุภาคจะเกิดขึ้นตลอดเวลาโดยสามารถกำจัดอนุภาคตั้งแต่เมื่อเริ่มมีอนุภาคมาสะสมอยู่บนผิวน้ำน้อย และมีการกำจัดอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีการเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงอัตราการกรองเริ่มเข้าใกล้สภาวะคงที่ จะมีการกำจัดเมื่ออนุภาคสะสมกันเป็นชั้นอนุภาคที่หนาแล้ว การกำจัดอนุภาคเหล่านี้จึงทำได้ยากกว่า มีผลให้อัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่า

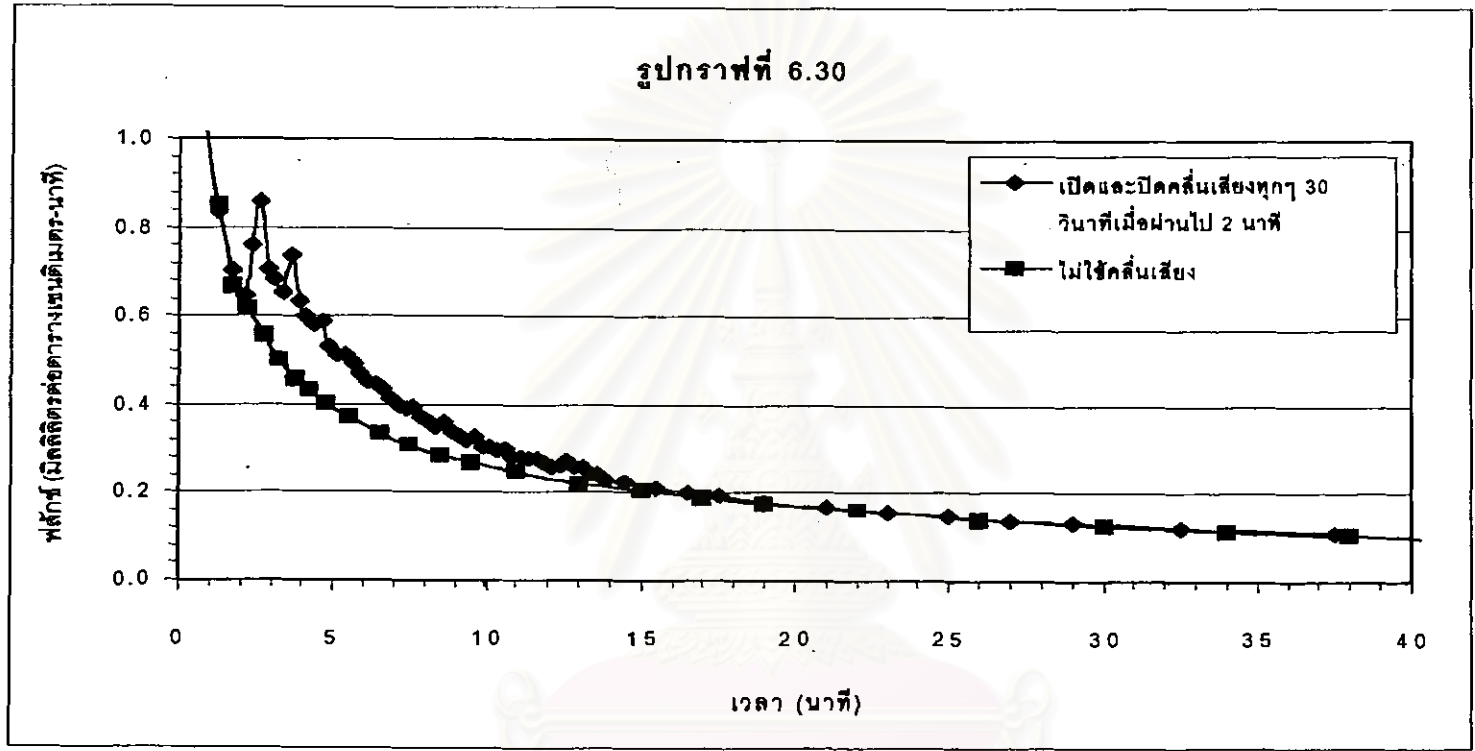


รูปที่ 6.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่างกัน เป็นระยะเวลา 4.5 นาที ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร

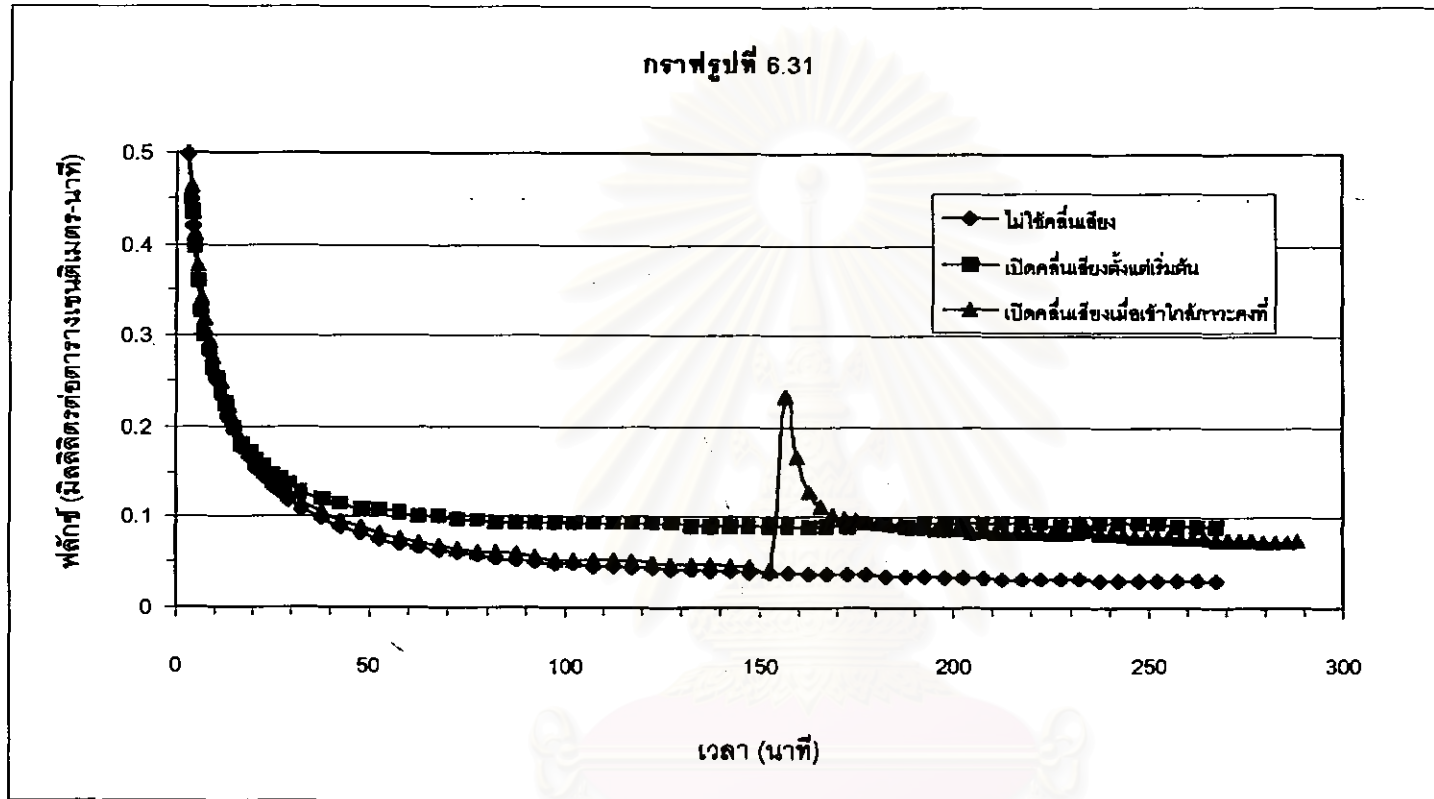


รูปที่ 6.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงที่เวลา 2 นาที เป็นระยะเวลาต่างๆ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันক্র่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่กับเวลา เมื่อไม่เปิดและเปิด-ปิดคลื่นเหนือเสียงทุกๆ 30 วินาที ที่เวลา 2 นาที จนถึงนาทีที่ 12.5 ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อดัง, ความดันक्रमเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร



รูปที่ 6.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา เมื่อไม่เปิดคลื่นเหนือเสียง, เมื่อเปิดคลื่นเหนือเสียงตั้งแต่เริ่มต้น และเมื่อเริ่มเปิดคลื่นเหนือเสียงเมื่ออัตราการกรองเข้าใกล้ภาวะคงที่ ที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว, ความดันคร่อมเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, ความเร็วของสายป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที, ความเข้มข้นยีสต์ 5 กรัมต่อลิตร และระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น 2.6 เซนติเมตร

