

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นเหนือเสียง (1)

การนำคลื่นเหนือเสียง (ultrasound) มาใช้ประโยชน์มีมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 20 แต่ปัญหาใหญ่ที่ทำให้ไม่มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเนื่องจากปัญหาการสั่นไหวของอุปกรณ์, การออกแบบให้มีขนาดใหญ่โดยให้ความเข้ม (intensity) มีค่าสูงทำได้ยาก, การระบายความร้อนของตัวกำเนิดคลื่นเสียง (ultrasound transducer) , ประสิทธิภาพของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง, ปัญหาด้านเสียงรบกวนและราคาอุปกรณ์สูง ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน เป็นต้น



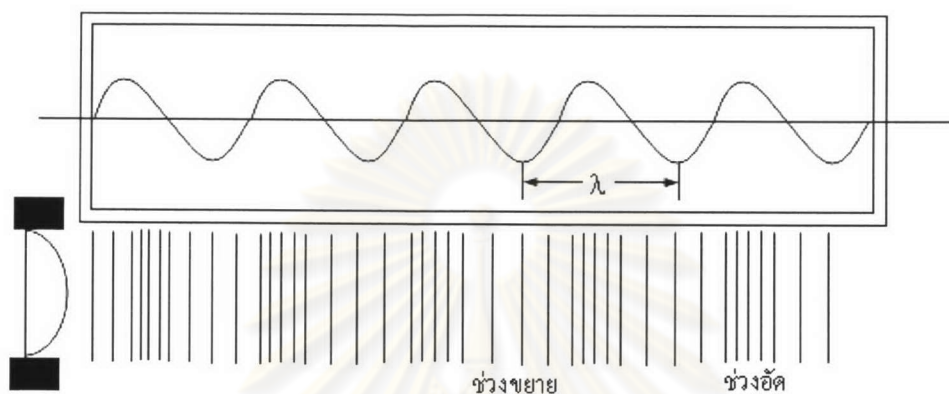
รูปที่ 2.1 คลื่นเสียงที่ความถี่ต่างๆ

คลื่นเหนือเสียง คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่ามนุษย์ได้ยิน (รูปที่ 2.1) โดยทั่วไปมนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วง 16 Hz – 16 kHz สำหรับคลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์จะมีความถี่อยู่ในช่วง 20 kHz – 10 MHz การนำมาใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงความถี่ คือ

2.1.1) ช่วงความถี่สูง (2 – 10 MHz) มีการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสิ่งที่อยู่ใต้ของเหลว ต่อมามีการพัฒนาจนสามารถทำให้เห็นภาพของเนื้อเยื่อภายในร่างกายได้เช่นเดียวกับการใช้รังสี (ionizing radiations) จึงใช้ในการวินิจฉัยและการรักษาทางการแพทย์

2.1.2) ช่วงความถี่ต่ำ (20 – 100 kHz) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์ทำความสะอาด กระบวนการแตกเซลล์ ถึงปฏิกิริยาแรงปฏิกิริยา เป็นต้น

การเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงมีความสัมพันธ์คล้ายกับการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก (Simple Harmonic ; SHM) เนื่องจากมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำที่เดิม จึงมีแอมพลิจูดและเวลาครบรอบของการเคลื่อนที่ที่คงที่ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของคลื่นเหนือเสียงกับเส้นโค้งไซน์

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว (longitude wave) คือ การเคลื่อนที่ที่จะอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน โดยอนุภาคตัวกลางจะสั่นไปมา หรือย้ายตำแหน่งในทิศแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน การเคลื่อนที่ของคลื่น (propagation of wave) ไปในตัวกลาง จะทำให้เกิดการสั่นสะท้อนของโมเลกุลเกิดเป็นส่วนอัด (compression) และส่วนขยาย (rarefaction) ของความดันสลับไปมาในตัวกลาง บริเวณพื้นผิวหน้าของของเหลวที่ถูกอัดจะทำให้ความหนาแน่น และความดันของของเหลวเพิ่มมากขึ้น เกิดการชนกันของโมเลกุลบริเวณนี้มากจึงส่งผลไปกดของเหลวในชั้นถัดไปเรื่อยๆ บริเวณที่ถูกกดตอนแรกจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิม และเมื่ออยู่ในส่วนขยายจะทำให้ความดันและความหนาแน่นลดลง ส่วนอัดและส่วนขยายนี้จะเดินทางด้วยความเร็วค่าหนึ่งขึ้นกับความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (compressibility) ของสารที่เป็นตัวกลาง ความยาวคลื่น(เมตร) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = c/f \dots\dots\dots(2.1)$$

โดย c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (เมตรต่อวินาที)
 f คือ ความถี่ของคลื่นเสียง

2.2 ปรากฏการณ์จากการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลาง

เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางของของเหลว ถ้าขนาดของคลื่นหรือแอมพลิจูดในช่วงความดันขยาย (rarefaction cycle) มีค่าสูงเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของของเหลว (tensile strength) จนสูญเสียโครงสร้างของของเหลว จะเกิดเป็นช่องว่างหรือฟองขึ้น ในทางทฤษฎีปรากฏการณ์นี้แทบจะไม่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากแอมพลิจูดของคลื่นต้องมีค่าสูงมากเป็นค่าหลายพันบาร์ จึงจะเอาชนะแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของของเหลวได้ อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าภายในของเหลวนั้นมีจุดกำเนิด (nuclei) เช่น ฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ปรากฏอยู่ทั้งภายในตัวของของเหลว หรืออยู่ที่บริเวณผิวของของเหลว นั้น หรือแม้กระทั่งที่บริเวณผิวของภาชนะที่บรรจุของเหลว นั้นๆ เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านของเหลวนี้ ฟองอากาศในของเหลวเหล่านี้จะถูกแรงกระทำทั้งแรงอัด และแรงขยาย เนื่องจากความดันของเสียง ฟองจึงมีขนาดโตขึ้นและหดตัวลงสลับกันเป็นจังหวะตามแรงดันของคลื่นเสียงเกิดเป็นสิ่งที่เรียกว่า คาวิเทชัน (cavitation) ในขณะที่คาวิเทชัน โตและหดตัวลงนี้ จะมีก๊าซภายในของเหลวแพร่เข้าและออกจากฟองอากาศนี้สลับกันไป สำหรับฟองอากาศที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งก็เช่นเดียวกัน ในช่วงจังหวะขยายของคลื่นเสียง ซึ่งทำให้ความดันภายในฟองหรือภายในตัวกลางมีค่าลดลง ถ้ามีค่าน้อยลงจนความดันภายในฟองมีค่ามากเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดึงผิวได้ ฟองก๊าซที่ผิวของแข็งจะขยายตัวออกมาจนสามารถหลุดออกมาเป็นฟองในของเหลวได้เช่นกัน ดังรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปก่อนที่คลื่นเหนือเสียงเข้าในของเหลว กรณีที่ระบบมีความดันภายในของเหลวสูง ลักษณะของฟองก๊าซจะมีลักษณะโค้งเว้าเข้าไปในบริเวณช่องว่างของผิวของแข็ง ดังรูปที่ 2.3 (ก) การเกิดคาวิเทชันจึงเกิดได้ยากกว่าในกรณีที่เริ่มต้นความดันภายในของเหลวมีค่าน้อย ผิวของฟองก๊าซจึงโค้งนูนออกมา ดังรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.3 ฟองก๊าซที่อยู่บนผิวของแข็ง

- (ก) เมื่อความดันภายในของเหลวมีค่ามาก
- (ข) เมื่อความดันภายในของเหลวมีค่าน้อย

โดยทั่วไป คาวีเทชันที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. คาวีเทชันแบบคงตัว (stable cavitation) คาวีเทชันชนิดนี้จะเกิดขึ้นในสภาวะที่ความถี่และความเข้มของคลื่นเสียงเหมาะสมกับคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลาย ทำให้คาวีเทชันค่อนข้างคงที่ในหลายช่วงคลื่น

2. คาวีเทชันแบบชั่วคราว (transient cavitation) คาวีเทชันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 2 เท่า ในแต่ละช่วงคลื่นและยุบตัวในส่วนอัด การยุบตัวของคาวีเทชันจะเกิดเป็นฟองเล็กๆ ซึ่งจะเป็จุดกำเนิด (nuclei) สำหรับการเกิดคาวีเทชันต่อไปและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (shock wave) เนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชันเกิดขึ้นในเวลารวดเร็วมากคือในระดับนาโนวินาที จึงสมมติว่าไม่มีการแพร่ของก๊าซเข้า-ออกจากคาวีเทชัน ภายในคาวีเทชันสามารถประกอบด้วยไอของเหลวหรือก๊าซหรือทั้งสองอย่าง ถ้าไม่มีก๊าซภายในคาวีเทชันนี้ การยุบตัวของคาวีเทชันจึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรง เนื่องจากไม่มีก๊าซภายในฟองมาทำหน้าที่รับแรงกระแทก ส่วนไอของเหลวภายในฟองสามารถเกิดการควบแน่นและระเหยได้อย่างอิสระในช่วงการยุบตัวของคาวีเทชัน ทำให้การยุบตัวของคาวีเทชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (คือ มีขนาดเล็กลงจนรัศมีมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด) มากกว่าในกรณีที่มีก๊าซ ซึ่งก๊าซจะทำหน้าที่รับแรงกระแทก เนื่องจากไม่สามารถแพร่ออกจากคาวีเทชันได้ในเวลาของการยุบตัวที่สั้นมาก การยุบตัวจึงเกิดอย่างไม่สมบูรณ์ ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) และความดันสูงสุด (P_{max}) ที่เกิดขึ้นภายในคาวีเทชัน ณ ขณะที่เกิดการยุบตัวได้จากสมการต่อไปนี้ (2)

$$T_{max} = T_0 \{P_m(K-1)/P\} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$P_{max} = P \{P_m(K-1)/P\}^{K/(K-1)} \dots \dots \dots (2.3)$$

โดยที่	T_0	คือ อุณหภูมิของของเหลว (เคลวิน)
	K	คือ ค่าพอลิโทรปิกอินดิค (3) (Polytropic index) ของก๊าซ (-)
	P	คือ ความดันภายในคาวีเทชัน เมื่อมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ P_v ของของเหลว ซึ่งถ้าภายในคาวีเทชันมีก๊าซบรรจุอยู่ P จะมีค่าเท่ากับ $P_v + P_g$ (กิโลปาสกาล)
	P_m	คือ ความดันภายในคาวีเทชันของของเหลว ณ เวลาที่เกิดการยุบตัวของฟอง โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ $P_h + P_g$ (กิโลปาสกาล)
	P_v	คือ ความดันไอภายในคาวีเทชัน (กิโลปาสกาล)
	P_g	คือ ความดันของก๊าซภายในคาวีเทชัน (กิโลปาสกาล)
	P_h	คือ ความดันของของเหลวเนื่องจากแรงกดของน้ำ (กิโลปาสกาล)

P_a คือ ความดันของคลื่นเสียง (กิโลปาสกาล)

จากการคำนวณ ค่าอุณหภูมิสูงสุดและความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของควิวเทชันแบบชั่วคราวนี้มีค่าสูงได้ในอันดับของหลายพันเคลวิน และหลายร้อยความดันบรรยากาศ ตามลำดับ จากสมการ (2.2) และ (2.3) นำมารวมเป็นสมการเดียวเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และอุณหภูมิสูงสุดของควิวเทชัน

จากสมการ (2.2)

$$P_m = (T_{\max} P) / \{T_0 (K-1)\} \dots\dots\dots(2.4)$$

แทนสมการ (2.4) ใน สมการ (2.3) แล้วจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$P_{\max} = P (T_{\max} / T_0)^{K/(K-1)} \dots\dots\dots(2.5)$$

นำสมการ (2.2) ถึง สมการ (2.5) มาคำนวณเพื่อประมาณค่าของอุณหภูมิ และความดันสูงสุดเมื่อควิวเทชันแตกออก ตัวอย่างเช่น ถ้าในฟองอากาศประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจน ที่มีค่า พอลิโทรปิกอินเด็ก = 1.33 ในสารละลายที่อุณหภูมิ, $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (293 K) และความดันบรรยากาศ, $P_m = 1 \text{ atm}$ (1.01325×10^5 กิโลปาสกาล) จากสมการ (2.2) และ สมการ (2.3) ได้ อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากควิวเทชัน 4200 K (3927°C) และ 975 atm

2.3 ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อความยากง่ายในการเกิดควิวเทชัน (ควิวเทชันเทรโซลด์) ได้แก่ (1)

2.3.1 ก๊าซและอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว

การที่ก๊าซหรืออนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในของเหลวจะเป็นจุดอ่อนของโครงสร้างของของเหลวนั้น ทำให้ค่าแรงดึง (tensile strength) ของของเหลวลดลง และส่งผลให้ค่าควิวเทชันเทรโซลด์ลดลง การที่มีก๊าซปรากฏภายในของเหลวจะทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของควิวเทชันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เพราะก๊าซจะทำหน้าที่รับแรงกระแทกของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว (shock wave) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากก๊าซไม่สามารถแพร่ออกจากควิวเทชันได้ในช่วงเวลายุบตัวอันสั้นของควิวเทชัน การยุบตัวจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งยังทำให้ค่าอุณหภูมิและความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของควิวเท

ชั้นมีค่าลดลง ดังสมการ (2.2) และ สมการ (2.3) ซึ่งค่า P มีค่าเท่ากับ $P_v + P_g$ ดังนั้นความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของควิวเทชันที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย

2.3.2 ความดันภายในของเหลว การเพิ่มความดันภายในของเหลว ส่งผลทำให้จุดกำเนิดของฟองอากาศบางส่วนอาจจะยุบตัวลงจนละลายเข้าไปในของเหลว จำนวนของจุดกำเนิดจึงมีน้อยลง นอกจากนั้นแล้วการเพิ่มความดันในระบบ จะทำให้ฟองอากาศที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งมีขนาดเล็กลงและลักษณะโค้งเว้าเข้าข้างใน ทำให้ต้องการความดันของคลื่นสูงมากขึ้นจนเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวให้ฟองอากาศเหล่านี้หลุดออกมาเป็นควิวเทชันต่อไปได้ จึงทำให้ค่าควิวเทชันเทรสโฮลด์มีค่าสูงขึ้น การเกิดควิวเทชันจึงยากขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความดันภายในของเหลวจะทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของควิวเทชันมีมากขึ้น จากสมการ (2.3) เนื่องจากค่า P_m เท่ากับ $P_h + P_g$ ดังนั้นเมื่อ P_h มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของควิวเทชันมีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นแล้ว เวลาที่ใช้ในการยุบตัวของควิวเทชันสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = 0.915R_m(\rho/P_m)^{1/2}(1+P_{vg}/P_m) \dots \dots \dots (2.6)$$

โดยที่ P_{vg} คือ ความดันของไอหรือก๊าซภายในควิวเทชัน (กิโลปาสกาล)
 R_m คือ รัศมีของควิวเทชันก่อนการยุบตัว (ไมโครเมตร)

ดังนั้นเมื่อ P_m มีค่ามากขึ้น τ จะลดลง ซึ่งหมายถึงจะทำให้การยุบตัวของควิวเทชันจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วขึ้น ส่งผลทำให้ผลกระทบของคลื่นเสียงต่อระบบมีค่ามากขึ้นด้วยตามลำดับ

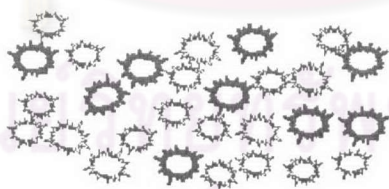
2.3.3 ความหนืดของของเหลว เนื่องจากการเกิดควิวเทชัน ค่าความดันของเสียงในช่วงขยายจะต้องเอาชนะแรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลของของเหลว ดังนั้นถ้าค่าแรงตึงผิวนี้อาจสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าควิวเทชันเทรสโฮลด์มีค่าสูงขึ้นด้วย แรงตึงผิวนี้อาจเพิ่มขึ้นถ้าของเหลวมีความหนืดมากขึ้น ดังนั้นของเหลวที่มีค่าความหนืดสูงจะทำให้เกิดควิวเทชันได้ยากกว่าของเหลวที่มีค่าความหนืดต่ำกว่า

2.3.4 ความถี่ของคลื่นเหนือเสียง คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่สูงๆ จะให้ควิวเทชันขนาดเล็ก เช่นรายงานวิจัยที่มีการศึกษา(4) พบว่าที่ความถี่ 20 kHz ฟองอากาศมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 170 ไมครอน ดังรูปที่ 2.5 แสดงขนาดของควิวเทชันที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่างๆกัน จากช่วง

ความถี่ต่ำไปยังความถี่สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่ของคลื่นเหนือเสียงที่ให้แก่ตัวกลางหรือสารละลายมีค่าสูงขึ้น ขนาดของควาวิเทชันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลง และมีจำนวนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบขนาดของควาวิเทชันในช่วงความถี่ 20 – 30 kHz (รูปที่ 2.4 (ก)) ขนาดของควาวิเทชันมีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือที่ความถี่ 40 kHz (รูปที่ 2.4 (ข)) และที่ช่วงความถี่ 65 – 70 kHz (รูปที่ 2.4 (ค)) ควาวิเทชันที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุด ตามลำดับ ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อความถี่ของคลื่นเหนือเสียงเพิ่มขึ้น เวลาของช่วงอัด และช่วงขยายของคลื่นเสียงมีขนาดสั้นลง ควาวิเทชันจึงมีเวลาจำกัดในการขยายตัวออก ในขณะเดียวกัน จำนวนรอบของช่วงอัด และช่วงขยายมีมากขึ้น จึงทำให้ที่ความถี่สูงมีจำนวนควาวิเทชันขนาดเล็กจำนวนมาก กล่าวโดยสรุปได้ว่า ความเข้ม หรือปริมาณควาวิเทชันที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับความถี่ของคลื่นเหนือเสียง ในทางกลับกัน ขนาดของควาวิเทชันแปรผกผันกับความถี่ของคลื่นเหนือเสียง