6.2 ผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์

เนื่องจากในระบบการกรองแต่ละการทดลอง สารละลายยีสต์จะต้องถูกปั๊มด้วยปั๊มแบบ หอยโข่งและผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงสุดประมาณ 3.6 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง ซึ่งแรงที่เกิดจากการทำงานของปั๊มและผลกระทบของคลื่นเหนือเสียง อาจส่งผลกระทบต่อยีสต์ได้ทั้งสองอย่าง ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาผลกระทบของแรงเหล่านี้ต่อยีสต์แยกจากกัน โดยจะทำการศึกษาทั้งในแง่ของขนาด, รูปร่างและคุณสมบัติในการเจริญเติบโตของยีสต์ การทดสอบแต่ละวิธี จึงนำตัวอย่างหลายตัวอย่างที่ผ่านการทดลองแตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบของปั๊มอย่างเดียว, คลื่นเหนือเสียงอย่างเดียวและความร้อนอย่างเดียว (เนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ระบบจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากการสูญเสียพลังงานบางส่วนของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งยีสต์ก็สามารถถูกทำลายได้ด้วยความร้อน ดังนั้นเพื่อศึกษาผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อยีสต์ จึงต้องทดสอบตัวแปรทั้งสองนี้แยกจากกันด้วย โดยเปรียบเทียบระหว่างสารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงที่มีการควบคุมและไม่ควบคุมอุณหภูมิ และที่ผ่านการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว) แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับสารละลายยีสต์เริ่มต้น

6.2.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคยีสต์ก่อนและหลังการใช้คลื่นเหนือเสียง ทำการทดลองโดยดึงตัวอย่างจากสารยีสต์ก่อนและหลังทำการกรองมาวัดขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ซึ่งตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบ่งออกเป็น 5 ตัวอย่าง คือ

- 1) สารละลายยีสต์ที่ไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียง (sample 11)
- 2) สารละลายยีสต์ที่ผ่านกระบวนการกรองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้ปั๊มแบบทอริค (peristaltic pump) และมีการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มเท่ากับ 3.6 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียสตลอดการกรอง แล้วดึงตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 30, 60, 90 และ 120 นาที (sample 5, 6/u60min, 7, 8 ตามลำดับ)
- 3) สารละลายยีสต์ที่ผ่านปั๊มหอยโข่ง โดยไม่ผ่านทั้งการกรองและคลื่นเหนือเสียง (centrifugal pump) ดึงตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 30, 60, 90 และ 120 นาที (sample 1, 6/p60min, 3, 4 ตามลำดับ)
- 4) สารละลายยีสต์ปริมาตร 25 มิลลิลิตรที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคไพโรบขนาด 0.5 เซนติเมตร ที่ความเข้มสูงประมาณ 50 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ แล้วดึงตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 5 และ 15 นาที ซึ่งมี

อุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 55 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (sample 9 และ 10)

- 5) สารละลายยีสต์ที่ผ่านการให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส (sample 12)

หมายเหตุ ในวงเล็บด้านท้ายของแต่ละตัวอย่างคือ เลขตัวอย่าง (Sample ID) ที่ปรากฏในรายงานผลการทดลอง ในภาคผนวก ข

ผลการวัดแสดงในภาคผนวก ข พบว่า ตัวอย่างที่ 1 จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 7 ไมโครเมตรและมีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง เนื่องจากอนุภาคอาจมีการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไม่แยกเป็นอิสระต่อกัน สำหรับตัวอย่างที่ 2, 3 และ 4 ผลการวัดแสดงว่า มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4-5 ไมโครเมตรและมีการกระจายตัวที่แคบลง เนื่องจากแรงจากทั้งปั๊มและคลื่นเหนือเสียง จะทำให้ยีสต์ที่เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวแยกออกจากกัน เป็นอนุภาคเดี่ยวมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ 4 ซึ่งเป็นสารละลายยีสต์ที่ผ่านคลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มสูง เป็นเวลาต่างกัน (5 และ 15 นาที) พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเริ่มมีค่าลดลง แสดงว่า คลื่นเหนือเสียงเริ่มมีผลกระทบต่ออนุภาค โดยอาจจะทำให้อนุภาคถูกทำลายจึงมีขนาดเล็กลง ตัวอย่างที่ 5 พบว่า ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 55 ไมโครเมตรและมีการกระจายตัวที่กว้างมาก

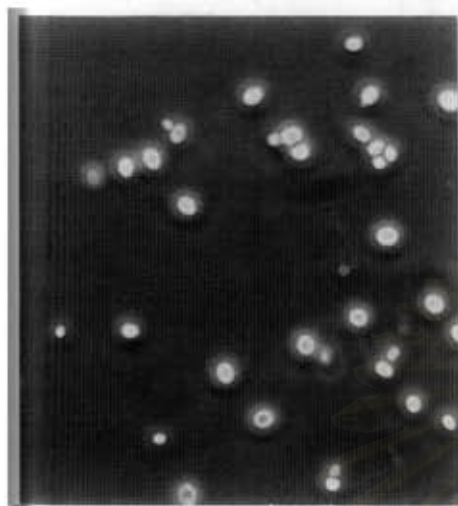
6.2.2 ลักษณะของอนุภาคยีสต์ก่อนและหลังการใช้คลื่นเหนือเสียง ได้นำตัวอย่างจากการทดสอบด้วยวิธีต่างๆ มาส่องดูลักษณะของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า แสดงดังรูปที่ 6.32-6.34 และมีการเติมเมทิลลีนบลูลงในสารละลายเพื่อทำการตรวจสอบเบื้องต้นว่า ผนังยีสต์เกิดการแตกหรือไม่ หากผนังยีสต์ตัวใดแตกสีน้ำเงินของสารละลายจะเข้าไปแทนในตัวอย่างยีสต์ ทำให้ยีสต์มีสีน้ำเงิน หรือรูปร่างของยีสต์ไม่เหมือนเดิมคือไม่เป็นรูปทรงค่อนข้างกลม เนื่องจากถูกแรงดันของของเหลวภายนอกมากกระทำ ซึ่งพบว่าการใช้อัลตราโซนิคที่ความเข้มประมาณ 50 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และการต้ม จะทำให้ยีสต์มีสีน้ำเงินและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งอาจเป็นเพราะผนังเซลล์ของยีสต์แตกได้

6.2.3 การเจริญเติบโตของยีสต์ ทำการเลี้ยงยีสต์ด้วยวิธีที่อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ

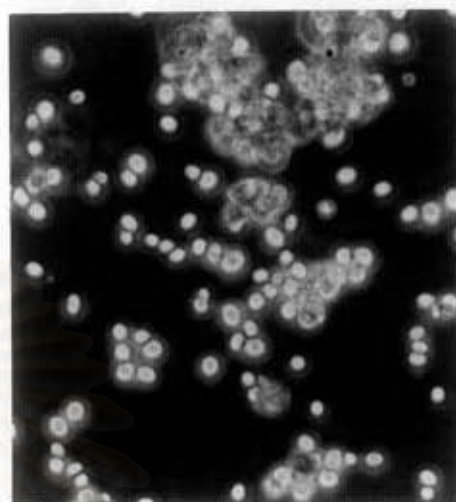
5.4.2 โดยนำตัวอย่างมาจากสารละลายยีสต์ที่ผ่านการทดลองด้วยวิธีต่างๆ 5 ตัวอย่าง ดังนี้

- 1) ไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียงและความร้อน
- 2) ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่มีความเข้มต่ำ คือ ประมาณ 7 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่มีความเข้มสูง คือ ประมาณ 100 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) ผ่านคลื่นเหนือเสียงจากอัลตราโซนิคโพรบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่มีความเข้มสูง (100 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และไม่มีการควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิสุดท้ายได้เท่ากับ 73 องศาเซลเซียส
- 5) นำไปต้มจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 73 องศาเซลเซียส

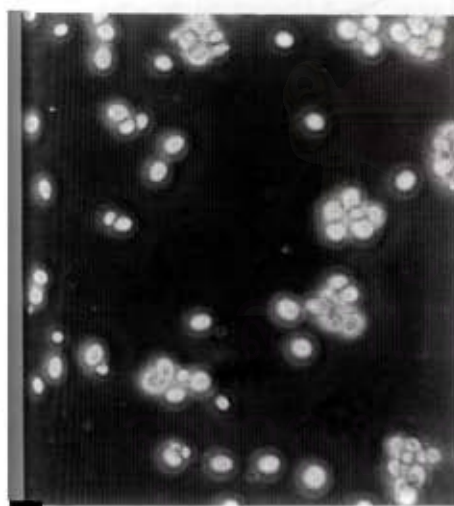
ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.35 - 6.36 จากรูปที่ 6.35 พบว่า ตัวอย่างที่ 3, 4 และ 5 จะไม่มีอีสต์ขึ้นที่ทุกความเข้มข้น รูปที่ 6.36 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองของตัวอย่างที่ 1 และ 2 พบว่า จะมีจำนวนของอีสต์ที่สามารถเจริญเติบโตในปริมาณที่เท่ากัน โดยแผ่นที่มีอีสต์ขึ้นอยู่ในปริมาณที่สามารถนับจำนวนของอีสต์ได้ คือ แผ่นที่มีการลดความเข้มข้นของอีสต์ลงเหลือประมาณ 10^{-5} เท่า ซึ่งสามารถนับจำนวนของอีสต์ได้เท่ากับ 64, 69, 74 และ 63, 67, 66 ตัว ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ที่ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่ำจะไม่ทำให้อีสต์สูญเสียคุณสมบัติในการเจริญเติบโตไป



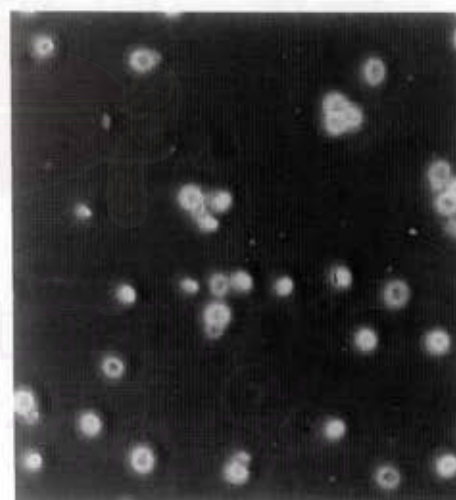
(ก)