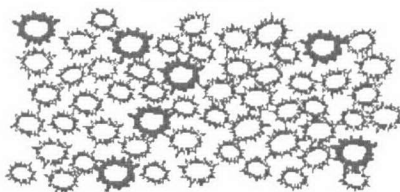
จากที่กล่าวมาแล้วว่า การเกิดควาวิเทชันเนื่องจากการสูญเสียโครงสร้างของของเหลวในช่วงความดันขยายของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งจะต้องใช้เวลาค่าหนึ่งทีเพียงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ ซึ่งหากว่าเวลาที่ต้องการนี้มีค่ามากกว่าช่วงเวลาในช่วงขยายของคลื่นซึ่งเป็นช่วงที่จะทำให้เกิดควาวิเทชัน ควาวิเทชันก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากมีเวลาไม่เพียงพอ ($f = 1/T$ โดย f คือ ความถี่ของคลื่น [รอบต่อวินาที หรือ เฮิรซ์] และ T คือคาบ [วินาที] โดยที่ช่วงเวลาของความดันขยายมีค่าเท่ากับ $T/2$)

20 - 30 kHz



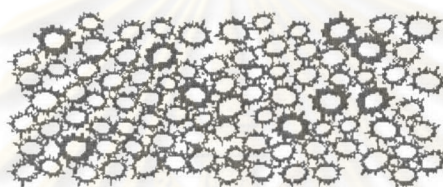
(ก) แบบจำลองลักษณะควาวิเทชันในช่วงความถี่ 20-30 kHz

40 kHz



(ข) แบบจำลองลักษณะคาวิตีที่ความถี่ 40 kHz

65 - 70 kHz



(ค) แบบจำลองลักษณะคาวิตีในช่วงความถี่ 650-70 kHz

รูปที่ 2.4 ลักษณะของการเกิดคาวิตีที่ความถี่คลื่นเหนือเสียงต่างๆ

สำหรับความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิตีที่เกิดขึ้น เมื่อความถี่สูงขึ้น คาบหรือเวลาของแต่ละรอบของคลื่นจะมีค่าสั้นลง ดังนั้นอาจจะไม่เพียงพอให้คาวิตียุบตัวได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิตีก็จะมีค่าน้อยกว่ากรณีการยุบตัวอย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ที่สูงกว่า 68 kHz เวลาในการก่อตัว จนกระทั่งแตกออกใช้เวลาประมาณ 1 ใน 3 ของที่ความถี่ 25 kHz อย่างไรก็ตามที่ความถี่ต่างๆกัน พลังงานต่ำสุด ที่ใช้ในการเกิดคาวิตีต้องมากกว่าคาวิตีเทรสโฮลด์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าคลื่นเหนือเสียงต้องมีความดันของแอมพลิจูดมากเพียงพอที่จะเอาชนะแรงพันธะของโมเลกุล และแรงยึดหยุ่นตามธรรมชาติของตัวกลางของเหลว ดังนั้นการเพิ่มความถี่ของคลื่นเหนือเสียงซึ่งหมายถึงการลดช่วงเวลาของความดันขยายจะทำให้การเกิดคาวิตียากขึ้น หรือค่าคาวิตีเทรสโฮลด์เพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดฟองที่ความถี่สูงๆก็ต้องมีค่าสูงขึ้น

โดยในน้ำที่อุณหภูมิห้อง พลังงานต่ำสุดของคลื่นเหนือเสียงที่สามารถเกิดคาวิตีได้มีค่าประมาณ 0.3 W/cm^2 สำหรับความถี่ 20 kHz และ 0.5 W/cm^2 สำหรับความถี่ 40 kHz ตามลำดับ

2.3.5 อุณหภูมิ โดยปกติการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าความหนืดของของเหลวมีค่าลดลง ค่าความดันไอ (vapor pressure) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะส่งผลให้ค่า คาวิตชันเทรตโฮลด์มีค่าลดลง หรือที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเกิดคาวิตชันจะง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาฟองเดี่ยวที่มีรัศมี R_0 ในของเหลวที่มีความดันเนื่องจากแรงกดของน้ำ (hydrostatic pressure ; P_h) ถ้าฟองนี้อยู่ในสมดุล แรงดันภายในฟองต้องมีค่าเท่ากับแรงดันภายนอก ที่จะพยายามทำให้ฟองยุบตัว เขียนสมการสมดุลแรงได้ดังนี้

$$P_v + P_g = P_h + 2\sigma/R_0 \dots \dots \dots (2.7)$$

โดย σ คือ แรงตึงผิวของของเหลว

และฟองอากาศจะขยายออก หรือโตขึ้นเมื่อ $(P_v + P_g)$ มีค่ามากกว่า $(P_h + 2\sigma/R_0)$ ดังสมการ (2.8)

$$P_v + P_g > P_h + 2\sigma/R_0 \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\text{หรือ } P_v > P_h + 2\sigma/R_0 - P_g \dots \dots \dots (2.9)$$

เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านของเหลวที่มีฟองนี้ซึ่งมีความดัน (P_a) เท่ากับ $P_A \sin(2\pi ft)$ [P_A คือ แอมพลิจูดของคลื่น] โดยมีค่าขึ้นกับเวลา ในระหว่างช่วงอัดของคลื่น ค่า P_a จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นในระหว่างนี้ค่าความดันในของเหลวจะเพิ่มขึ้นจาก P_h เป็น $P_h + P_a$ และในระหว่างช่วงขยายของคลื่น ค่า P_a จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นค่าความดันในของเหลวจะเท่ากับ $P_h - P_a$ สมการ (2.7) จึงเขียนได้ใหม่ว่า

$$P_v + P_g = P_h \pm P_a + 2\sigma/R_0 \dots \dots \dots (2.10)$$

ถ้าสมมติว่า ค่า P_a และ σ มีค่าน้อยมาก จนละทิ้งได้

$$P_v = P_h \pm P_a \dots \dots \dots (2.11)$$

จากสมการ (2.11) จะเห็นได้ว่าถ้า P_v มีค่ามากกว่าค่าน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงอยู่ในช่วงขยาย ซึ่งทำให้เทอมขวามีค่าน้อยที่สุดคือเท่ากับ $P_h - P_a$ คาวีเทชันนี้จะมีขนาดโตขึ้นเนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ค่า P_v ของของเหลวเพิ่มขึ้น ดังนั้น คาวีเทชันจะสามารถโตได้ง่ายขึ้นจึงเป็นการเพิ่มผลกระทบของคลื่นเสียงต่อระบบด้วย ในอีกทางหนึ่ง การเพิ่มขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นหรือ P_a จะทำให้เกิดคาวีเทชันได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง หากเราพิจารณาค่าของแรงดึงผิว (σ) เข้าไปในสมการจะได้

$$P_v - (2\sigma/R_0) = P_h - P_a \dots\dots\dots(2.12)$$

โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าแรงดึงผิวของของเหลวมีค่าลดลง ดังนั้นจะทำให้คาวีเทชันสามารถโตได้ง่ายขึ้น หรือค่าคาวีเทชันเทรสโฮลด์ลดลงนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสมการ (2.2) จะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า P_v สูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวีเทชันมีค่าลดลง

2.3.6 ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง โดยทั่วไป การเพิ่มความเข้มของเสียง คือการเพิ่มค่า P_a ซึ่งจะทำให้ความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการยุบตัวของคาวีเทชันมีค่าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการยุบตัวของคาวีเทชันมีค่าลดลง ดังสมการ (2.2), (2.3) และ (2.6) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มของเสียงก็มีขีดจำกัด เนื่องจากขนาดของฟองที่ใหญ่ที่สุด (R_{max}) มีค่าขึ้นอยู่กับ แอมพลิจูดของคลื่นเสียงด้วย ดังสมการ

$$R_{max} = (4/3\omega)*(P_a - P_h)*(2/\rho P_a)^{1/2} [1 + 2(P_a + P_h)/(3P_h)]^{1/3} \dots\dots\dots(2.13)$$

ถ้าขนาดของแอมพลิจูดสูงมากเกินไปอาจจะทำให้ขนาดของคาวีเทชันมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งต้องการเวลาในการยุบตัวสูงขึ้น จึงอาจทำให้คาวีเทชันไม่สามารถยุบตัวได้อย่างสมบูรณ์ภายในช่วงเวลาความดันขยายของคลื่น 1 รอบ ดังนั้นจึงทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวีเทชันลดลง การเลือกค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการเกิดคาวีเทชัน จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการพิจารณาการใช้คลื่นเหนือเสียง

2.4 การประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียง (5) สามารถแยกได้ 3 กรณี คือ

2.4.1 ใช้ในกระบวนการทางเคมี คลื่นเหนือเสียงทำให้เกิดผลดีต่อระบบ เช่น ลดการใช้สารเร่งปฏิกิริยา, ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น เช่น

2.4.1.1 ปฏิกิริยาต่อสารเนื้อผสม (Heterogeneous reaction)

- ระบบของผสม (solid-liquid system) การใช้คลื่นเหนือเสียงจะช่วยทำความสะอาดผิวของแข็งเพื่อเพิ่มผิวสัมผัส เป็นการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น สำหรับผงฝุ่น (powder) หรืออนุภาคขนาดเล็ก คลื่นเหนือเสียงจะสามารถลดขนาดและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของแข็ง และของเหลวได้ โอกาสการสัมผัสกันจึงมีสูงขึ้น

- ระบบสารแขวนลอย (liquid-liquid system) การนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้จะสามารถเพิ่มพื้นที่การสัมผัส (interfacial contact area) ให้กับกระบวนการอิมัลซิฟิเคชัน (emulsification)

2.4.1.2 ปฏิกิริยาต่อสารเนื้อเดียว (homogeneous reaction) คลื่นเหนือเสียงจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิในบริเวณที่ฟองยุบตัวมีค่าสูงมาก

2.4.2 ใช้ในกระบวนการทางกายภาพ การทำความสะอาดผิวของแข็งจะใช้คลื่นเหนือเสียงที่พลังงานสูง ฟองที่ยุบตัวจะทำให้เกิดแรงกล (mechanical force) บนผิวของแข็ง ซึ่งสามารถทำความสะอาดพื้นผิววัสดุที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนได้ โดยจุ่มวัสดุที่ต้องการทำความสะอาดลงในเครื่องมือ ซึ่งจะมีการกำหนดจุดวางเพื่อให้วัสดุได้รับความเข้มเสียงมากที่สุด

ใช้ในกระบวนการไล่ก๊าซ (degassing process) โดยคลื่นเหนือเสียงที่พลังงานสูงจะทำให้เกิดฟอง ก๊าซที่ผสมอยู่ในของเหลวจะแพร่เข้ามาในฟอง เมื่อฟองใหญ่ขึ้นก็จะลอยขึ้นไปยังผิวน้ำของเหลว จะใช้ในอุตสาหกรรมหลอมเหล็กกล้า, แก้ว, เส้นใยสังเคราะห์และเรซิน เป็นต้น

ช่วยทำความสะอาดเยื่อแผ่นในกระบวนการกรอง เป็นการเพิ่มอัตราการกรองให้กับระบบ โดยสามารถเพิ่มอัตราการกรอง, ช่วยในการผสมหรือทำให้เกิดเป็นสารแขวนลอย (emulsion) ซึ่งจะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, สี, เครื่องสำอาง และเภสัชกรรม

2.4.3 ใช้ในกระบวนการทางชีวภาพ มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ในการทำให้ผนังเซลล์แตก และช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลสารผ่านผนังเซลล์ได้

2.5 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่นิยมใช้กันทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.5.1 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานกล (mechanical transducer) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนจากพลังงานการเคลื่อนที่ (kinetic energy) ของของไหล (stream fluid) ไปเป็นพลังงานคลื่นเสียง ซึ่งสร้างคลื่นเสียงให้มีความถี่ได้สูงสุด 100 กิโลเฮิรซ์

2.5.2 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานไฟฟ้า (electromechanical transducer) จะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง เช่น จากการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetostrictive oscillators), การเคลื่อนที่ของคอยล์ (moving coil) และจากเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (piezoelectric transducer) จึงสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงกว้าง

เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เป็นชื่อที่ใช้เรียกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกซึ่งมีการจัดเรียงตัวของไดโพล (electric dipole) อย่างเป็นระเบียบ เมื่อถูกแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นและมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor)

การทำให้โมเลกุลแสดงการจัดเรียงตัวของประจุในโครงร่างผลึกมีทิศทางเดียวกันทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุจนถึงอุณหภูมิระดับหนึ่งซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) จะทำให้ไดโพล (dipole) เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ที่จุดนี้จะใส่ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปและลดอุณหภูมิลง ทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ เพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้ ดังนั้นหากนำวัสดุที่มาดำเนินการในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี จะทำให้วัสดุเสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้ไป

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเพียโซอิเล็กทริก คือ ประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกจะเสื่อมลงเมื่อใช้งานไปเป็นเวลานาน เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุลดลงทำให้ได้พลังงานเนื่องจากการสั่นลดลง และทำให้ปริมาณของควาวิเทชันลดลง นอกจากนี้เพียโซอิเล็กทริกที่วางเรียงกันเป็นชุดนั้นใช้กาวอีพอกซี เมื่อทรานสดิวเซอร์ทำงานก็จะเกิดความร้อน ทำให้พันธะของกาวหลวมลง ทำให้ทรานสดิวเซอร์ใช้งานไม่ได้ คุณสมบัติการเป็นตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป ทำให้ไม่สามารถปรับค่าของตัวกำเนิดคลื่นได้

การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetostrictive oscillators หรือ magnetostrictive transducer) ประกอบด้วยลวดไฟฟ้าพันรอบแผ่นนิเกิล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น โดยนิเกิลมีคุณสมบัติในการยืด และหดตัวเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าอีกแหล่งหนึ่งก็จะถูกส่งไปยังขดลวด และเกิดการสั่นที่มีความถี่เท่ากับกระแสไฟฟ้า

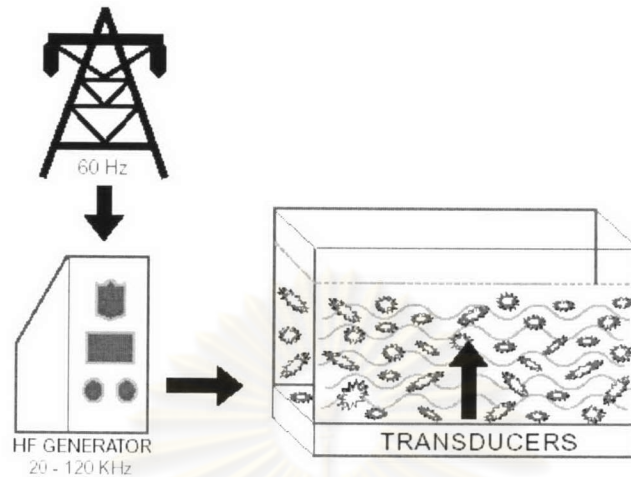
2.6 การทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (4)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการทำความสะอาดอุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้องการความละเอียดสูง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยี และการลดขนาดของส่วนประกอบต่างๆ ที่เล็กลง จึงต้องการความสะอาดเพิ่มขึ้น สิ่งสกปรกที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของผิวหน้า เช่น ความสามารถในการเปียก การยึดเกาะ สมบัติทางแสงหรือไฟฟ้า สิ่งสกปรกดังกล่าวได้แก่ สิ่งตกค้างที่ไม่สามารถระเหยได้ (non-volatile residue, NVR) ซึ่งมีปริมาณอยู่ในระดับไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร และพิโกกรัมต่อตารางเซนติเมตร การตกค้างของไอออน สิ่งตกค้างอันนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ อุตสาหกรรมรถยนต์ หัวอ่านดิสก์ เลนส์ กระจก อุปกรณ์ทางการแพทย์ ยา ชิ้นส่วนยานอวกาศ การชุบเคลือบ เป็นต้น

การทำความสะอาดมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สิ่งตกค้างบนชิ้นงานมีน้อยที่สุด และอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ และไม่ก่อให้เกิดสิ่งสกปรกชนิดใหม่ขึ้นในระบบ การเลือกวิธีการล้างอย่างมีประสิทธิภาพควรคำนึงถึงสิ่งสำคัญ 3 ประการที่มีผลโดยตรงต่อการทำความสะอาด ได้แก่ สารเคมีที่ใช้ล้าง วิธีการขัด-ถูเพื่อทำความสะอาด และสภาวะของการล้าง