(ข)

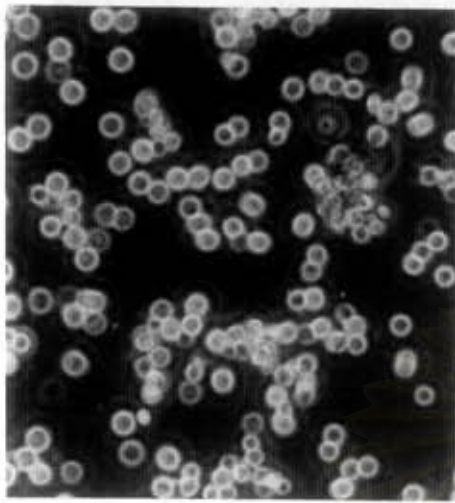


(ค)

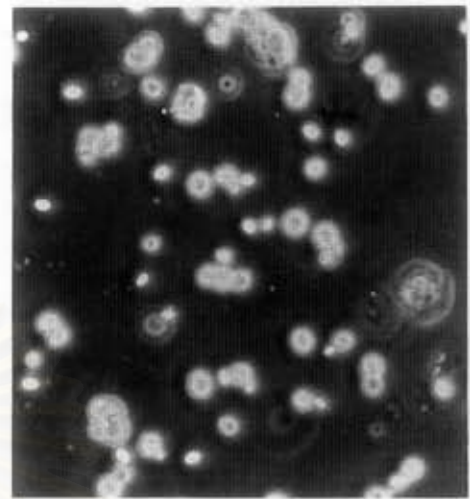


(ง)

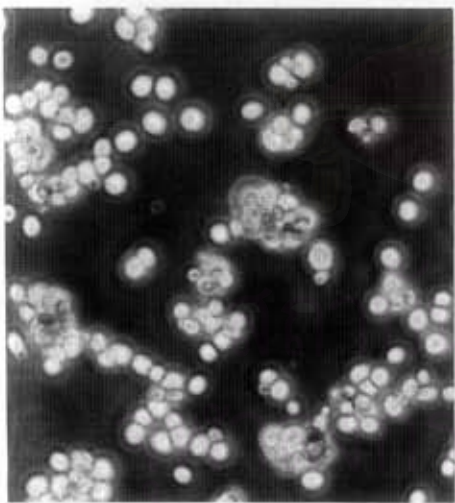
รูปที่ 6.32 ภาพถ่ายสารละลายยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า
(ก) หลังผ่านบ่มเป็นเวลา 30 นาที (ข) หลังผ่านบ่มเป็นเวลา 60 นาที
(ค) หลังผ่านบ่มเป็นเวลา 90 นาที (ง) หลังผ่านบ่มเป็นเวลา 120 นาที



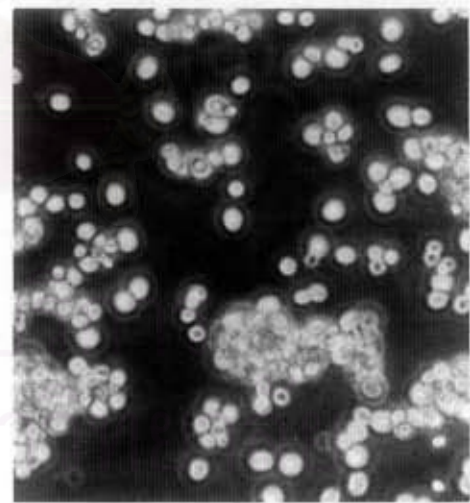
(ก)



(ข)

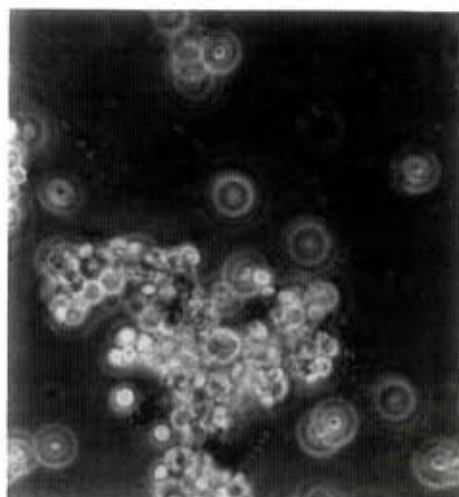


(ค)

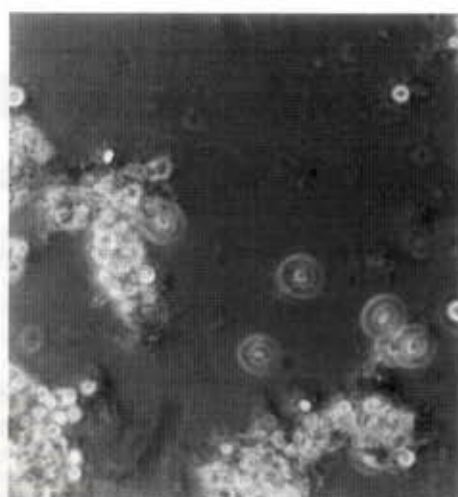


(ง)

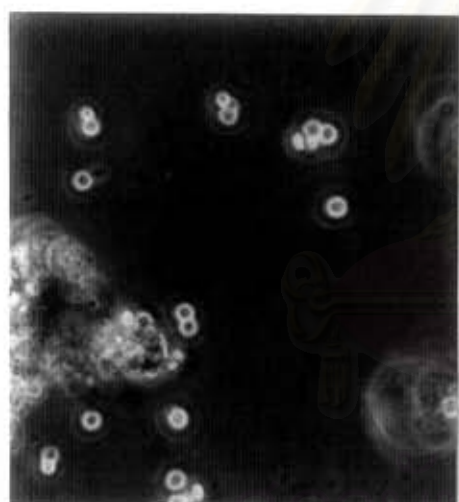
รูปที่ 6.33 ภาพถ่ายสารละลายยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า
(ก) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียง 30 นาที (ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียง 60 นาที
(ค) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียง 90 นาที (ง) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียง 120 นาที



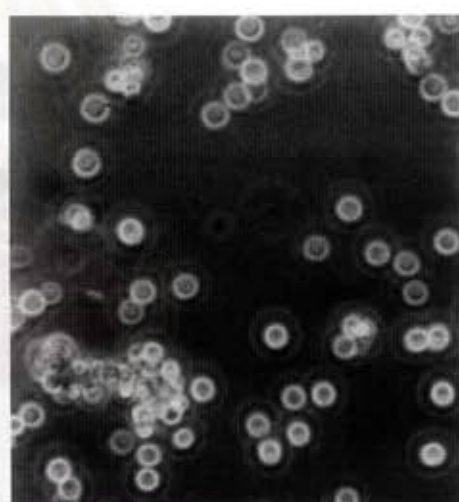
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6.34 ภาพถ่ายสารละลายยีสต์จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า

(ก) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงเป็นเวลา 5 นาที

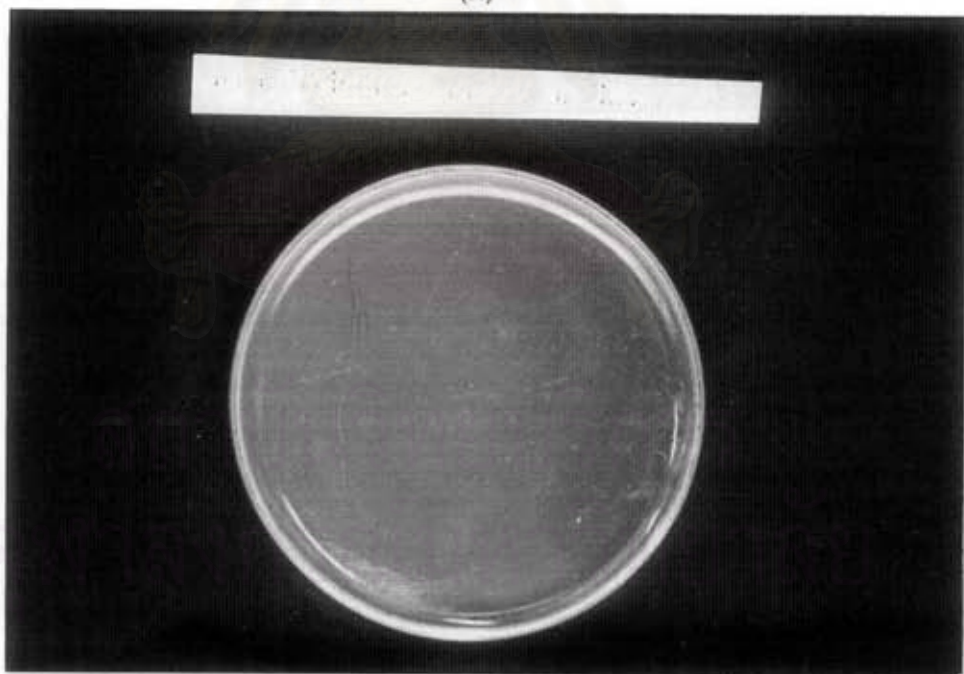
(ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง 15 นาที