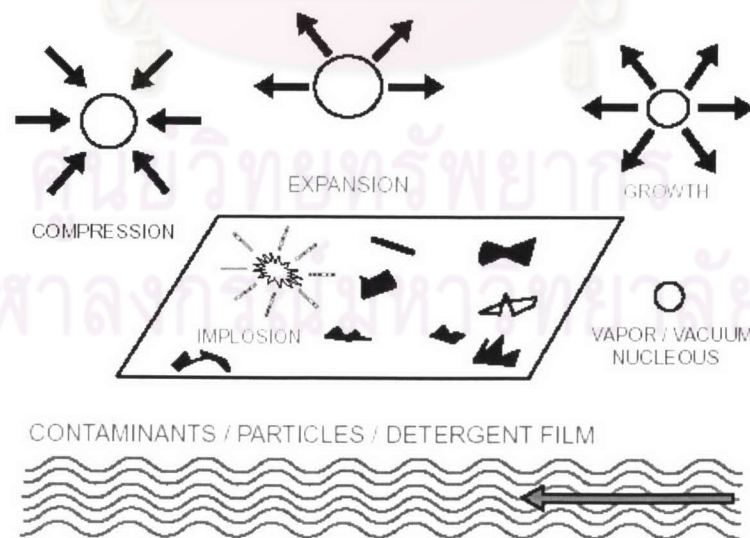
คลื่นเหนือเสียง เป็นคลื่นทางกลที่เกิดจาก แหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง หรือทรานสดิวเซอร์ที่มีความถี่สูง กระแสไฟฟ้าสูง จากแหล่งกำเนิดพลังงาน (power generator) ดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไป คลื่นเหนือเสียงจะมีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 100 kHz ทรานสดิวเซอร์อาจอยู่ด้านล่าง หรือด้านข้างของถังที่มีของเหลวอยู่

จากสิ่งที่กล่าวมาข้างต้น เทคโนโลยีคลื่นเหนือเสียง เป็นวิธีการล้างที่สามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกได้หลายอย่าง เช่น การล้างสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และอนุภาคที่ติดอยู่บนผิว โดยการทำ ความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงเกิดจากการแตกออกของควาวิทเทชัน คลื่นเหนือเสียงจะกระจายควาวิทเทชันในตัวกลางที่เป็นของเหลว ซึ่งพลังงานที่ปล่อยออกมาเมื่อควาวิทเทชันแตกตัว จะแทรกเข้าไปในส่วนลึกที่เป็นจุดบอด และส่วนที่การทำความสะอาดด้วยวิธีปกติ เข้าไปไม่ถึง



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของชุดทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง

เมื่อคลื่นเสียงแตกออกที่บริเวณผิวของของแข็ง พลังงานที่เกิดจากการที่คลื่นเสียงแตกออกจะทำให้สิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวหน้าหลุดออก และทำให้สารทำความสะอาดสามารถเข้าไปแทนที่ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีพลังงานมากเพียงพอในการแตกพันธะของสิ่งสกปรก และทำให้สิ่งสกปรกละลายเข้าไปในตัวกลาง หรือสารละลายได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยคลื่นที่ใช้คลื่นเหนือเสียง

2.7 ความถี่ของคลื่นเหนือเสียง กับการกำจัดฝุ่นขนาดเล็ก (4)

แบบจำลองการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียง ดังรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นกระบวนการเกิด คาวิเทชัน ซึ่งมี 3 ขั้นตอนได้แก่ การก่อตัวของฟองอากาศ การขยายขนาดของฟองอากาศ และฟองอากาศแตกออก โดยจากการที่มีผู้ศึกษา (4) พบว่าคาวิเทชันชั่วคราว (transient cavitation) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 50 – 150 ไมครอน เกิดจากความถี่ 20 kHz และความถี่ 25 kHz ความดันจากการแตกของคาวิเทชันมีค่าประมาณ 35 – 70 kPa และอุณหภูมิประมาณ 5000 องศาเซลเซียส ความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในเรื่องของความถี่ กับการเกิดคาวิเทชัน พบว่าที่ความถี่ช่วงต่ำๆ (20 – 30 kHz) คาวิเทชันที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนน้อย ขนาดใหญ่ และมีพลังงานสูง เมื่อความถี่สูงขึ้น (60 – 100 kHz) คาวิเทชันที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมาก และมีพลังงานต่ำกว่า ความถี่ต่างๆจึงเหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ ในขณะที่ความถี่สูงเหมาะสำหรับการทำความสะอาดสิ่งสกปรกขนาดเล็ก และการทำความสะอาดบนผิวหน้าที่มีความละเอียดสูง โดยอาศัยกระบวนการทำความสะอาดอย่างเป็นขั้นตอน

ตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 68 kHz คาวิเทชันมีความเข้มเพียงพอ และไม่แรงจนเกินไปจึงสามารถกำจัดคราบต่างๆของน้ำยาทำความสะอาด และกำจัดอนุภาคในระหว่างขั้นตอนการล้างโดยไม่ทำให้ผิวของชิ้นงานถูกทำลาย และสามารถทำความสะอาดบริเวณที่เป็นจุดบอดได้ในขณะที่ช่วงความถี่ 35 – 45 kHz ใช้ในการทำความสะอาดผิวของวัสดุ หรือชิ้นงานในอุตสาหกรรมต่างๆ ไป โดยพบว่าคลื่นเหนือเสียงความถี่สูง มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ได้ดีกว่า นั่นคือที่ความถี่ 65 kHz สามารถกำจัดอนุภาคขนาด 0.5, 0.7 และ 1 ไมครอน ได้ 95 % ในขณะที่ความถี่ 40 kHz สามารถกำจัดอนุภาคขนาดดังกล่าวออกได้เพียง 88 % (4)

2.8 การทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงในตัวทำละลายน้ำ และ semi-aqueous (4)

คาวิเทชันที่เกิดขึ้นในน้ำธรรมดาจะมีขีดจำกัดในการทำความสะอาดสิ่งสกปรก โดยกระบวนการทำความสะอาดมีความซับซ้อนมากกว่าเพียงการสกัดแยกสิ่งสกปรกออกจากผิวหน้าเท่านั้น สารทำความสะอาดก็เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการล้าง และมีความสำคัญมากในการทำความสะอาด ซึ่งสารเคมีนั้นต้องสามารถให้ คาวิเทชันได้ดี และมีความเสถียร สามารถเปียกผิวชิ้นงานได้ดี สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างต่างๆได้ มีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมัน สามารถละลายหรือแตกตัวคราบแข็งได้ ล้างออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย รวมไปถึงจนถึงความสามารถในการแยกน้ำออกจากผิวชิ้นงาน

สารทำความสะอาดอาจทำงาน หรือเกิดปฏิกิริยาเพียงหนึ่งขั้นตอนหรือมากกว่า ในการแทนที่ หรือ ละลายสิ่งสกปรกออกมา และป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกกลับมาติดซ้ำอีก สารเติมแต่งแบบพิเศษที่ผสมใน สารทำความสะอาดจะช่วยในกระบวนการแตกพันธะเคมี กำจัดคราบที่เกิดจากการออกซิไดซ์ ป้องกัน การเกิดการกัดกร่อน หรือเพิ่มประสิทธิภาพของผิวงาน

โดยทั่วไป อนุภาคหรือสิ่งสกปรกจะไม่เป็นทรงกลม แต่จะมีรูปร่างไม่แน่นอน บางชนิดยึด เกาะด้วยแรง Van der Waals , electrical double layer , แรง capillary และแรง electrostatic เรามักจะ คาดว่าอนุภาคขนาดเล็กจะสามารถกำจัดออกได้ง่าย แต่ในความเป็นจริงแล้วยังอนุภาคมีขนาดเล็กเท่าไร ก็กำจัดได้ยากขึ้นเท่านั้น น้ำหนักของอนุภาคมีผลอย่างมากต่อการยึดเกาะ จากรายงานของ Kaiser กล่าวไว้ว่า แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวอนุภาคลดลงตามขนาดของอนุภาคที่ลดลง ซึ่งทำให้กำจัดอนุภาคที่ผิวได้ยากขึ้น โดยพิจารณาจากสัดส่วนของ Fa/W คือแรงที่ใช้ดึงอนุภาคออก โดย Fa คือแรงยึดเกาะ W คือ น้ำหนัก ของอนุภาค ซึ่งจะเห็นได้ว่า Fa/W จะเพิ่มขึ้นเมื่อ W มีค่าลดลง

2.9 ระบบของการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียงคลื่นเหนือเสียง และกลไกการทำความสะอาด (5)