(ค) ให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

(ง) สารละลายยีสต์ก่อนผ่านการทดลองใดๆ

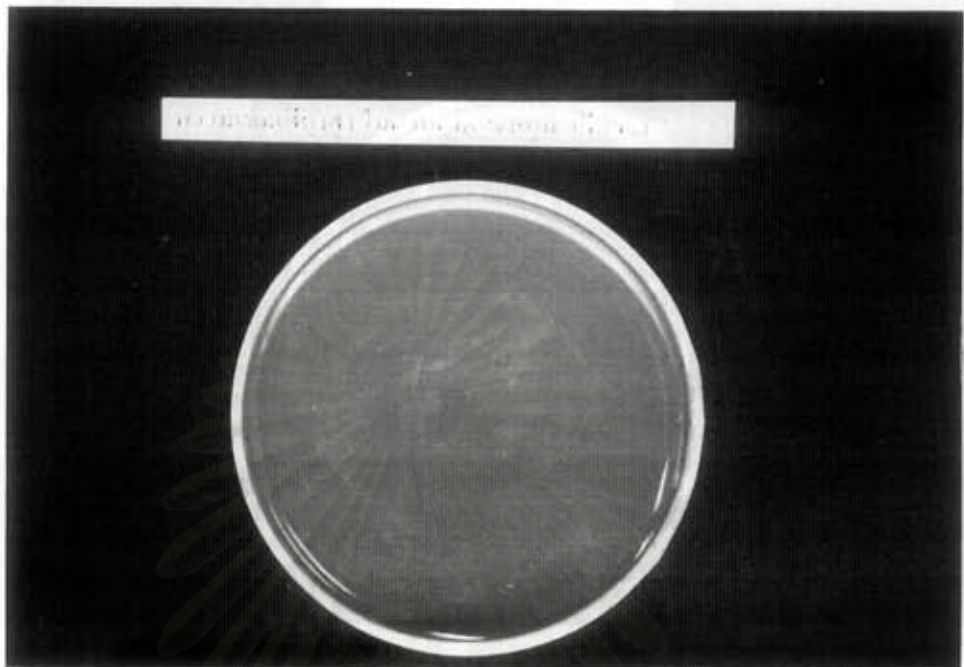


(ก)

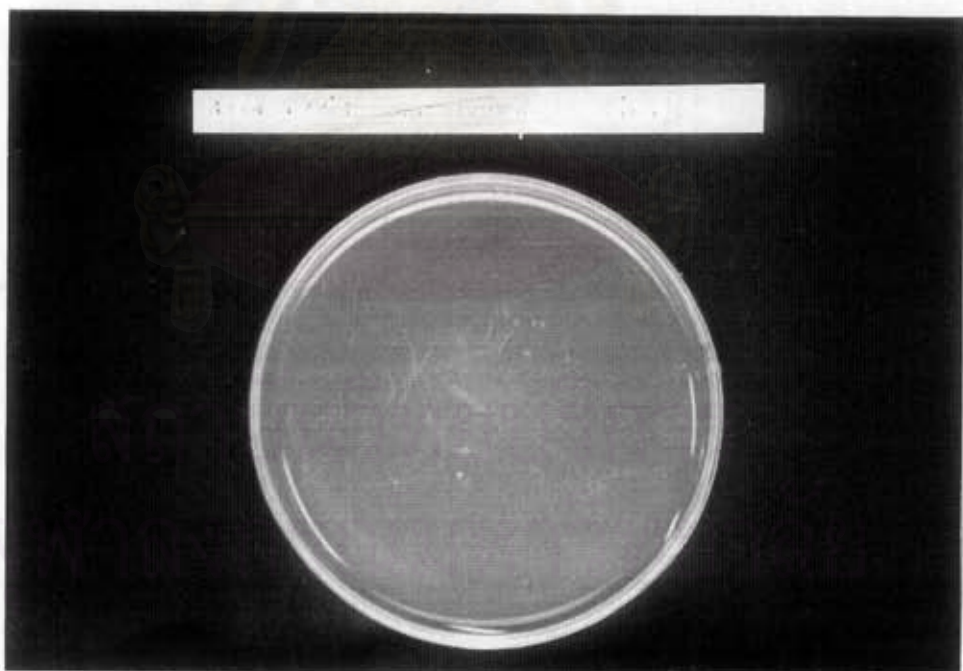


(ข)

รูปที่ 6.35 ภาพถ่ายการเจริญเติบโตของยีสต์ที่เจือจาง 10^{-4} เท่า เมื่อ
(ก) ยังไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียง (ตัวอย่างที่ 1)
(ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงและควบคุมอุณหภูมิ (ตัวอย่างที่ 3)



(ค)

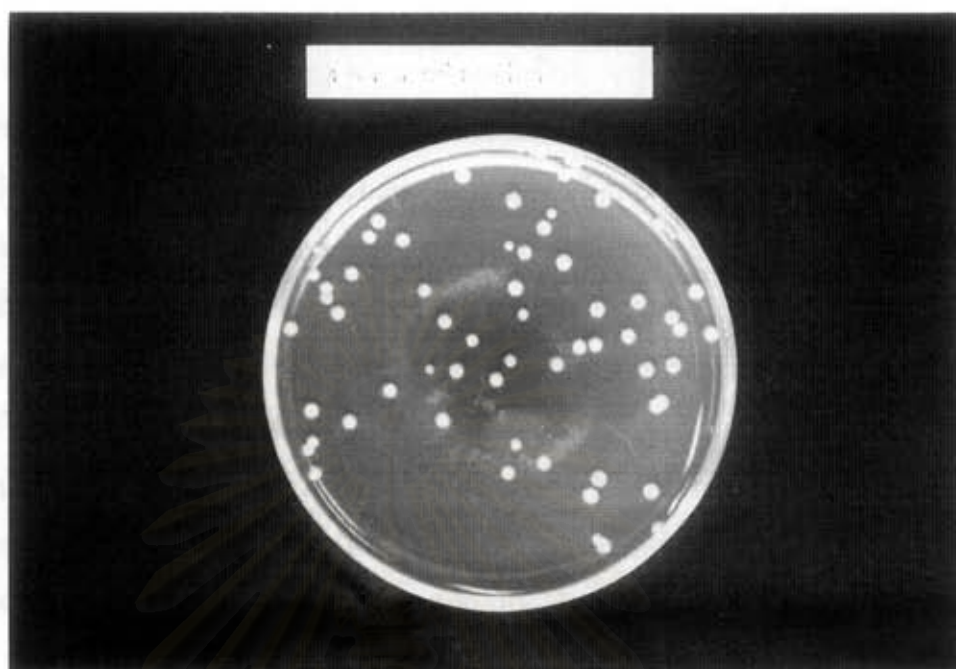


(ง)

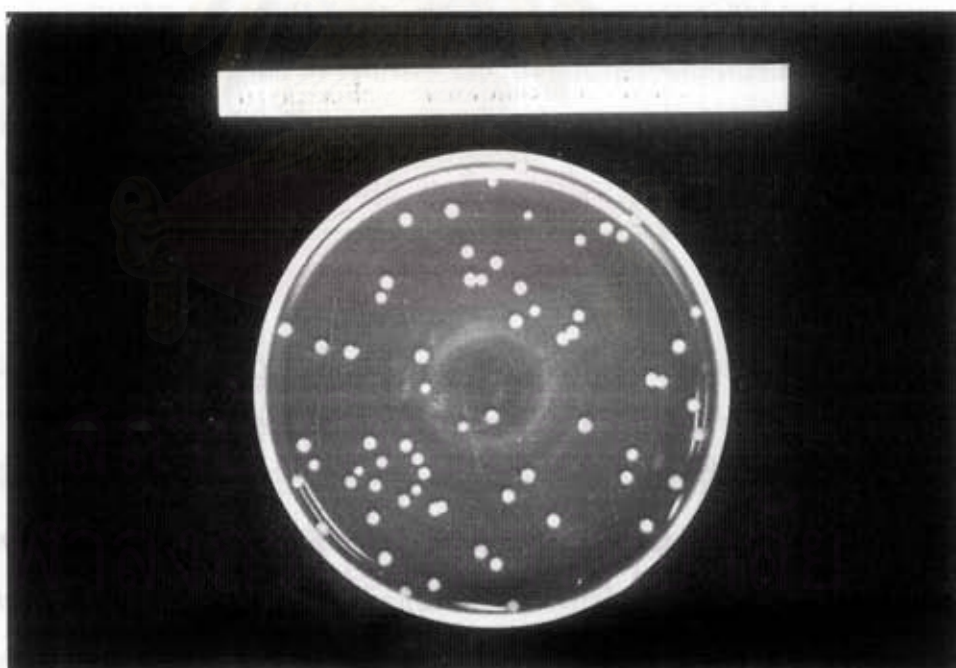
รูปที่ 6.35 (ต่อ) ภาพถ่ายการเลี้ยงยีสต์ ที่เจือจาง 10^{-4} เท่า เมื่อ

(ค) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงและไม่ควบคุมอุณหภูมิ (ตัวอย่างที่ 4)

(ง) หลังผ่านการต้มจนมีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส (ตัวอย่างที่ 5)



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.36 ภาพถ่ายการเจริญเติบโตของยีสต์ที่เจือจาง 10^{-5} เท่า เมื่อ

(ก) ยังไม่ผ่านคลื่นเหนือเสียง (ตัวอย่างที่ 1)