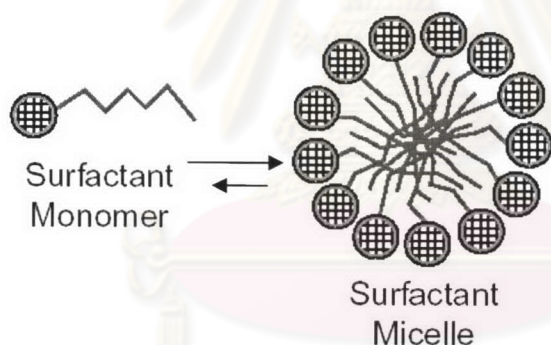
โดยทั่วไป เครื่องล้างแบบคลื่นเหนือเสียงแบบกะ จะประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ การล้างด้วย คลื่นเหนือเสียง การปรับทิศทาง การไหลของสารละลายให้สวนทางกับขั้นตอนแรก เพื่อทำความสะอาด ผิว ความแรงของคลื่นเหนือเสียง และเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับการทำงานทำความสะอาด ระบบการล้างแบบกึ่งน้ำจะ รวมถึงขั้นตอนการแทนที่ด้วยตัวทำละลาย ต่อด้วยการแยกชั้น โดยทั่วไปขนาดของถังล้างมีขนาดตั้งแต่ 20 – 2000 ลิตร ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ปริมาณงาน และเวลาในการทำให้แห้ง ระบบการล้าง สามารถตั้งให้ทำงานอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมต่างๆ จะแตกต่างกันไปตาม ลักษณะของชิ้นงาน โดยปัจจุบันเครื่องจักรมีความสามารถที่จะรองรับการทำงานทำความสะอาดใน clean room class 10000 ลงไปจนถึง clean room class 10 ซึ่งอาศัยการควบคุมระบบการไหล การป้อนสารเคมี การตรวจนับอนุภาคในท่อ การวัดค่า TOC การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) การตรวจเช็คความขุ่น ค่า การนำไฟฟ้า ดัชนีหักเห เป็นต้น ถังล้างจะเป็นถังสเตนเลสที่ทนทานต่อการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามยังมี การใช้วัสดุอื่นๆ เช่น คอวอลซ์ พีวีซี พอลิโพรพิลีน หรือไททานเนียม นำมาทำเป็นส่วนประกอบในการ สร้างถัง เพื่อการใช้งานเฉพาะด้าน การเคลือบผิวด้วยไททานเนียมไนไตรด์ เพื่อยืดอายุการใช้งานของ ถังที่ได้รับรังสีหรือตัวทราวนสควิเซอร์

กลไกการทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ขั้นแรกคือการทำ ความสะอาดผิวหน้า ขั้นที่สองเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจกลับมาติดได้อีกครั้ง โดยทั้ง 2 ขั้นตอนจะ อาศัยเทคนิคที่แตกต่างกันไปภายใต้พื้นฐานของสมบัติ หรือลักษณะของสิ่งสกปรกนั้นๆ

ลักษณะของสิ่งสกปรกโดยทั่วไป มี 3 ลักษณะ ได้แก่ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และอนุภาคทั่วไป อนุภาคที่เกิดขึ้นไม่จำเป็นต้องมาจากเนื้อวัสดุตัวเอง อาจมาจากสิ่งแวดล้อมข้างเคียงก็ได้ โดยสิ่งสกปรกต่างๆเหล่านั้นอาจละลายน้ำได้ และละลายน้ำไม่ได้ สิ่งสกปรกประเภทสารอินทรีย์มักมีสมบัติเป็น hydrophobic (ไม่ชอบน้ำ หรือไม่ละลายน้ำ) เช่น น้ำมัน จารบี แวกซ์ พอลิเมอร์ สี กาว หรือสารเคลือบผิว

ส่วนสิ่งสกปรกประเภทอนินทรีย์มักเป็นสารที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย แต่จะละลายได้ในน้ำน้ำจึงเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุที่เป็นสารไอออนิก ไม่ว่าจะเป็นอินทรีย์ หรือ อนินทรีย์ อย่างไรก็ตามน้ำไม่สามารถละลายสารอนินทรีย์บางชนิดได้ เช่น ผงซักซึ่งทำจากออกไซด์ของอลูมิเนียม ซิลิเนียม หรือเซอร์โคเนียม ในกรณีดังกล่าวต้องใช้ระบบทำความสะอาดแบบพิเศษ

สิ่งสกปรกประเภทสารอินทรีย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ โมเลกุลสายยาว สายกลาง และสายสั้น ซึ่งทำให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไปด้วย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมโนเมอร์และไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

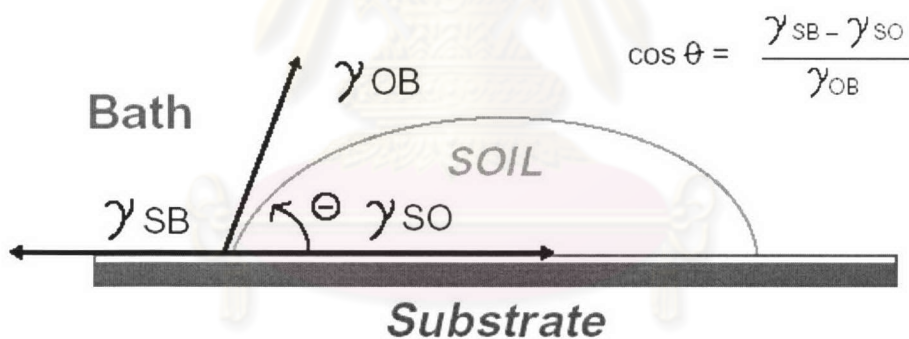
สารอินทรีย์ส่วนมากกำจัดออกได้โดยมีกลไกหลัก 2 ขั้นตอน ได้แก่ขั้นแรกคือการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ องศาของการละลาย (degree of solubility) ของตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดสัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลของสารนั้นๆ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการแทนที่ด้วยสารเคลือบผิวที่เป็นสารลดแรงตึงผิว โดยการ encapsulation และการกระจาย

ในระบบการทำความสะอาดที่ใช้น้ำ น้ำยาทำความสะอาดจะประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว โดยสารลดแรงตึงผิวเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์พันธะยาวที่ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว และไม่มีขั้วในสายโมเลกุล สารลดแรงตึงผิวมีสมบัติเป็นได้ทั้งไอออนิก และนอนไอออนิก ขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่

ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนสายพันธะ เมื่อละลายในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกันเรียกว่า ไมเซล จนมีความเข้มข้นมากกว่า critical micelle concentration(CMC) โดยวงกลมในรูปที่ 2.7 แสดงส่วนที่เป็นไอออนิก หรือแทนที่ครึ่งหนึ่งของโมเลกุลในส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic moiety) และเส้นแสดงส่วนที่เป็นนอนไอออนิก หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ(hydrophobic) ของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว โดยที่สมดุลปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางขวา

กลไกของการกำจัดสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยน้ำยาทำความสะอาดตาม Young's equation ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเพิ่มมุมสัมผัสระหว่างสิ่งสกปรก และผิวหน้า ด้วยเหตุนี้ การลดพื้นที่ผิวที่เปียก โดยการใส่ hydroprobe หรือสารที่ไม่ชอบน้ำจะเป็นการช่วยลดพลังงานในการดึงอนุภาคออก ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SB} - \gamma_{SO}}{\gamma_{OB}} \dots\dots\dots(2.14)$$

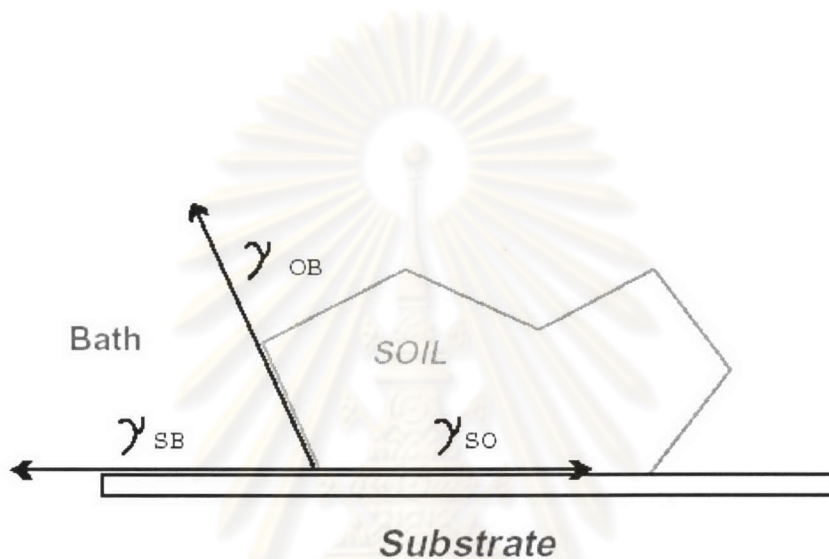


รูปที่ 2.8 ลักษณะของมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนพื้นผิว

ควาเวชันมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการเริ่ม และสิ้นสุดของการทำความสะอาดสิ่งสกปรกประเภท hydrophobic โดยการแตกของควาเวชันจะช่วยเร่งให้สิ่งสกปรกหลุดออก และเคลือบผิววัสดุแทนที่ด้วยน้ำยาทำความสะอาด สิ่งสกปรกที่กำจัดออกแล้วจะจับตัวกับไมเซล ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการป้องกันการเกาะซ้ำของสิ่งสกปรก โดยสรุปหน้าที่ของควาเวชันคือการเร่งการแทนที่สิ่งสกปรกด้วยสารลดแรงตึงผิว และช่วยกระจายการทำความสะอาดบนผิววัสดุ

กลไกของการกำจัดอนุภาค รวมถึงขั้นตอนการดึงอนุภาคออกจะใช้พลังงานน้อยมาก หรือไม่ใช้เลย ดังความสัมพันธ์ของ Gibbs adsorption equation โดยสารลดแรงตึงผิวมีหน้าที่สำคัญมากในการลดการดูดซับของอนุภาคกับตัวกลางขณะอยู่ในถังล้าง ดังรูปที่ 2.9

$$\Delta G = \gamma_{SB} + \gamma_{OB} - \gamma_{OS} \dots\dots\dots(2.15)$$



$$\Delta G = \gamma_{SB} + \gamma_{OB} - \gamma_{SO}$$

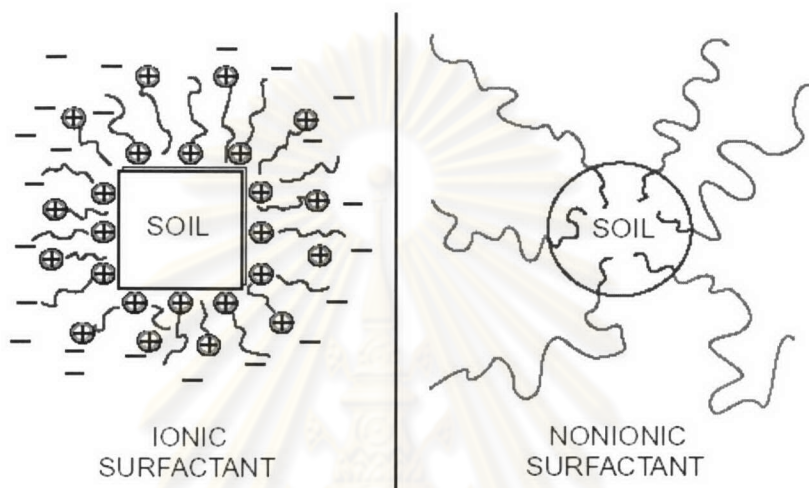
รูปที่ 2.9 แบบจำลองของอนุภาค Soil ที่เกาะอยู่บนพื้นผิว

2.10 การกลับมายึดเกาะของอนุภาค (4)

การกลับมายึดเกาะของอนุภาคสามารถยับยั้งได้ เช่น การสร้างสิ่งกีดขวางระหว่างอนุภาคและผิวหน้า ในระบบการทำความสะอาดด้วยน้ำ สารลดแรงตึงผิวที่ดีพอจะมีสมบัติในการป้องกันการกลับมาติดของอนุภาคได้ ดังรูปที่ 2.10 การกลับมาเกาะติดอีกครั้งของอนุภาคบนผิวหน้าสามารถป้องกันได้โดยอาศัย stearic hindrance สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่เป็นนอนไอออนิก ขณะที่สารลดแรงตึงผิวแบบแอนไอออนิกสามารถป้องกันการกลับมาเกาะติดได้โดยอาศัย electrical repulsive barrier

ปรากฏการณ์ encapsulation สามารถเกิดอย่างถาวรหรือชั่วคราว ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารลดแรงตึงผิว การเกิด encapsulate แบบชั่วคราวนำไปสู่การเกิดอิมัลชัน ซึ่งควรนำสารละลายไปกรองต่อ

ซึ่งปริมาณของสิ่งสกปรกที่เพิ่มขึ้นในสารทำความสะอาด สามารถเพิ่มได้มากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ถ้าไม่ผ่านการกรอง จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดลดลง และเกิดจุดที่ไม่มีการทำความสะอาดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจถึงประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่คงที่ ในระบบการล้างควรมีการกรองสิ่งสกปรกที่กระจายอยู่ในสารละลายด้วย



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการป้องกันการกลับมาเกาะของสิ่งสกปรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.11 เทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา

การใช้เทคนิคแบบ 5W 1H และเทคนิคแบบ 4M ในการตั้งคำถามเพื่อทราบถึงต้นเหตุของปัญหาที่แท้จริง

2.11.1 เทคนิคแบบ 5W 1H (6)

ตารางที่ 2.1 การตั้งคำถามแบบ 5W1H

ประเด็น	ตัวอย่างคำถาม	ประเด็น	ตัวอย่างคำถาม
1. ใคร (Who)	<ul style="list-style-type: none"> • ใครควรต้องเป็นผู้ทำ • ใครควรทำได้ • ใครเป็นคนทำให้เกิดความสูญเปล่า 	4.เมื่อใด (When)	<ul style="list-style-type: none"> • ต้องทำเมื่อใด • ควรทำตั้งแต่เมื่อใด • มีเวลาใดทำอีกบ้าง • ควรทำเวลาใดอีกบ้าง
2. อะไร (What)	<ul style="list-style-type: none"> • ต้องทำอะไร • กำลังทำอะไรอยู่ • มีอย่างอื่นอีกหรือไม่ 	5. ทำไม (Why)	<ul style="list-style-type: none"> • ทำไมต้องทำสิ่งนั้น • ทำไมคนนั้นต้องทำ • ทำไมต้องทำที่นั้น
3.ที่ไหน (Where)	<ul style="list-style-type: none"> • ต้องทำที่ไหน • ขณะนี้กำลังทำอยู่ที่ไหน • ควรจะทำที่ไหน • จะทำที่ไหนได้อีก 	6.อย่างไร (How)	<ul style="list-style-type: none"> • วิธีการถูกต้องอย่างไร • ขณะนี้ทำอย่างไรอยู่ • ควรทำอย่างไรได้อีก • ความสูญเปล่าอย่างไร

จากสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปของโรงงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณหน้างาน ในการที่จะทราบข้อมูลได้ละเอียดเพียงพอนั้น คือการตั้งคำถามพนักงานหน้างานหรือผู้ปฏิบัติงานที่อยู่บริเวณจุดที่เกิดปัญหา

2.11.2 เทคนิคการใช้ 4M และการตั้งคำถาม (6)

ตารางที่ 2.2 การใช้ 4 M ในการตั้งคำถาม

4M	ลักษณะการตั้งคำถาม
1. Man(คน)	<ul style="list-style-type: none"> ● พนักงานได้ปฏิบัติงานตามมาตรฐานหรือไม่ ● พนักงานมีทักษะที่มากเพียงพอหรือไม่ ● พนักงานได้รับมอบหมายหน้าที่ให้เหมาะสมกับความสามารถหรือไม่ ● พนักงานมีจิตสำนึกต่อการป้องกันปัญหาหรือไม่ ● พนักงานมีความต้องการที่จะปรับปรุงงานที่ทำอยู่หรือไม่ ● พนักงานมีมนุษยสัมพันธ์ในงานดีเพียงใด ● พนักงานมีสุขภาพพลานามัยดีเพียงใด
2.Machine (เครื่องจักร)	<ul style="list-style-type: none"> ● เครื่องจักรมีขนาดและกำลังการผลิตเหมาะสมหรือไม่ ● มีการซ่อมบำรุงอย่างถูกต้องแล้วหรือไม่ ● เครื่องจักรมีการชำรุด หยุดเดินบ่อยเพียงใด ● เครื่องจักรมีความคลาดเคลื่อนเกินจากสเปกหรือไม่
3. Material(วัสดุ)	<ul style="list-style-type: none"> ● คุณภาพสเปกของวัสดุถูกต้องและตรงตามมาตรฐานหรือไม่ ● มีการจัดเก็บวัสดุในสภาวะที่เหมาะสมหรือไม่ ● มีการขนส่งและบรรจุภาชนะอย่างเหมาะสมหรือไม่ ● มีการใช้งานอย่างผิดประเภทหรือไม่ ● มีการควบคุมการใช้วัสดุ หรือป้องกันการเกิดความเสียหายหรือไม่ ● มีความผิดปกติใดๆกับวัตถุดิบในล็อตนั้นๆอะไรบ้าง
4. Method(วิธีการ)	<ul style="list-style-type: none"> ● มาตรฐานการปฏิบัติงานที่ใช้อยู่เพียงพอและเหมาะสมเพียงใด ● มาตรฐานงานในปัจจุบันให้ความมั่นใจว่าผลิตงานคุณภาพดีเพียงใด ● ลำดับขั้นตอนการทำงานดีเพียงใด ● มีการประสานงานกันระหว่างส่วนที่เกี่ยวข้องกันอย่างไร ● มีระบบการสื่อสารและปฏิบัติการตอบโต้ปัญหากันอย่างไร ● วิธีการทำงานในปัจจุบันมีจุดอ่อนอะไรบ้าง

2.12 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) (7)

เป็นการทดลองที่มีลักษณะเฉพาะ คือ ทริทเมนต์ประกอบด้วย การรวมกันของระดับของปัจจัย ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ทริทเมนต์คอมบิเนชัน (treatment combination) เขียนโดยย่อว่า tc