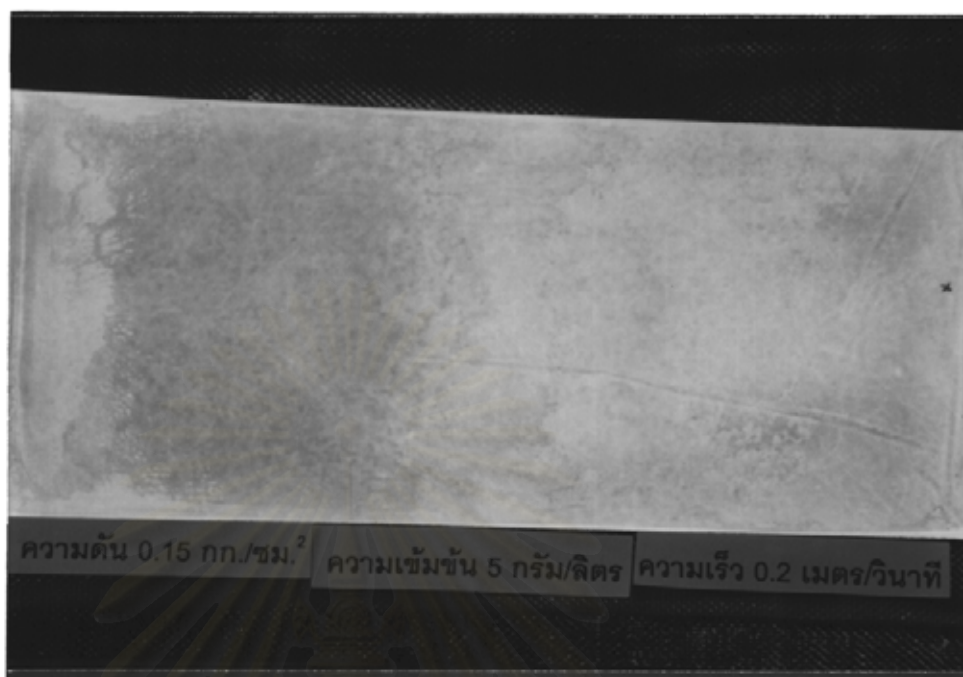
(ข) หลังผ่านคลื่นเหนือเสียงความเข้มต่ำ และควบคุมอุณหภูมิ (ตัวอย่างที่ 2)

6.3 ผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อเยื่อแผ่น

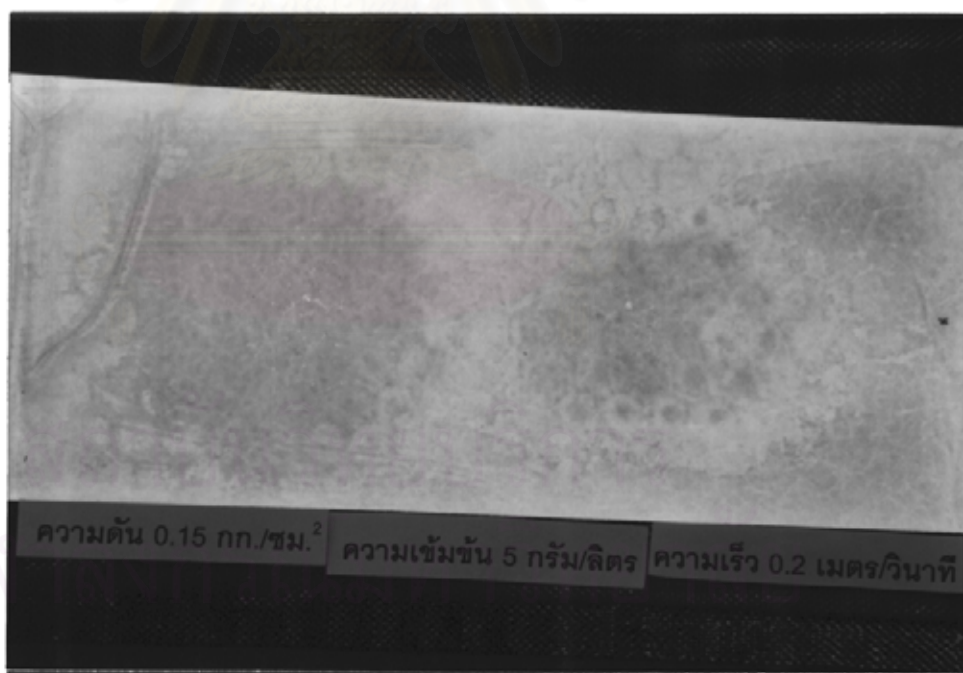
6.3.1 ค่าความต้านทานการกรอง จากการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ เมื่อนำเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองมาทำการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า เยื่อแผ่นที่ถูกปล่อยคลื่นเหนือเสียงทิศทางเดียวกับการกรองจะมีค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (R_m) คงเดิมไม่แตกต่างจากค่าของเยื่อแผ่นใหม่ แต่สำหรับการทดลองที่มีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรองจะมีค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (R_m) ลดต่ำลง เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงทำลายเยื่อแผ่นเนื่องจากการยุบตัวของคาวิตีชัน ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.1.1

เมื่อนำเยื่อแผ่นไปวัดหาขนาดรูพรุนและความพรุนจากเครื่องวัดขนาดรูพรุนด้วยปรอท พบว่า ขนาดรูพรุนยังคงมีค่าเดิมคือประมาณ 0.5 ไมโครเมตรไม่ว่าจะปล่อยคลื่นเสียงจากทิศทางใด แต่ค่าความพรุนมีค่าแตกต่างกัน คือ การปล่อยคลื่นเหนือเสียงทิศทางเดียวกับการกรองจะมีค่าความพรุน 13.71% ส่วนการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามจะมีความพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 57.02% (แสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นมีค่าต่ำลงนั่นเอง ดังนั้น การปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรองจะทำให้เยื่อแผ่นถูกทำลายจนทำให้เกิดรูขึ้นบนผิวเยื่อแผ่น ในการทดลองนี้ เวลาในการปล่อยคลื่นเหนือเสียงนานมากขึ้นขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นน่าจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เราไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ ทำให้ไม่สามารถเปิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงสุดที่เครื่องมือทำได้เป็นเวลานานหลายชั่วโมงได้

6.3.2 ลักษณะทางกายภาพ เมื่อนำเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองมาส่องผ่านแสงจะให้ผลเป็นดังรูปที่ 6.37 ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบเยื่อแผ่นที่มีการปล่อยคลื่นเสียงในทิศทางที่แตกต่างกันพบว่าการปล่อยคลื่นเสียงทิศทางตรงข้ามกับการกรอง คลื่นเหนือเสียงจะทำให้เยื่อแผ่นถูกทำลายอย่างชัดเจนและหากพิจารณาการทดลองที่ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นที่แตกต่างกันพบว่า บริเวณที่ถูกคลื่นเหนือเสียงกระทำมีพื้นที่แตกต่างกันเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ ที่ระยะห่าง 1.5 ซม. บริเวณที่ถูกคลื่นเสียงกระทำจะมีบริเวณที่แคบกว่าระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อดูลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันจะให้ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.38 - 6.42 เป็นการแสดงลักษณะของเยื่อแผ่นที่ภาวะต่างๆ รวมถึงรูปร่างของเยื่อแผ่นที่ถูกทำลายด้วยคลื่นเหนือเสียงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



(ก)

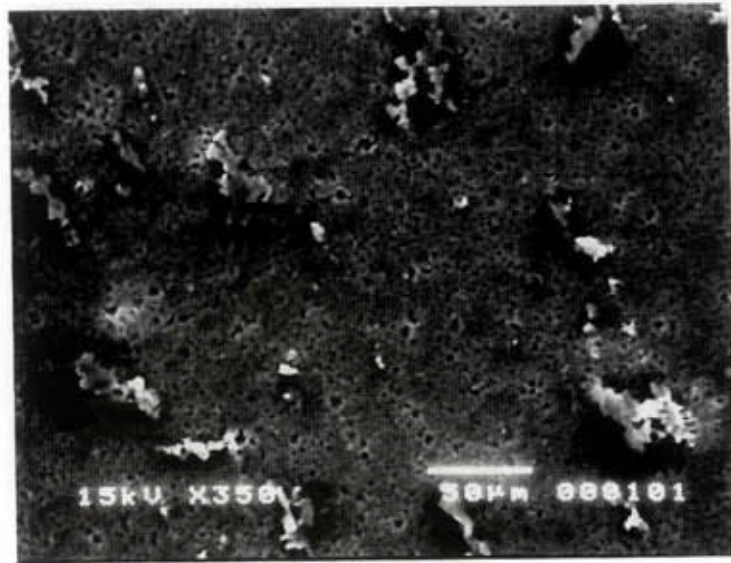


(ข)

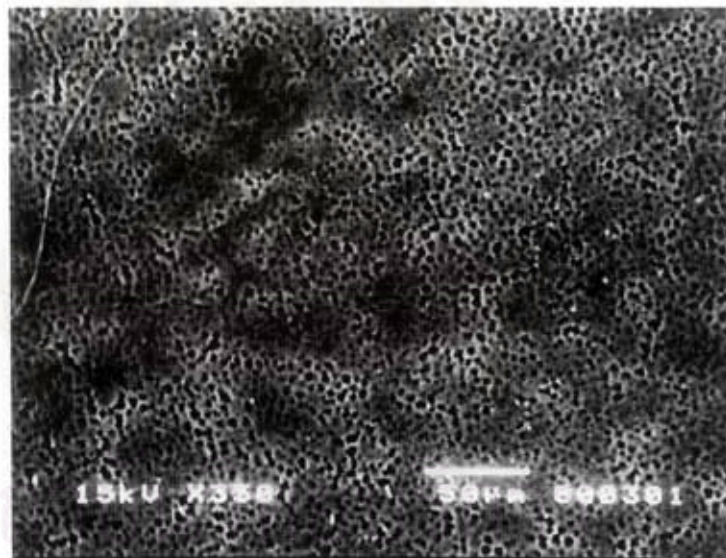
รูปที่ 6.37 ลักษณะของเยื่อแผ่นที่ผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง

(ก) ในทิศทางตรงข้ามกับกรอง

(ข) ในทิศทางเดียวกับการกรอง



(ก)



(ข)

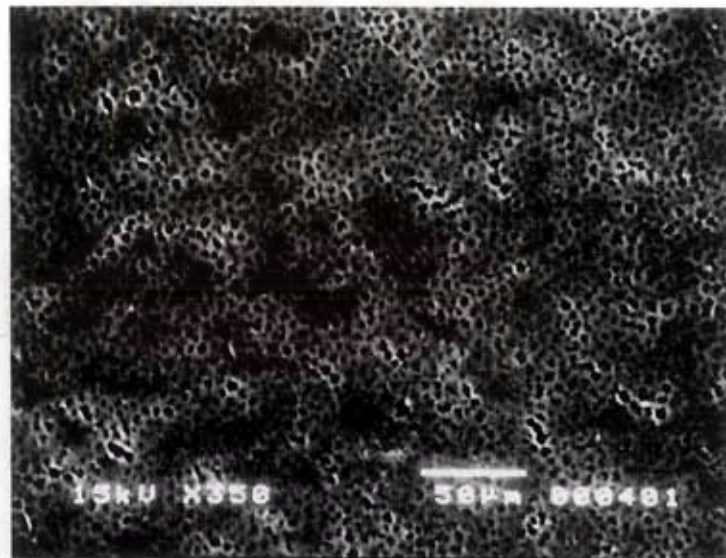
รูปที่ 6.38 ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 350 เท่า

(ก) เมื่อยังไม่ผ่านการกรอง

(ข) หลังผ่านการกรอง โดยทำความสะอาดรูพรุนแล้ว



(ค)

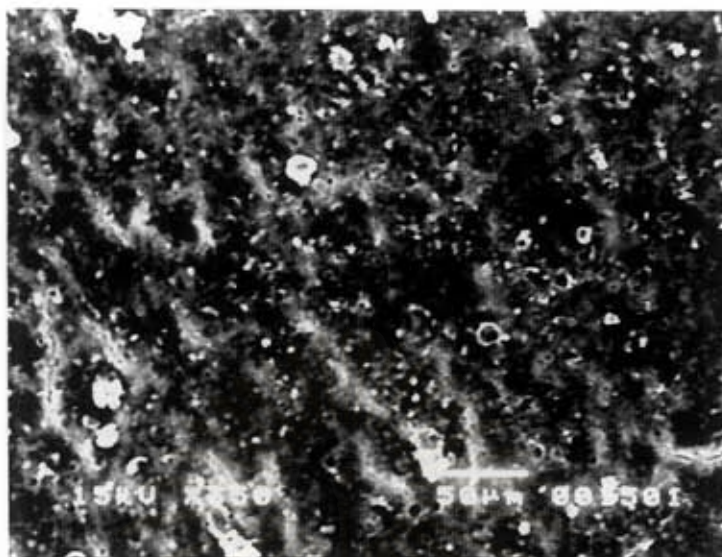


(ง)

รูปที่ 6.38 (ต่อ) ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล่องจุลทรรศน์อีเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 350 เท่า

(ค) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงและยังไม่ได้ทำความสะอาดรูพรุน

(ง) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง และทำความสะอาดรูพรุนแล้ว



(จ)

รูปที่ 6.38 (ต่อ) ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 350 เท่า

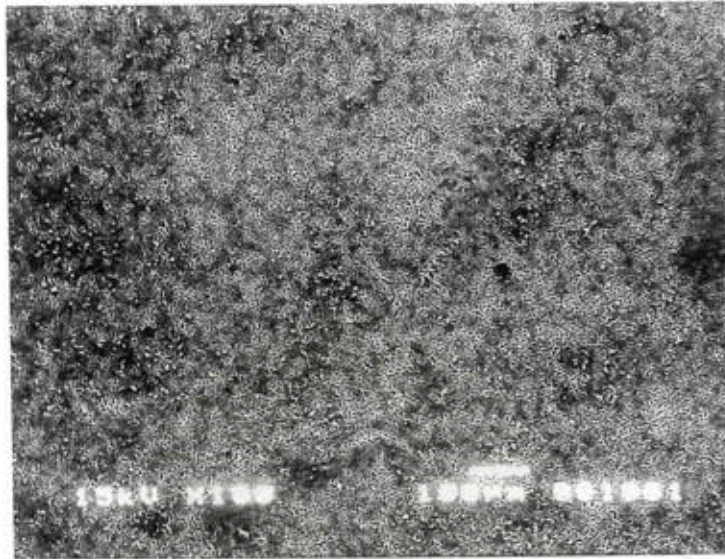
(จ) หลังผ่านการกรอง และยังไม่ได้ทำความสะอาดรูพรุน



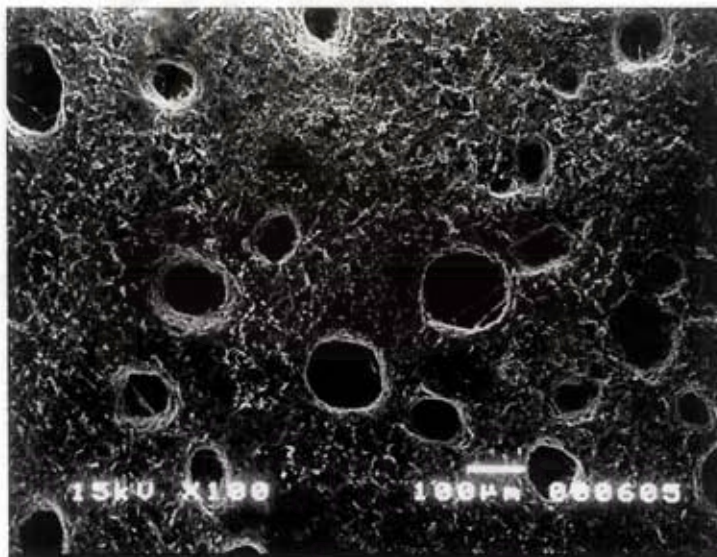
(ก)

รูปที่ 6.39 ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ก) หลังผ่านการกรอง และทำความสะอาดรูพรุนแล้ว



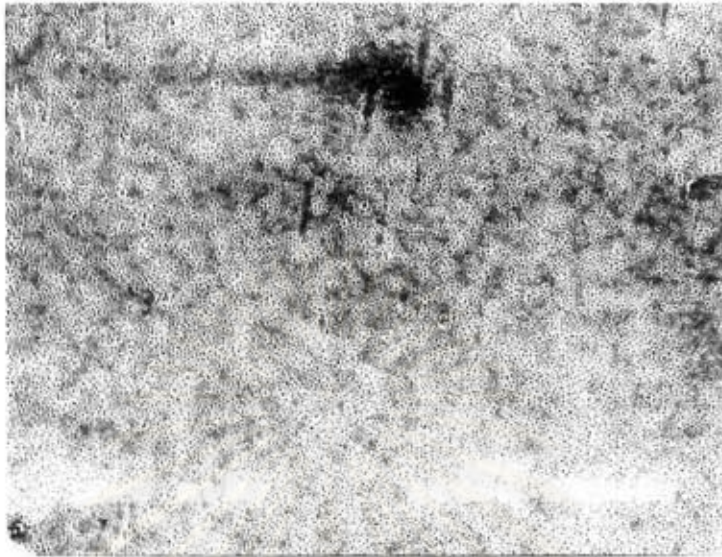
(ข)



(ค)

รูปที่ 6.39 (ต่อ) ภาพถ่ายของเยื่อผ่านจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 100 เท่า

- (ข) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการกรอง
- (ค) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง



(ก)



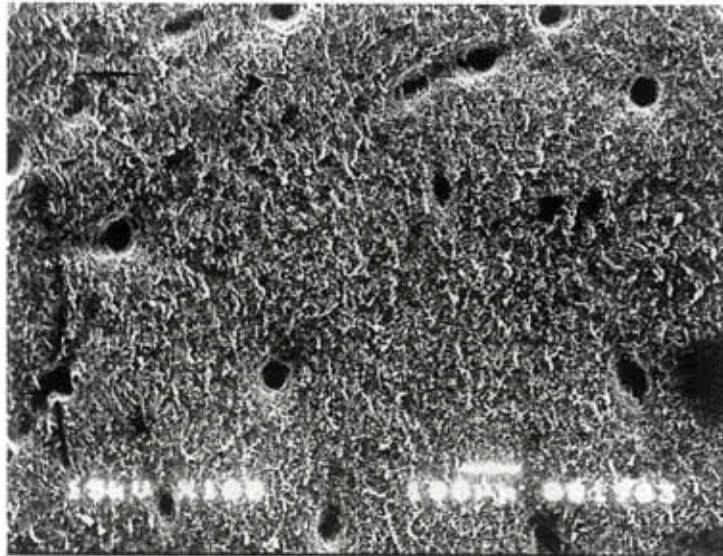
(ข)

รูปที่ 6.40 ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ก) หลังผ่านการกรองที่ไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง

(ข) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 10 วัตต์ต่อตัว



(ค)

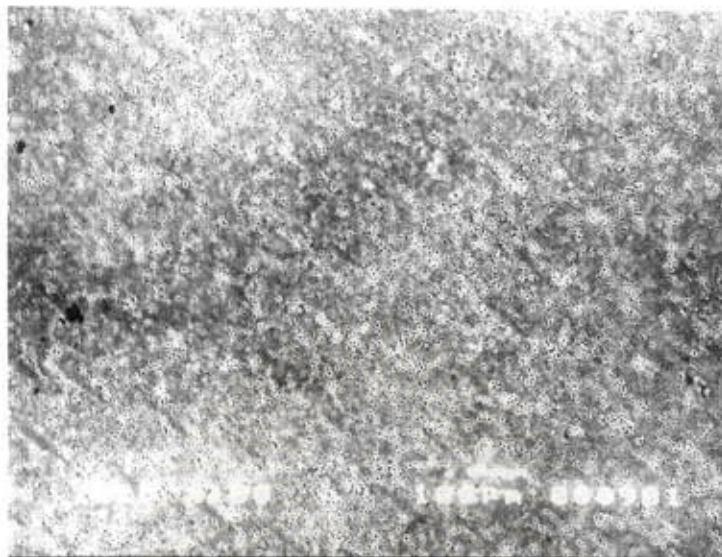


(ง)

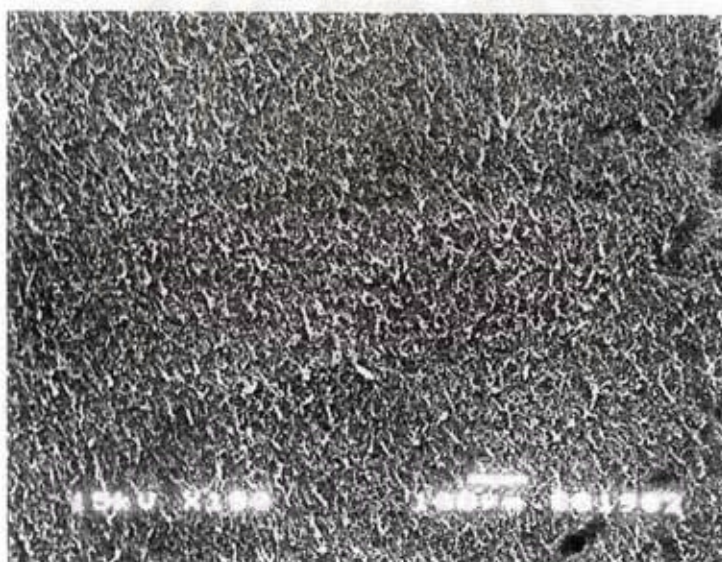
รูปที่ 6.40 (ต่อ) ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกลีงจุลทรศนอีเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ค) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 20 วัตต์ต่อตัว

(ง) หลังผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงที่กำลัง 40 วัตต์ต่อตัว



(ก)

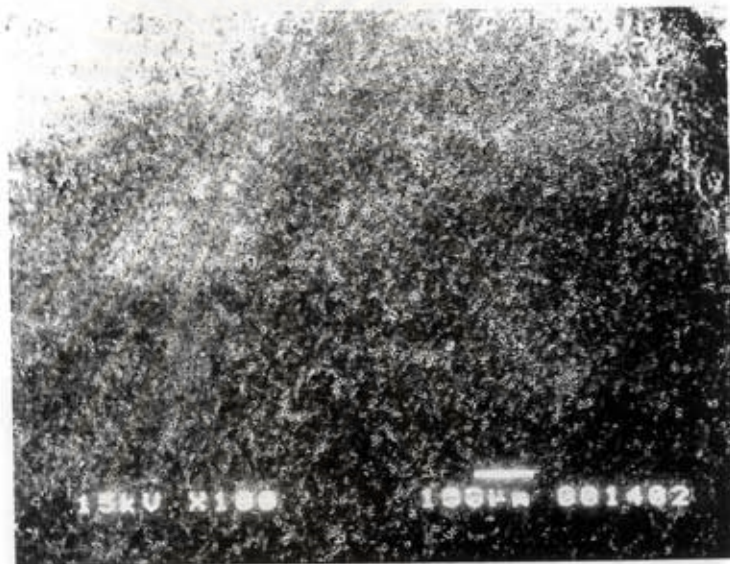


(ข)

รูปที่ 6.41 ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 100 เท่าซึ่งผ่านการกรองรวมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง
โดยมีระยะห่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น เท่ากับ

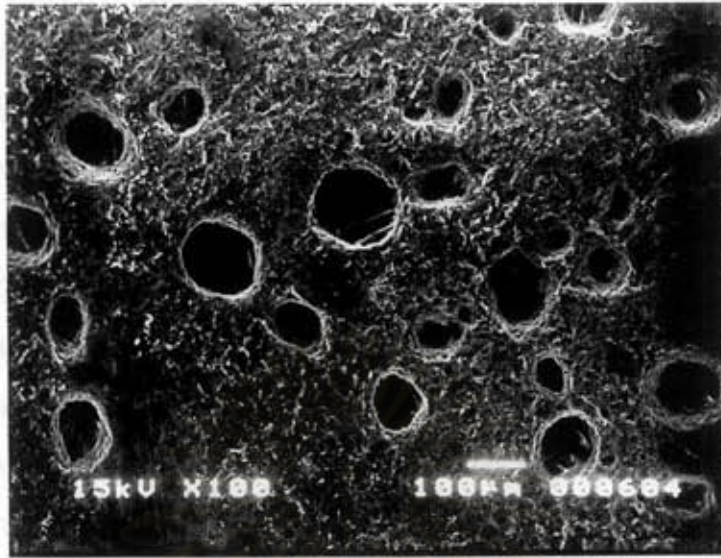
(ก) 1.5 เซนติเมตร

(ข) 2.6 เซนติเมตร

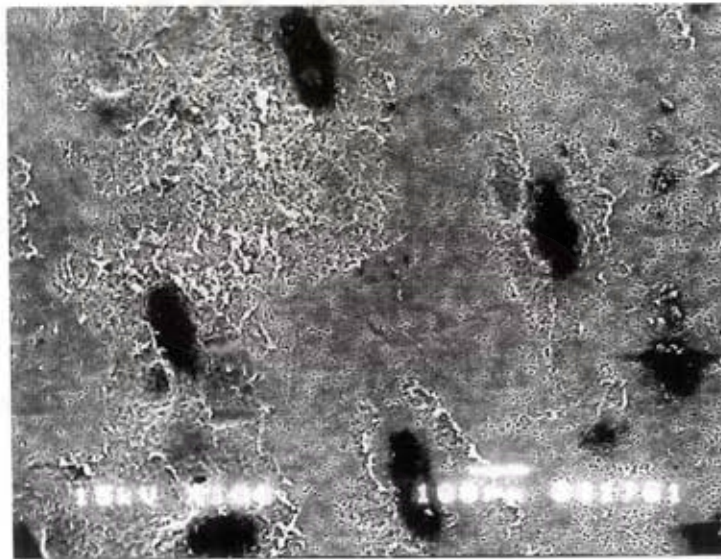


(ค)

รูปที่ 6.41 (ต่อ) ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 ที่กำลังขยาย 100 เท่าซึ่งผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียง
 โดยมีระยะห่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่น เท่ากับ
 (ค) 3.7 เซนติเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.42 ภาพถ่ายของเยื่อแผ่นจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งผ่านการกรองร่วมกับการใช้คลื่นเหนือเสียงในทิศทางตรงข้ามกับการกรอง

(ก) ด้านที่สัมผัสกับสายป้อน

(ข) ด้านที่สัมผัสกับสายเพอมีเอท

6.4 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการทดลองทำให้ทราบว่า การใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรองอย่างเหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มอัตราการกรองให้กับระบบได้ โดยไม่ทำให้เยื่อแผ่นและอนุภาคที่ใช้กรองสูญเสียคุณสมบัติไป หากพิจารณาปริมาณสารละลายที่กรองได้ในปริมาณที่เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องใช้ในการผลิตคลื่นเหนือเสียงกับพลังงานที่ใช้ในเครื่องกรองแบบปกติ ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ความคุ้มค่าในส่วนของค่าปฏิบัติการ (operating cost) ได้

ในการทดลองหาค่าผลการทดลองที่ 104 และ 103 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการกรองเมื่อมีการใช้ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 2 ตัวที่ 20 วัตต์ต่อตัวและเมื่อไม่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง พบว่า อัตราการกรองคงที่ของการกรองมีค่า 0.089 และ 0.030 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที่ตามลำดับ นั่นคือการใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรองทำให้อัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า หากพิจารณาปริมาตรที่ผ่านการกรองเท่ากัน กระบวนการกรองที่ใช้คลื่นเหนือเสียงจะสามารถลดเวลาในการปฏิบัติงานลงได้หรือสามารถลดพลังงานเนื่องจากการใช้ปั๊มลงได้เหลือเพียงหนึ่งในสาม แต่ต้องการใช้พลังงานเพิ่มในส่วนของกาผลิตคลื่นเหนือเสียง และเนื่องจากการใช้คลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงเป็นเวลานาน อาจมีผลต่อเยื่อแผ่นในส่วนของความสามารถในการเก็บกักและทำให้อายุการใช้งานน้อยลง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดขึ้นเพิ่มเติมในส่วนนี้ด้วย อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า การใช้คลื่นเหนือเสียงที่ความเข้มต่ำไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเก็บกักรวมทั้งยังคงทำให้อัตราการกรองมีค่าสูงเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นในการเปรียบเทียบนี้ การพิจารณาค่าใช้จ่ายของการเปลี่ยนเยื่อแผ่นจึงอาจละทิ้งได้

ถ้าให้ S คือ พลังงานที่ใช้ในการดำเนินการกรอง และ T คือ พลังงานที่ใช้ในการผลิตคลื่นเหนือเสียง เราสามารถเขียนสรุปเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในเครื่องกรอง 2 ชนิด ดังแสดงดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการของเครื่องกรองที่มีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

พลังงาน	เครื่องกรองธรรมดา	เครื่องกรองที่ใช้คลื่นเหนือเสียง
พลังงานคลื่นเหนือเสียง	-	T
พลังงานในการดำเนินการกรอง	S	$S/3$
พลังงานรวม	S	$T+(S/3)$

กำหนดให้ a คือค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) จะสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานของระบบทั้งสองได้ดังนี้

- เครื่องกรองธรรมดา Sa
- เครื่องกรองที่ใช้คลื่นเหนือเสียง $[T+(S/3)]a$

ดังนั้น การดำเนินการของเครื่องกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง จะให้ผลคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วน of ค่าปฏิบัติการ ก็ต่อเมื่อ $Sa > [T+(S/3)]a$

ตัวอย่างการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการ

ระบบการกรอง 2 ระบบ เมื่อมีการใช้และไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง โดยกำหนดให้ว่า ต้องการกรองสารให้มีปริมาตร 1 ลิตร (เพอมีเอท) ใช้ปริมาณ 0.37 กิโลวัตต์ (0.5 แอมป์) มีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 4 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยระบบการกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงจะใช้กำลัง 0.04 กิโลวัตต์ ทำให้ได้อัตราการกรองสูงกว่าการกรองปกติ 3 เท่า ดังนั้นเราสามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการของแต่ละระบบได้ดังนี้

สำหรับการกรองแบบธรรมดา

$$\begin{aligned} \text{อัตราการกรอง} &= (\text{ฟลักซ์})(\text{พื้นที่การกรอง}) \\ &= 0.030 \times 16.6 \times 7.2 \\ &= 3.5856 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที} \\ \text{เวลาที่ใช้} &= \text{ปริมาตรที่ผ่านการกรอง} / \text{อัตราการกรอง} \\ &= 1,000 / 3.5856 \\ &= 279 \text{ นาที หรือ } 4.65 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

สำหรับการกรองแบบใช้คลื่นเหนือเสียง

$$\begin{aligned} \text{อัตราการกรอง} &= 10.64 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที} \\ \text{เวลาที่ใช้} &= 94 \text{ นาที หรือ } 1.56 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของ

- เครื่องกรองธรรมดา $(0.37 \times 4.65) \times 4.00 = 6.882$ บาท
- เครื่องกรองที่ใช้คลื่นเหนือเสียง $[(0.04 \times 1.56) + (0.37 \times 1.56)] \times 4.00 = 2.558$ บาท

ซึ่งจะเห็นได้ว่า เครื่องกรองที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีค่าเพียง 37.17 เปอร์เซ็นต์ของเครื่องกรองแบบธรรมดา เพื่อให้ได้เพอมีเอทปริมาณเท่ากัน โดยมีหมายเหตุว่า การคำนวณนี้ ไม่ได้พิจารณาค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนและติดตั้งเยื่อแผ่นซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงด้วยเหตุผลที่อธิบายแล้วข้างต้น

อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการกรองก็จะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นเพิ่มขึ้นจากการกรองปกติ คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน, การบำรุงรักษาและมีข้อเสียเพิ่มขึ้นจากกระบวนการกรองแบบปกติ อาทิเช่น

- ค่าตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง มีราคาประมาณ 2,800 บาทต่อตัว (สำรวจเมื่อ เดือนมิถุนายน 2541) โดยในการทำการทดลอง แหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 1 ตัวจะครอบคลุมพื้นที่เยื่อแผ่นประมาณ 60 ตารางเซนติเมตร
- ค่าอุปกรณ์ของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับแหล่งกำเนิดเสียงความเข้มสูง ราคาประมาณ 7,800 บาท (สำรวจเมื่อเดือนมิถุนายน 2541) สามารถให้กำลังไฟฟ้าเพียงพอสำหรับแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 6 ตัว รวมทั้งค่าใช้จ่ายของระบบการระบายความร้อนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าและตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง
- ค่าการติดตั้งและการบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้น
- อาจเกิดปัญหาการกัดกร่อนของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ในสารที่ทำกรกรอง
- ปัญหามีเสียงดังรบกวน

เป็นต้น

ตัวอย่างการพิจารณาจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งหมด

จากตัวอย่างที่แล้ว นอกเหนือไปจากค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการแล้ว หากพิจารณาค่าใช้จ่ายในการลงทุน, ติดตั้งและบำรุงรักษารวมด้วย ซึ่งสามารถสรุปค่าใช้จ่ายต่างๆเหล่านี้ได้ ดังนี้

1. ค่าแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง จำนวน 2 ตัว	5,600 บาท
2. ค่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า	7,800 บาท
3. ค่าหม้อแปลงไฟ	1,200 บาท
4. ค่าติดตั้งแหล่งกำเนิดเสียง (20% ของค่าแหล่งกำเนิดเสียง)	1,120 บาท
5. ค่าติดตั้งอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า	1,560 บาท
6. ค่าบำรุงรักษา (5% ของค่าแหล่งกำเนิดเสียงและอุปกรณ์ไฟฟ้า)	670 บาท
7. ค่าพัดลมระบายความร้อน	600 บาท
8. ค่าจ้างทำกล่องเก็บเสียง	800 บาท

รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุน, ติดตั้งและบำรุงรักษาสำหรับคลื่นเหนือเสียง 19,350 บาท

ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการ ซึ่งจะทำให้การใช้คลื่นเหนือเสียงกับการกรองคัมทูนได้ดังนี้

เครื่องกรองแบบธรรมดา		เครื่องกรองแบบใช้คลื่นเหนือเสียง
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	=	ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน + ค่าใช้จ่ายคงที่
$(0.37 \times \text{เวลา}) \times 4.00$	=	$[(0.04 \times \text{เวลา}/3) + (0.37 \times \text{เวลา}/3)] \times 4.00 + 19,350$
เวลา	=	$19,350 / (1.48 - 0.0533 - 0.4933)$
เวลา	=	20,731 ชั่วโมง

หรือ ปริมาณสารที่ผ่านการกรอง $3.5856 \times 60 \times 20,731 / 1,000$ เท่ากับ 4,460 ลิตร

จากการคำนวณสรุปได้ว่า การติดตั้งคลื่นเหนือเสียงกับการกรองดังตัวอย่างที่ผ่านมา จุดคัมทูนจะได้รับเมื่อเวลาการกรองผ่านไป 20,731 ชั่วโมง (2.37 ปี) หรือปริมาณสารที่ผ่านการกรองเท่ากับ 4,460 ลิตร ซึ่งจะเห็นว่า เวลาในการคัมทูนนานมาก เมื่อเทียบกับเงินลงทุนค่าอุปกรณ์, การติดตั้งและค่าบำรุงรักษาตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ถึงแม้ว่าการใช้คลื่นเหนือเสียงจะสามารถเพิ่มอัตราการกรองได้สูงถึง 3 เท่า แต่เนื่องจากการทดลองนี้ (ดังที่ใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ) อัตราการกรองมีค่าต่ำมาก คือ มีค่าเพียง 3.6 มิลลิลิตรต่อนาที ดังนั้นเพื่อให้ได้สาร (เพอมีเอท) 1 ลิตร ต้องใช้เวลานานประมาณ 5 ชั่วโมงและประหยัดเงินได้ประมาณ 4.324 บาท ดังนั้นจึงต้องใช้เวลานานมากจึงจะสามารถถึงจุดคัมทูนที่ไปชดเชยเงินลงทุนในการติดตั้งเครื่องกำเนิดเสียง (ประมาณ 20,000 บาท) ดังนั้น การนำคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้กับการกรอง จึงเหมาะสมกับเครื่องกรองขนาดเล็ก ซึ่งสามารถประหยัดเวลาในการกรองลงได้มาก โดยไม่คำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพราะมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับเวลาที่สามารถประหยัดได้หลายเท่า

อย่างไรก็ตาม เราพบว่าการคำนวณเปรียบเทียบนี้ยังไม่สามารถให้ข้อสรุปของความคัมทูนในการประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียงร่วมกับระบบการกรองอย่างแท้จริง เนื่องจากเรายังสามารถปรับปรุงให้เครื่องกรองมีอัตราการกรองเพิ่มขึ้นด้วยวิธีอื่น เช่น การใช้ความเร็วของสายป้อนสูง (มากกว่า 1 เมตรต่อวินาที) เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมากในปัจจุบัน แล้วจึงทำการเปรียบเทียบกับ การกรองที่ใช้ร่วมกับคลื่นเหนือเสียง และยังคงพิจารณาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นด้วย จึงน่าจะ มีการทดลองศึกษาต่อไป