เนื่องจากการทดลองแฟคทอเรียล ทริทเมนต์ประกอบขึ้นจากการรวมตัวกันของระดับปัจจัย ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป แต่ละปัจจัยต้องมีอย่างน้อย 2 ระดับ ถ้าจำนวนระดับของทุกปัจจัยเท่ากันจะเรียก การทดลองนั้นว่าแฟคทอเรียลสมมาตร (symmetrical factorial) แต่ถ้าจำนวนของระดับปัจจัยไม่เท่ากัน ทั้งหมดจะเรียกว่าแฟคทอเรียลไม่สมมาตร (asymmetrical factorial) หรือ แฟคทอเรียลผสม (mixed factorial)

2.12.1 ข้อได้เปรียบของการทดลองแฟคทอเรียลเมื่อเทียบกับแผนการทดลองปัจจัยเดียว (8) มี ดังนี้

2.12.1.1 สามารถที่จะประมาณอิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหลายปัจจัย พร้อมกัน

อิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ของผลของปัจจัยหนึ่งต่อการเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่นนี้ เรียกว่าอิทธิพลร่วม (interaction effect)

2.12.1.2 ประหยัดเวลา และให้ผลคุ้มค่า จากการทดลองแฟคทอเรียลเราสามารถจะใช้ ค่าสังเกตที่รวบรวมได้ทั้งหมดมาประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัย และยังประมาณอิทธิพลร่วมระหว่าง ปัจจัยได้ แต่ถ้าทำการทดลองปัจจัยเดียวจะต้องทำการทดลองจึงจะให้ผลการทดลองที่เท่าเทียมกัน กับการทดลองแฟคทอเรียลเพียงการทดลองเดียว

2.12.1.3 สรุปผลได้กว้างขึ้น เนื่องจากการทดลองแฟคทอเรียลจะมีความศึกษาผลของ ปัจจัยหนึ่งในหลายๆ ระดับของปัจจัยอื่นพร้อมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จึงกว้างขวางกว่าที่จะทำการทดลอง ปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเมื่อกำหนดให้ระดับปัจจัยอื่นคงที่

ในการทดลองแฟคทอเรียล มักใช้อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่แทนปัจจัย ตัวพิมพ์เล็กแทน ระดับของปัจจัย และห้อยตัวเลขแทนลำดับในปัจจัยนั้น เช่น การทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย ปัจจัย A

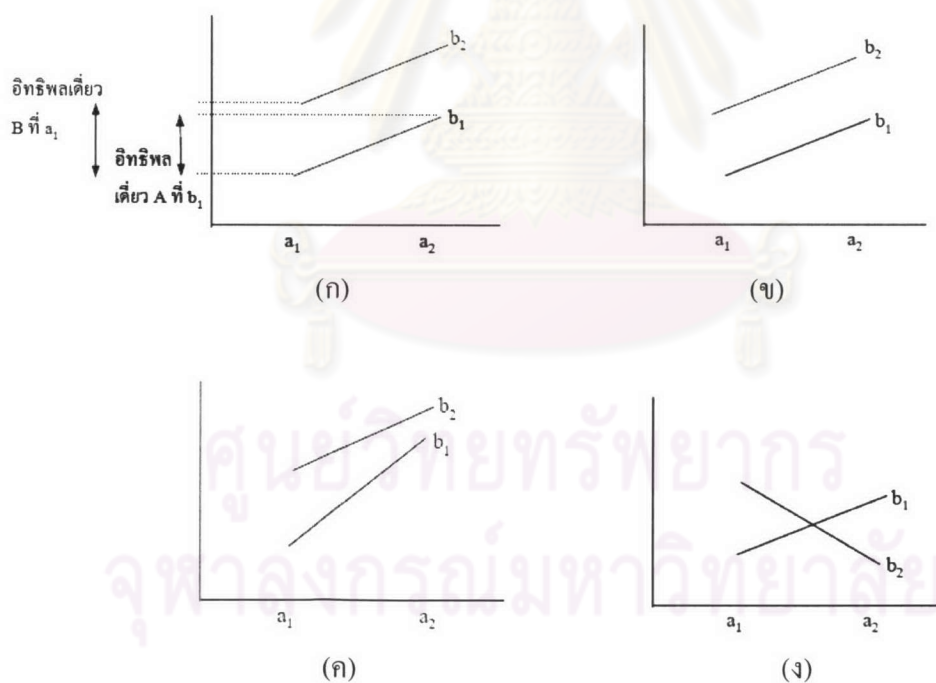
มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ ทริทเมนต์ a, b_3 จะหมายถึงการรวมกันของระดับที่ 1 ของปัจจัย A และระดับที่ 3 ของปัจจัย B

2.12.2 อิทธิพลของทริทเมนต์ที่เกิดขึ้นในการทดลองแฟกทอเรียล (9) มี 3 ประเภท ได้แก่

2.12.2.1 อิทธิพลเดี่ยว (simple effect) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองที่ระดับของปัจจัยหนึ่งเมื่อระดับของปัจจัยอื่นเปลี่ยนแปลง

2.12.2.2 อิทธิพลหลัก (main effect) อิทธิพลหลักของปัจจัยหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับปัจจัยนั้นเปลี่ยนแปลง ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของอิทธิพลเดี่ยวของปัจจัยนั่นเอง

2.12.2.3 อิทธิพลร่วม (interaction effect) อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหมายถึงความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งต่อการเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่น ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของผลต่างของอิทธิพลเดี่ยวของปัจจัยนั่นเอง



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมหรืออันตรกิริยาของปัจจัย A และ B

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าเมื่อปัจจัย A เปลี่ยนระดับจาก a_1 ไปเป็น a_2 เส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ b_1 และ b_2 ไม่ต่างกัน สังเกตได้จากเส้นกราฟที่ขนานกัน ดังรูป (ก) และ (ข) แสดงว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B

ในรูป (ค) เมื่อระดับของ A เปลี่ยนจาก a_1 ไปเป็น a_2 มีผลทำให้ค่าของตัวแปรตอบสนองเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มต่างกัน สังเกตจากความชันของเส้นกราฟของระดับ b_1 และ b_2 จึงอาจมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ส่วนในรูป (ง) การตอบสนองต่อปัจจัยหนึ่งในแต่ละระดับของอีกปัจจัยเป็นไปในทางตรงกันข้ามแสดงว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการวิจัยที่เคยมีมาและเกี่ยวข้องกับคลื่นเหนือเสียงและการทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง มีอยู่หลายเรื่อง เช่น ศึกษาการยุบตัวและการเกิดควิเทชันในของเหลวที่อัดได้(10) ศึกษาการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียง (11) และการศึกษาลักษณะการเกิดและการรวมตัวของควิเทชันเนื่องจากการไหล (12) เป็นต้น

ส่วนงานวิจัยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เช่นการศึกษาการกัดเซาะโดยใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อทำความสะอาดคราบสกปรกในปี 1995 (13) โดยคณะผู้วิจัยจากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ซึ่งมีแรงจูงใจจากปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรม ที่พบปัญหาผิวของภาชนะสีกร่อนในระหว่างการผลิต จึงได้ทำการศึกษาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง และพบว่าสาเหตุที่ผิวถูกกัดเซาะเนื่องจากการไหลของของเหลว การกระแทกของของเหลวที่ฉีดล้าง และควิเทชันที่เกิดจากคลื่นเหนือเสียง

ในปี 1997 คณะวิจัยของ Kenneth S. Suslick ได้ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดจากไฮโดรไดนามิกควิเทชัน (14) โดยพบว่าสัดส่วนโพสิโทรปีกมีผลกระทบต่อเกิดควิเทชันและโซโนเคมีคอล นอกจากนี้ยังมีผลของค่าการนำความร้อน ซึ่งนำมาอธิบายปรากฏการณ์จุดร้อน (hot spot), อุณหภูมิสูงสุดของควิเทชัน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของควิเทชันลดลงตามค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าอัตราการเกิดไอออนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเนื่องมาจากผลของความดันไอในฟองอากาศเพิ่มขึ้น

ในปี 2003 มีการศึกษาการเกิดหลุมและการหลุดของคาร์บอนบนแผ่นข้อมูลอันเนื่องมาจากควิเทชัน (15) พบว่าแผ่นแม่เหล็กบนแผ่นข้อมูลที่หลุดออกไปลดลง 30-40% เมื่อช่องว่างระหว่างหัวอ่านและแผ่นข้อมูลมีมากขึ้น และยังพบอีกว่าอัตราการเกิดหลุมลดลงเมื่อใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานต่ำ

และงานวิจัยของ Lamminen ในปี 2004 ศึกษาปัจจัยและกลไกในการทำความสะอาดแผ่นเซรามิคด้วยคลื่นเหนือเสียง (16) โดยพบว่า กลไกการทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียงมีความสำคัญในการดึงอนุภาคออกจากเชื้อแผ่นโดยความถี่ต่ำมีประสิทธิภาพดีกว่าความถี่สูง และการไหลแบบปั่นป่วนมีบทบาทสำคัญในการพาอนุภาคออกไปจากเชื้อแผ่น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย