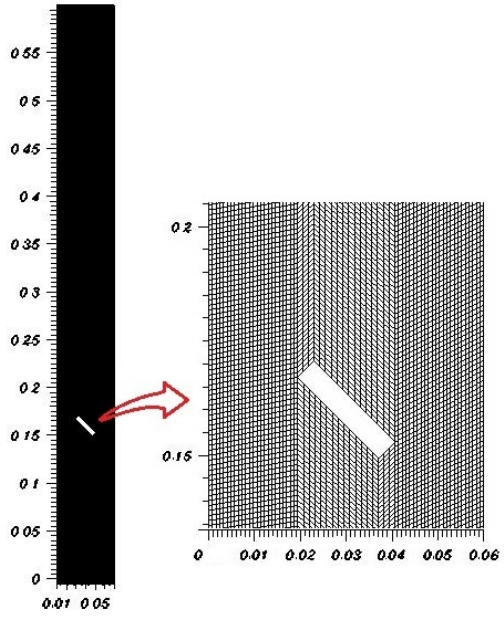
บทที่ 4
ผลการวิจัย

ผลการศึกษาได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ในส่วนของการศึกษาการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหล ในอุโมงค์ลม และผลของตัวขวางการไหลที่มีต่อการรวมตัวของอนุภาคควันหลังจากถูกชาร์ทด้วยพลาสมาปราศจากความร้อน สามารถแสดงผลการวัจัยได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหล

4.1.1 ผลการศึกษาการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหล ด้วย CFD

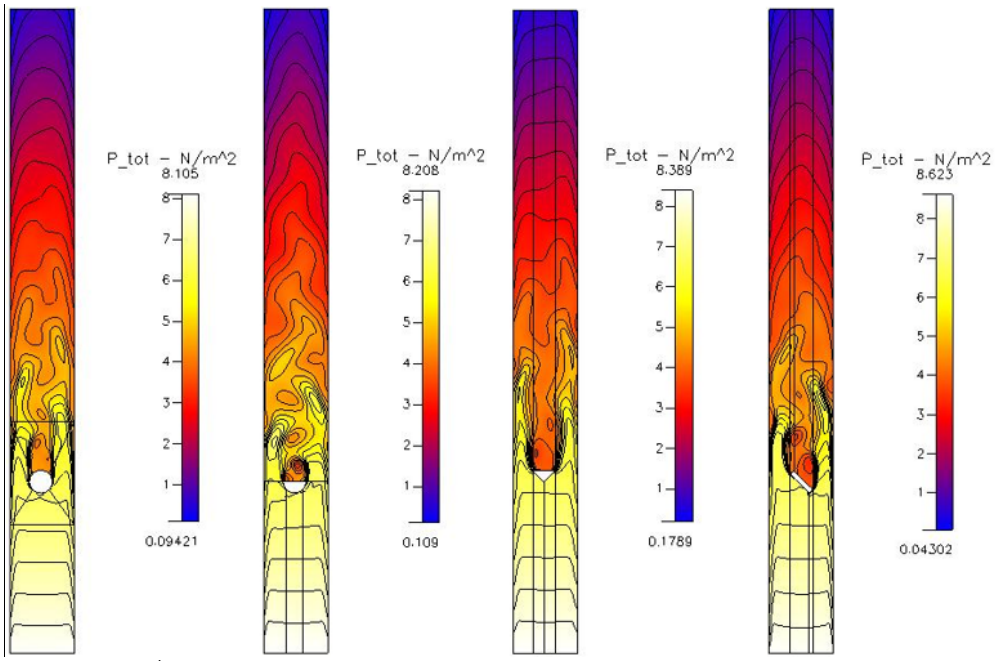
การศึกษาการไหลของอากาศผ่านตัวขวางการไหลจะกำหนดจำนวนปริมาตรควบคุมนั้นจะต้องทดสอบโปรแกรมเพื่อหาจำนวนปริมาตรควบคุมที่เหมาะสม โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและไม่เปลี่ยนแปลงค่าอีกเมื่อจำนวนปริมาตรควบคุมเพิ่มขึ้น (Grid independent test) ซึ่งสามารถประหยัดเวลาในการทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการทดสอบพบว่าที่ เรย์โนลดส์นัมเบอร์ประมาณ $5x10^{3}$-$1.5x10^{3}$ จำนวนปริมาตรควบคุมประมาณ 5 $x10^{5}$-$1x10^{5}$ ช่อง ก็ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5% เมื่อจำนวนปริมาตรควบคุมเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างของตัวขวางการไหลแบบแผ่น ที่การไหลของอากาศ ณ ความเร็ว 1 m/s และที่การวางมุมเอียง 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะการแบ่งช่องพื้นที่ควบคุมที่ใช้ในการศึกษาแบบเชิงตัวเลข

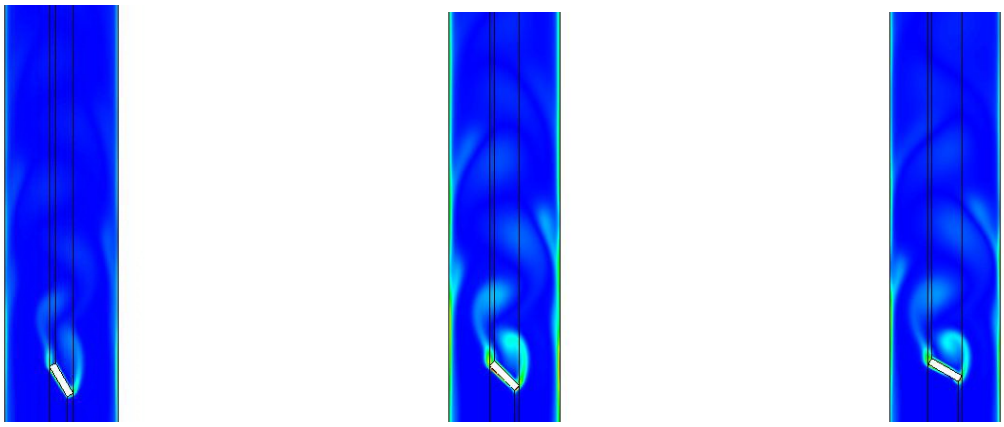
ผลการศึกษาผลการไหลของอากาศผ่านตัวขวางการไหล ในลักษณะต่างๆ พบว่า ที่ตัวขวางการไหลที่มีลักษณะแบบทรงกระบอกกลมจะมีความดันตกคร่อมน้อยที่สุด รองลงมาจะเป็นตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกครึ่งกลม แบบสามเหลี่ยม และแผ่นเรียบที่จะเกิดความดันตกคร่อมมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ จะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศใกล้กับบริเวณด้านหลังตัวขวางการไหลมากที่สุด และเกิดความกว้างของการแกว่งของการหมุนวน (Vortex shedding) ได้มากกว่าตัวขวางการไหลแบบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่งผลให้ช่วยลดระยะ

การติดตั้งอิเล็กโทรด บริเวณด้านหลังตัวขวางการไหล ดังนั้นลักษณะของตัวขวางการไหลที่น่าสนใจในการทำการศึกษาผลกระทบจากการติดตัวขวางการไหล เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่น คือลักษณะตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม ที่ทำให้เกิดความดันตกคร่อมระหว่างตัวขวางการไหลน้อยที่สุด และลักษณะตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ ที่สามารถทำให้เกิดการแกว่งของการหมุนวนด้านหลังตัวขวางการไหลได้ค่อนข้างรุนแรงการตัวขวางการไหลแบบอื่นๆ



รูปที่ 4.2 การเกิดการหมุนวนของอากาศด้านหลังตัวขวางการไหลแบบต่างๆ

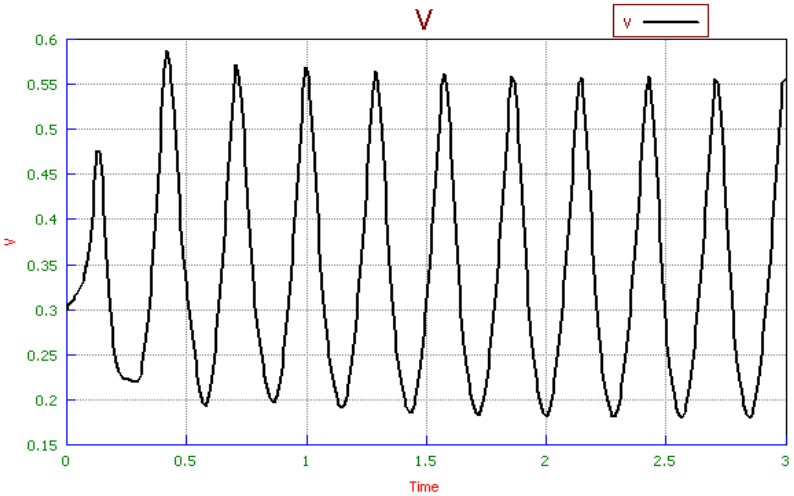
จากผลการศึกษาการไหลผ่านของอากาศผ่านตัวขวางการไหลแบบแผ่นครีบเพิ่มเติม กรณีเปลี่ยนมุมปะทะของตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ 3 ค่า คือ 30° 45° และ 60° พบว่าด้านหลังของตัวขวางการไหล เกิดการหมุนควงของของไหลสลับบนล่าง จนทำให้เกิดเป็นลักษณะของ Vortex shedding ตามมุมที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.3



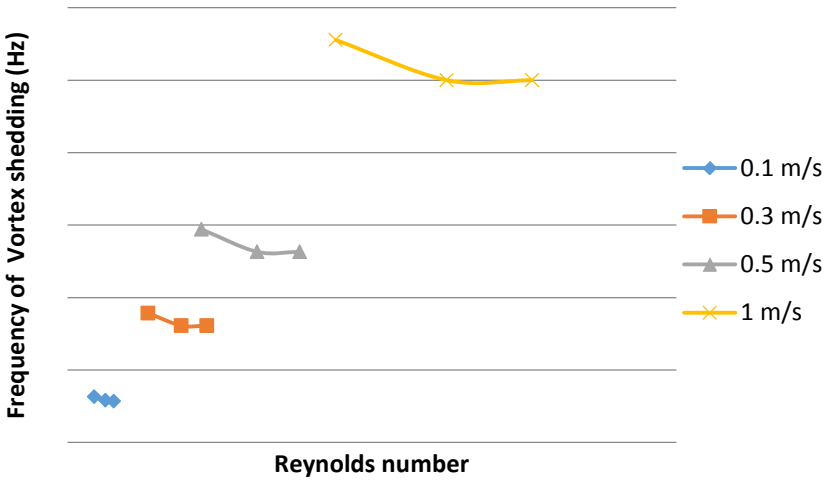
(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านตัวขวางการไหลแบบครีบตามการเปลี่ยนแปลงมุม (ก) 30° (ข) 45° และ (ค) 60° ที่ระยะความกว้างของตัวขวางการไหล 0.0025 m ที่ความเร็ว 0.5 m/s

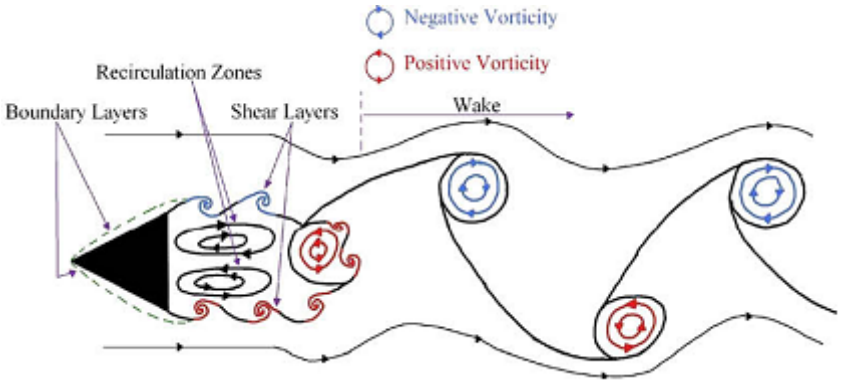
เมื่อศึกษาผลของค่า Strouhal number จะต้องทำการพิจารณาความถี่ของการเกิด Vortex shedding ซึ่งได้จากการวัดระยะห่างของคาบความเร็ว ณ จุดที่เกิดการหมุนวน เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ที่ตัวขวางการไหลที่มุมปะทะ 30° จะเกิดความถี่มากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขวางการไหลที่มุมปะทะ 45° และ 60° ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ที่ความยาวตัวขวางการไหล 0.0035 m ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งในรูปจะแสดงผลของความถี่ Vortex shedding และ Reynolds number โดยที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขวางการไหลจะหาได้จากหน้า Projection ของตัวขวางการไหล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมปะทะของตัวขวางการไหล โดยจุดที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 ของแต่ละเส้น คือมุมปะทะ 30° 45° 60° และการที่ตัวขวางการไหลที่มุมปะทะ 30° มี ความถี่ของ Vortex shedding เนื่องจาก ที่มุมปะทะ 30° สามารถทำให้เกิด boundary layer ได้ดีกว่าที่มุมปะทะ 45° และ 60° ทำให้เกิด Shear layer แล้วรวมตัวกันเป็น Wake เกิดเป็น Vortex shedding ดังรูปที่ 4.6 ได้เร็วขึ้นทำให้ความถี่ของ Vortex shedding ที่มุมปะทะ 30° สูงกว่าที่มุมปะทะ 45° และ 60° รวมไปถึงที่มุมปะทะ 30° จะทำให้ตำแหน่งที่เกิดการรวมตัวของ Shear layer เพื่อเกิดเป็น Wake จะเกิดที่ตำแหน่งที่ไกลกว่าที่มุมปะทะ 45° และ 60° ตามลำดับ แต่เมื่อทำการพิจารณาลักษณะการเกิด Vortex shedding ในรูปที่ 4.3 พบว่าความกว้างของ Vortex shedding ที่มุมปะทะ 30° จะมีระยะความกว้างค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับมุมปะทะ 45° และ 60° ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการเลือกมุมปะทะที่เหมาะสมควรเลือกที่ 45° ที่มีการเกิดความกว้างของ Vortex shedding ที่มีค่าใกล้เคียงกับมุมปะทะ 60° แต่เกิดแรงต้านที่น้อยกว่าตามมุมปะทะที่น้อยกว่า ซึ่งจะช่วยให้การหมุนวนของอากาศ เกิดการดึงอนุภาคควันขนาดเล็กเข้ามาในบริเวณที่เกิดการหมุนวนได้มากกว่าการหมุนวนที่มีความกว้างของ Vortex shedding ที่น้อย ช่วยเพิ่มระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคควันขนาดเล็กให้มากขึ้น



รูปที่ 4.4 คาบของความเร็วที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป

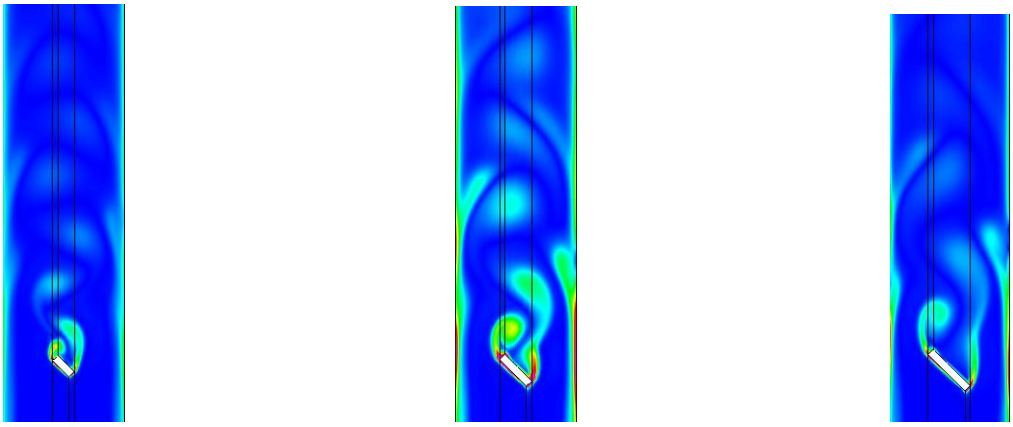


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่า Strouhal number และค่า Reynolds number ตามการเปลี่ยนแปลงมุมของตัวขวางการไหล



รูปที่ 4.6 การไหลหมุนควงที่เกิดจากตัวขวางการไหล รูปทรงสามเหลี่ยมในแบบ 2 มิติ [10]

การศึกษาผลจากการเพิ่มระยะความกว้างของตัวขวางการไหลจาก 0.0025 m เป็น 0.0035 m และ 0.0015 m พบว่า ยิ่งความยาวของตัวขวางการไหลมากขึ้นจะทำให้เกิดความกว้างของคลื่นการแกว่งสูงตามความยาวของตัวขวางการไหล ดังรูปที่ 4.7 แต่อย่างไรก็ตามในการเพิ่มระยะความยาวของตัวขวางการไหลที่มากขึ้นก็ความคำนึงถึงค่าความดันแตกต่างระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของตัวขวางการไหลมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นในการเพิ่มระยะความกว้างของตัวขวางการไหลก็จะทำให้ความถี่ของ Vortex shedding จะมีค่าลดลงลงไปด้วย ทำให้มีผลต่อการดึงอนุภาคควันขนาดเล็กเข้ามาอยู่ในบริเวณที่เกิดการหมุนวนได้

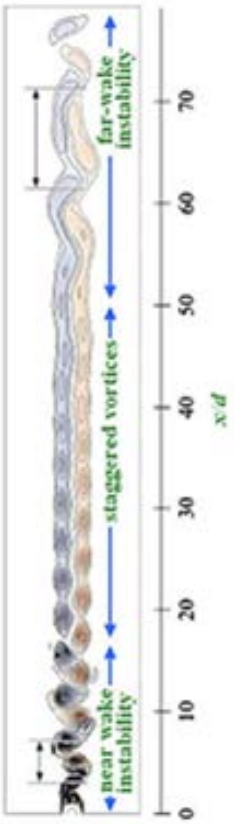


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านตัวขวางการไหลแบบครีบตามการเปลี่ยนแปลงมุม 45° ที่ระยะความกว้างของตัวขวางการไหล (ก) 0.0015 m (ข) 0.0025 m และ (ค) 0.0035 m ที่ความเร็ว 0.5 m/s

ขนาดความกว้างของตัวขวางการไหล จะสัมพันธ์กับความเร็วของอากาศ ซึ่งจะได้เป็นลักษณะความสัมพันธ์ในรูปของค่าตัวเลขเรย์โนลดส์ โดยค่าตัวเลขเรย์โนลดส์ความให้ได้ 250 ขึ้นไป เนื่องจากที่ค่าตัวเลขเรย์โนลดส์เท่ากับ 250 <*Re*< 10,000 จะเริ่มมีความถี่ของ Vortex shedding มีแนวโน้มที่ค่อนข้างเกือบคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5 แต่อย่างไรก็ตาม หากยิ่งค่าตัวเลขเรย์โลดส์มีค่ามากขึ้น จะทำให้ขนาดความกว้างตัวขวางใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดแรงต้านมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกใช้ตัวขวางการไหลแบบแผ่นเอียงมุม 45° ที่ขนาดความกว้างแผ่นตัวขวางการไหล 0.0025 m ซึ่งจะได้ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางโปรเจค (Projected diameter) ประมาณ 0.002 m โดยเป็นระยะความกว้าง 1 ใน 3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ลม เพื่อไม่ให้เกิดความดันตกคร่อมที่มากเกินไป เนื่องจากตัวขวางการไหล

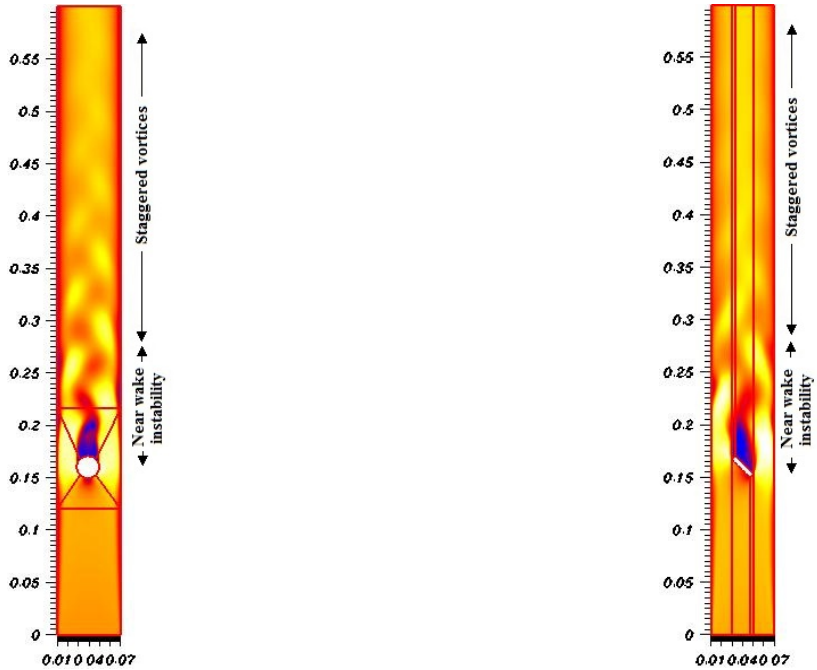
จากการศึกษาในข้างต้น พบว่าการติดตั้งตัวขวางการไหลแบบครีบที่มีมุมเอียง 45° เหมาะสมที่สุด และการติดตั้งตัวขวางการไหลจะทำให้เกิด Vortex shedding โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังรูปที่ 4.8 คือ Near-wake instability, Staggered vortices และ Far-wake instability ซึ่งตำแหน่งที่ควรวางอิเล็กโทรดเพื่อทำการสร้างสนามพลาสมา คือตำแหน่ง เริ่มต้นของช่วง Staggered vortices เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความถี่ของการแกว่งเริ่มคงที่ และคาบในการแกว่งน้อย รวมถึงความเข้มข้นของการหมุนวนยังมีค่ามาก



รูปที่ 4.8 ลักษณะการเกิด Vortex shedding ที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง [10]

จากผลการศึกษาข้างต้นกรณีการไหลของอากาศผ่านตัวขวางการไหลด้วย CFD พบว่าที่การไหลของอากาศผ่านตัวขวางการไหล แบบแผ่นครีบวางมุมเอียงสามารถทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศบริเวณด้านหลังตัวขวางการไหลได้ค่อนข้างง่าย และทำให้เกิดการแกว่งของอากาศที่หมุนวนโดยมุมที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวขวางการไหลแบบแผ่นครีบคือมุม 45° และตำแหน่งที่ควรเหมาะแก่การติดตั้งอิเล็กโทรดคือ ตำแหน่งร่อยต่อของช่วง Near wake instability และStaggered vortices นอกจากนั้นลักษณะตัวขวางการไหลที่น่าสนใจในการศึกษาอีกแบบหนึ่ง คือตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม ที่สามารถทำให้เกิดการหมุนวนด้านหลังตัวขวางการไหลและเกิดความดันตกคร่อมระหว่างตัวขวางการไหลได้น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวขวางการไหลแบบอื่นๆ

การศึกษาการเกิด Vortex shedding บริเวณด้านหลังตัวขวางการไหล ของตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลมและแบบแผ่นเรียบ ที่ความเร็ว 0.5 m/s, 1 m/s และ 3 m/s สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



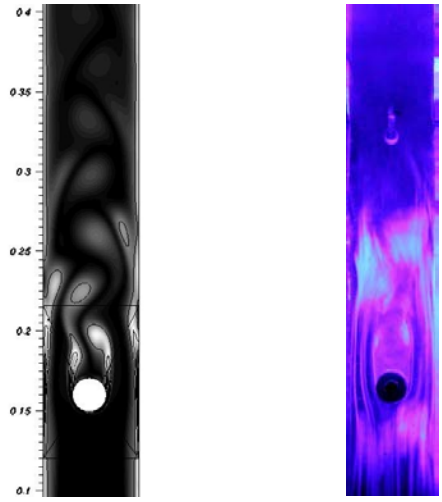
(ก) ตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม (ข) ตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ

รูปที่ 4.9 ลักษณะการเกิด Vortex shedding ที่เกิดบริเวณด้านหลังตัวขวางการไหล

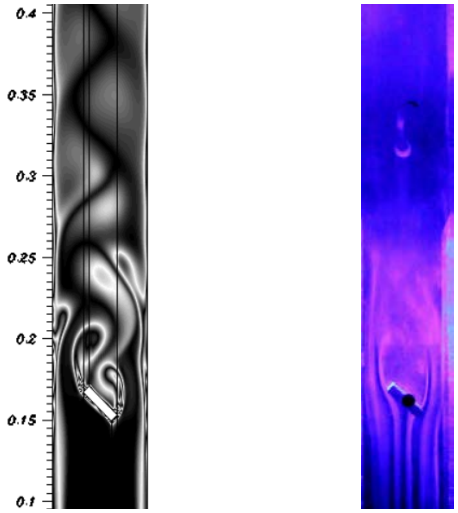
จากรูปที่ 4.9 ที่ระยะระหว่าง 0.25 m ถึง 0.35 m จะเป็นระยะที่เป็นช่วงต่อระหว่าง vortex shedding แบบ Near wake instability และแบบ Staggered vortices ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะมีความถี่ของวอร์เทค เริ่มคงที่ แต่ความรุนแรงของการแกว่งของวอร์เทค ยังคงมีความรุนแรงสูง ทำให้เกิดระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝุ่นมากขึ้น และเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคฝุ่นมากขึ้น ดังนั้นตำแหน่งที่ระยะประมาณ 0.30-0.35 m น่าสนใจที่จะวางตำแหน่งอิเล็กโทรด เพื่อทำการชาร์จประจุด้วยเทคนิคพลาสมาชนิดไม่มีความร้อน

4.1.2 การทดสอบการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหล เทียบกับ CFD

ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวขวางการไหล เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาจะทำการทดสอบที่ความเร็วอากาศ เท่ากับ 1 m/s เพื่อให้กล้องสามารถจับการเคลื่อนที่ของอากาศ เพื่อเปรียบเทียบกับผลของ CFD ได้ การทดสอบการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหลด้วย CFD ผ่านตัวขวางการไหลในรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 3.1 จะสามารถเปรียบเทียบผลการไหลแบบเสมือนด้วยการฉีดควันเข้าสู่อุโมงค์ลม ผ่านตัวขวางการไหล เพื่อยืนยันความถูกต้องของผล CFD ได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งผลที่ได้ พบว่า ผลของการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านตัวของการไหลที่ได้จากการทดสอบจริง และที่ได้จากการทำ CFD มีลักษณะใกล้เคียงกัน



(ก) ทรงกระบอกกลม



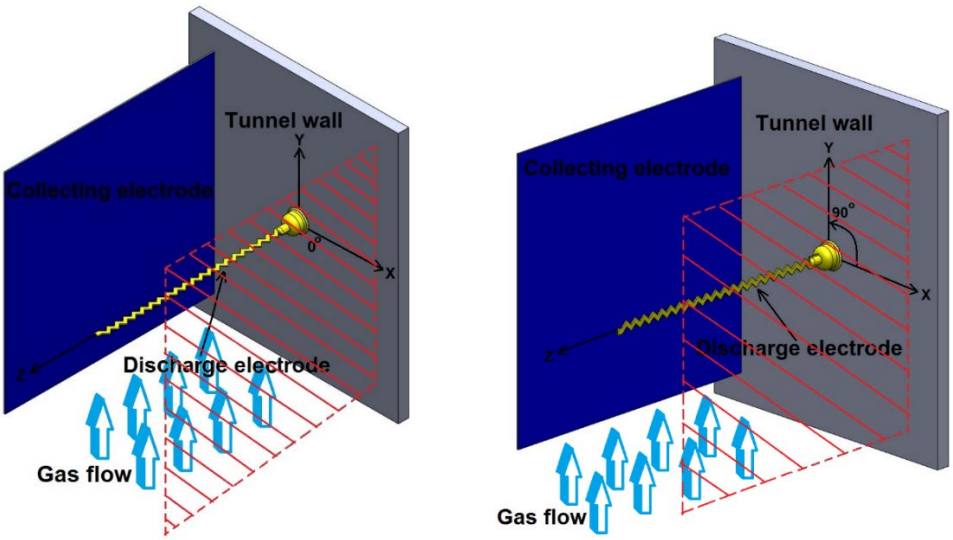
(ข) แผ่นเรียบ

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการไหลผ่านตัวขวางการไหลจากการทำ Flow visualization เทียบกับ CFD ที่ความเร็วของอากาศ 1 m/s

4.2 การทดสอบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการรวมตัวของอนุภาคภายใต้เทคนิคพลาสมาชนิดไม่มีความร้อน

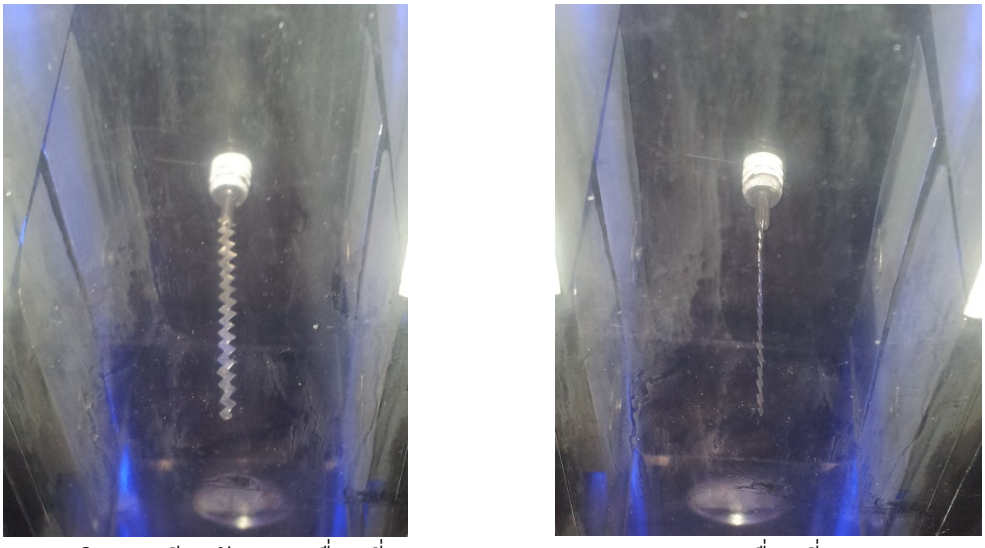
4.2.1 ผลการเกิดพลาสมา

ลักษณะของดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge electrode) เป็นแบบฟันเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนดาบยาว โดยลักษณะดังกล่าวสามารถวางแนวฟันเลื่อยให้ไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศ และขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12



(ก) วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ (ข) วางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

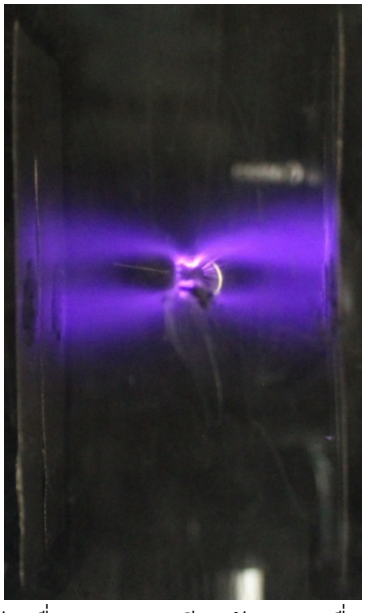
รูปที่ 4.11 ลักษณะการวางแนวฟันเลื่อยของดิสชาร์จอิเล็กโทรด



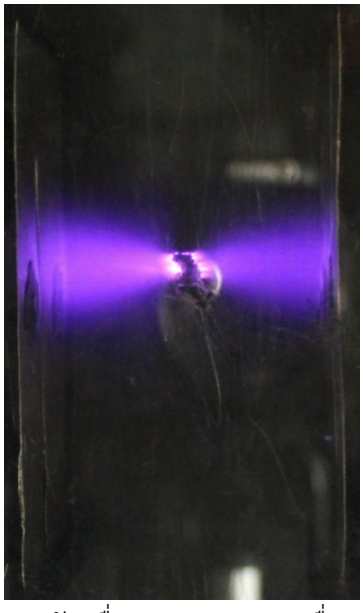
(ก) วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ (ข) วางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.12 ลักษณะการวางแนวฟันเลื่อยของดีสชาร์จอิเล็กโทรด ในการทดสอบจริง

ลักษณะการวางอิเล็กโทรดดังกล่าวจะทำให้เกิดลักษณะของกลุ่มของพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะถูกกระตุ้นกระแสไฟฟ้ากระแสตรงบวก ที่แรงดันไฟฟ้าสูงขนาด 35 kV ที่ความถี่พัลส์ 10 kHz โดยที่มีความกว้างของหน้าคลื่น (Pulse width) เท่ากับ 2.5 μs ซึ่งความเร็วของอากาศที่ใช้ทดสอบในช่วง 0.5 m/s – 3m/s ที่ไหลผ่านอิเล็กโทรด ไม่มีผลต่อลักษณะการเกิดกลุ่มพลาสมา โดยผลที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดิม เมื่อความเร็วเพิ่มหรือลดในช่วงความเร็วดังกล่าว



(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศ



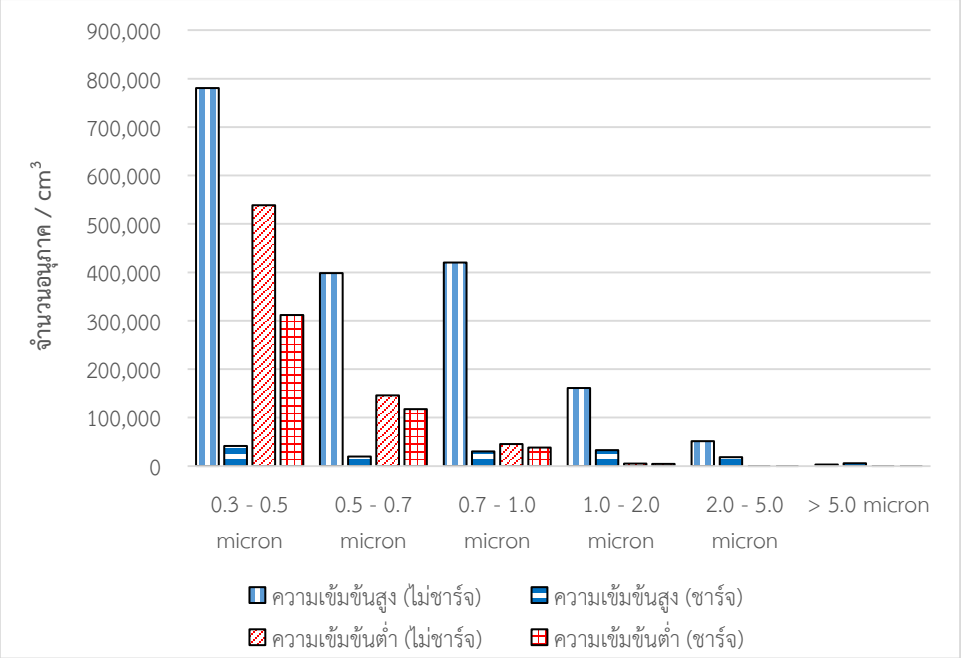
(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.13 ลักษณะการเกิดกลุ่มพลาสมาตามลักษณะการวางฟันเลื่อย

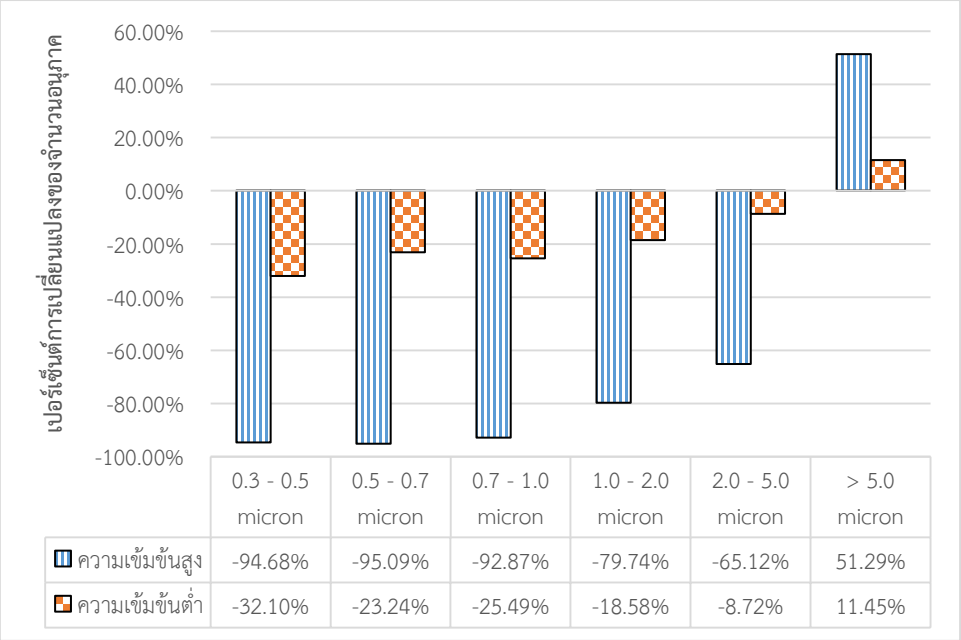
จากรูปที่ 4.13 โดยการวางแนวฟันเลื่อยให้ไปทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศจะทำให้เกิดลักษณะของกลุ่มพลาสมาเป็นแบบ 2 ชั้น ส่วนการวางแนวฟันเลื่อยขวางการเคลื่อนที่ของอากาศจะทำให้เกิดลักษณะกลุ่มพลาสมาเพียง 1 ชั้น เนื่องจาก บริเวณปลายฟันเลื่อยที่มีลักษณะปลายแหลม โดยบริเวรนี้จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุด ส่งผลให้อากาศบริเวณปลายแหลมของฟันเลื่อยถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก และลบ ง่ายกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นกลุ่มพลาสมาจะถูกปลดปล่อยออกจากปลายแหลมของฟันเลื่อย ทำให้การวางแนวฟันเลื่อยในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศ พลาสมาจะปรากฏที่ปลายแหลมทั้งสองด้าน และแยกตัวออกไปยังคอลเลคติงอิเล็กโทรด ทั้งสองด้าน

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของอนุภาคที่มีผลต่อการรวมตัวของอนุภาค

การศึกษาผลความเข้มข้นของอนุภาค ซึ่งในการทดสอบในครั้งนี้จะทดสอบความเข้มของอนุภาค 0.3-0.5 μm อยู่ในช่วง $4x10^5$-$10x10^5$ particles/cm^3 ซึ่งหากค่าความเข้มข้นสูงมากกว่าช่วงดังกล่าวจะทำให้เครื่องวัดจำนวนอนุภาคไม่สามารถทำการวัดค่าได้ โดยในการทดสอบจะแยกเป็น 2 กรณี คือ กรณีความเข้มข้นสูง และความเข้มข้นต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งทดสอบที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV จากผลการทดสอบพบว่า ผลของประสิทธิภาพในการลดจำนวนอนุภาคสำหรับกรณีความเข้มข้นสูง จะทำให้ประสิทธิภาพในการลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กสูงกว่ากรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจาก อนุภาคเมื่อถูกชาร์จด้วยพลาสมาจนอนุภาคเกิดเป็นประจุต่างขั้วขึ้น ซึ่งที่ความเข้มข้นของอนุภาคสูงอนุภาคจะอยู่กันหนาแน่น ทำให้อนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงจะสามารถเกิดการชนและดึงดูดกันได้ดีกว่ากรณีที่มีความหนาแน่นของอนุภาคน้อยหรือความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 4.14 ลักษณะความเข้มข้นของจำนวนอนุภาค โดยทดสอบ ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV



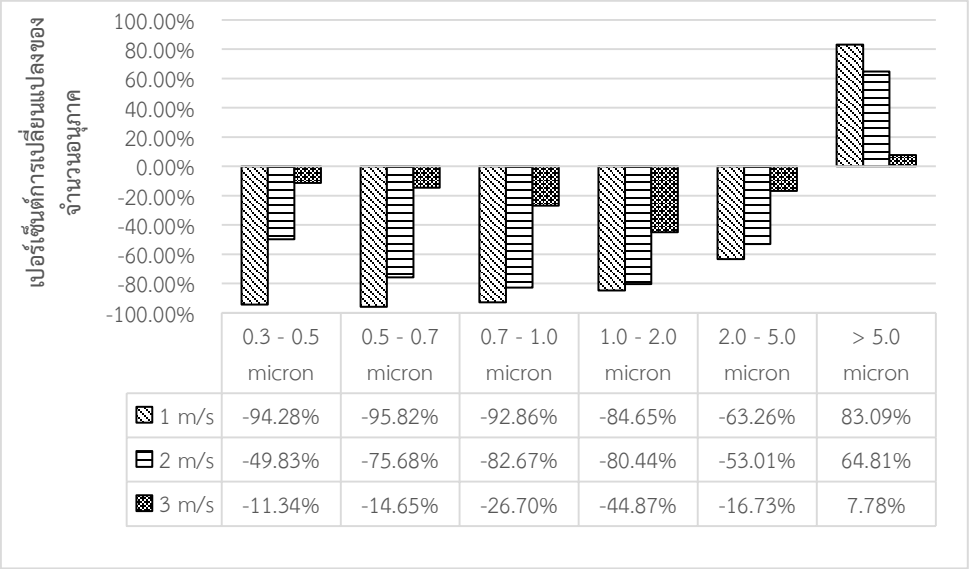
	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ความเข้มข้นสูง	-94.68%	-95.09%	-92.87%	-79.74%	-65.12%	51.29%
ความเข้มข้นต่ำ	-32.10%	-23.24%	-25.49%	-18.58%	-8.72%	11.45%

รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของจำนวนอนุภาค ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV

4.2.3 ผลของความเร็วของไหลที่มีต่อการรวมตัวของอนุภาค

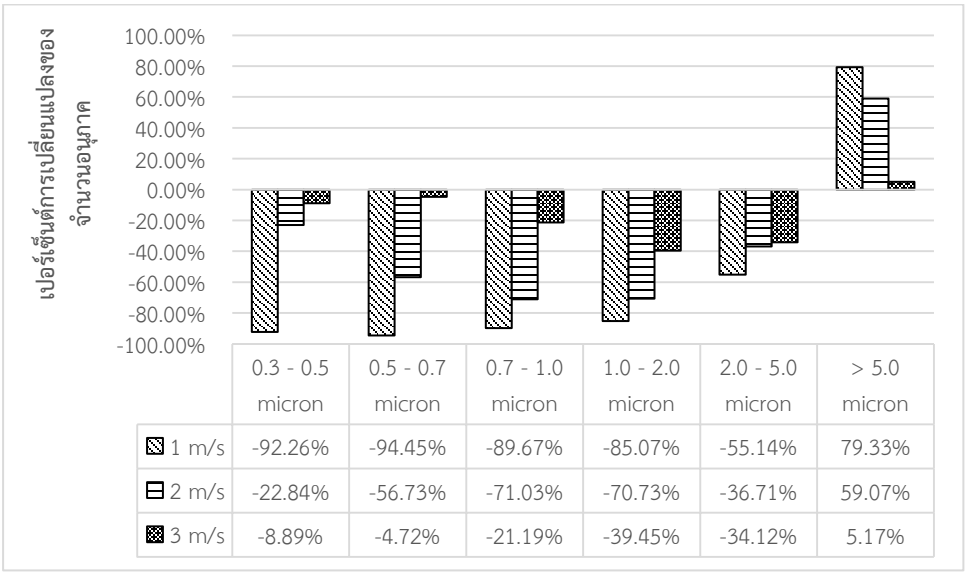
จากการทดสอบผลการรวมตัวของอนุภาคหลังจากถูกชาร์ตด้วยพลาสมา ในลักษณะการวางแนวฟันเลื่อยทั้ง 2 แบบ พบว่า ที่ความเร็ว 1 m/s ถึง 3 m/s ซึ่งค่าความเร็วตั้งแต่ 1 m/s เป็นต้นไปจะเริ่มมีผลกระทบต่อการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็ก และการติดตั้งดีสชาร์ตอิเล็กโทรดจะมีลักษณะการวางแนวฟันเลื่อยของดีสชาร์ตอิเล็กโทรด แบบวางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศจะมี

ประสิทธิภาพในการลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กได้น้อยกว่า ลักษณะการวางแนวฟันเลื่อยแบบขวางการไหลเล็กน้อย ดังแสดงผลในรูปที่ 4.16



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
1 m/s	-94.28%	-95.82%	-92.86%	-84.65%	-63.26%	83.09%
2 m/s	-49.83%	-75.68%	-82.67%	-80.44%	-53.01%	64.81%
3 m/s	-11.34%	-14.65%	-26.70%	-44.87%	-16.73%	7.78%

(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ



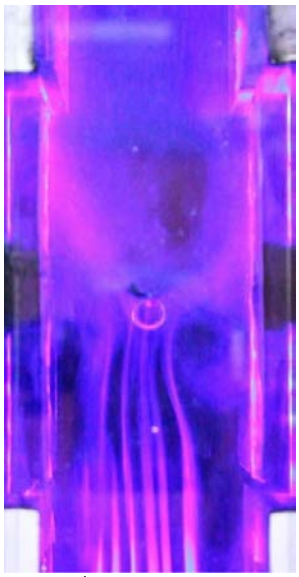
	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
1 m/s	-92.26%	-94.45%	-89.67%	-85.07%	-55.14%	79.33%
2 m/s	-22.84%	-56.73%	-71.03%	-70.73%	-36.71%	59.07%
3 m/s	-8.89%	-4.72%	-21.19%	-39.45%	-34.12%	5.17%

(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

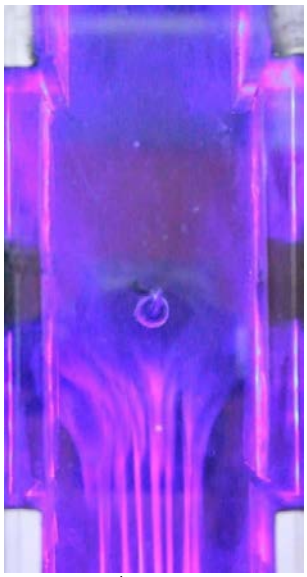
รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของจำนวนอนุภาค ที่ความเร็วก๊าซต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า การวางแนวฟันเลื่อยในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศจะมีประสิทธิภาพในการลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กได้น้อยกว่า เมื่อเทียบกับการวางแนวฟันเลื่อยขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ เนื่องจาก การวางแนวฟันเลื่อยในทิศทางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศจะทำให้เกิดกลุ่มพลาสมาเป็นสองกลุ่ม ทำให้พลาสมาเกิดการกระจายตัวมากกว่า ส่งผลให้ความเข้มและความหนาแน่นของพลาสมามีน้อยกว่าการวางแนวฟันเลื่อยขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ ซึ่งจะสามารถสังเกตผลการเกิดการหมุนวนบริเวณด้านหน้าดิสชาร์จอิเล็กโทรด ได้ดังรูป 4.17 โดยสามารถสเก็ตภาพลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศได้ดังรูปที่ 4.18 ทำให้เกิดการชาร์ตอนุภาคซ้ำ

ด้วยพลาสมา และเมื่อความเร็วของก๊าซสูงขึ้น จะไม่เกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหน้าดิสชาร์จอิเล็กโทรดขึ้น เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม การวางแนวฟันเลื่อยแบบขวางการไหลของอากาศก็ยังมีแรงผลักเนื่องจากแรงทางไฟฟ้ามากกว่าการวางแนวฟันเลื่อยอยู่แนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ดังนั้นในการทดสอบผลกระทบเนื่องจากตัวขวางการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพในการรวมตัวของอนุภาค จะใช้ลักษณะการวางฟันเลื่อยของดิสชาร์จอิเล็กโทรด แบบขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

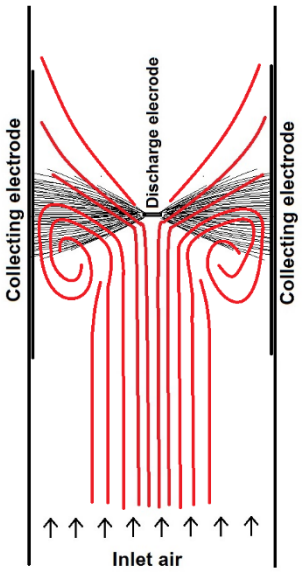


(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ

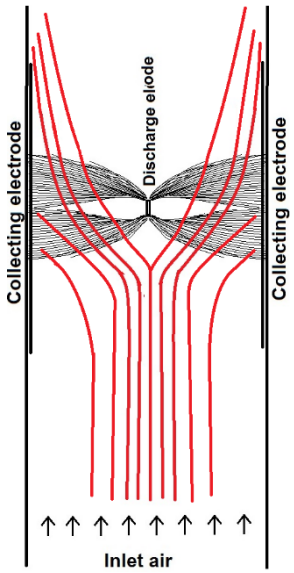


(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.17 การทดสอบแนวการไหลของอากาศที่ ความเร็วอากาศ 1 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV และความถี่พัลส์ 10 kHz

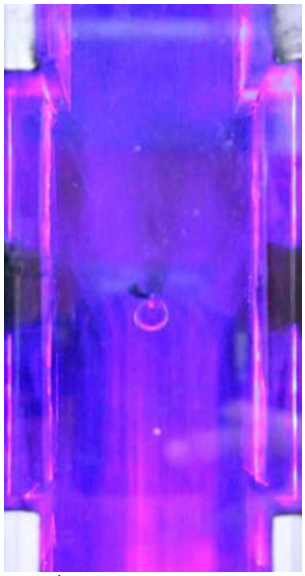


(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ

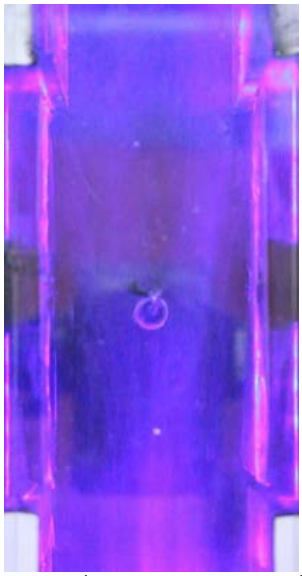


(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.18 ภาพวาดแนวการไหลของอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV และความถี่พัลส์ 10 kHz

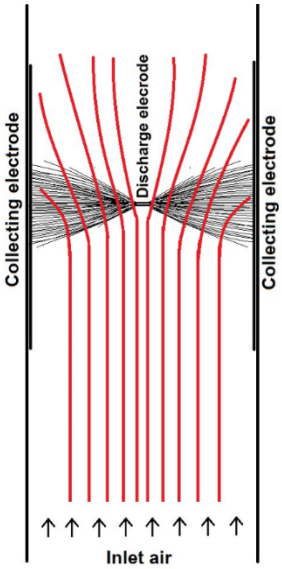


(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ

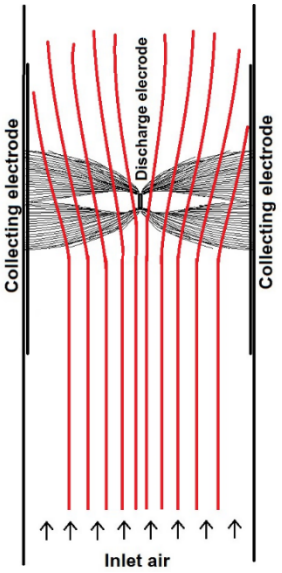


(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.19 การทดสอบแนวการไหลของอากาศที่ ความเร็วอากาศ 2 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV และความถี่พัลส์ 10 kHz



(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ

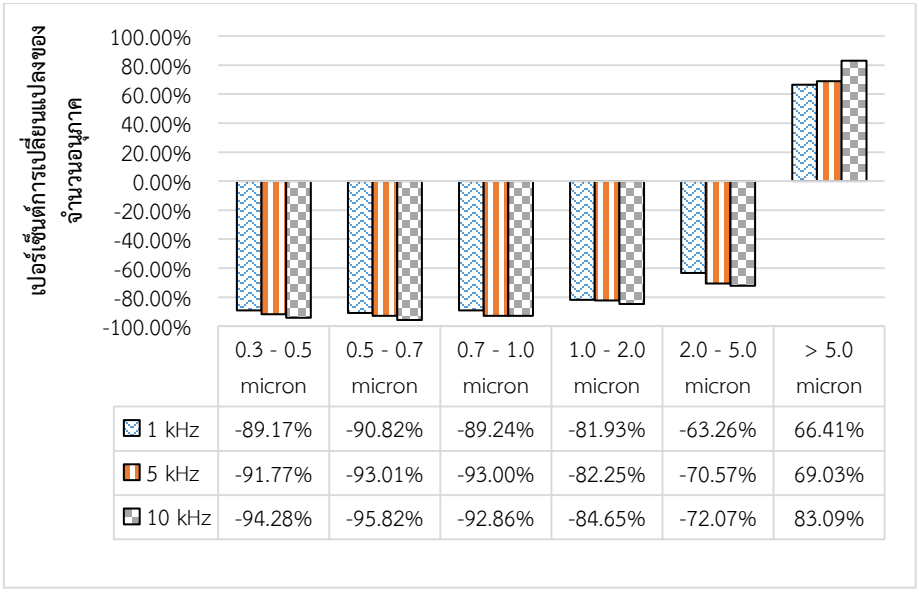


(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.20 ภาพวาดแนวการไหลของอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 2 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV และความถี่พัลส์ 10 kHz

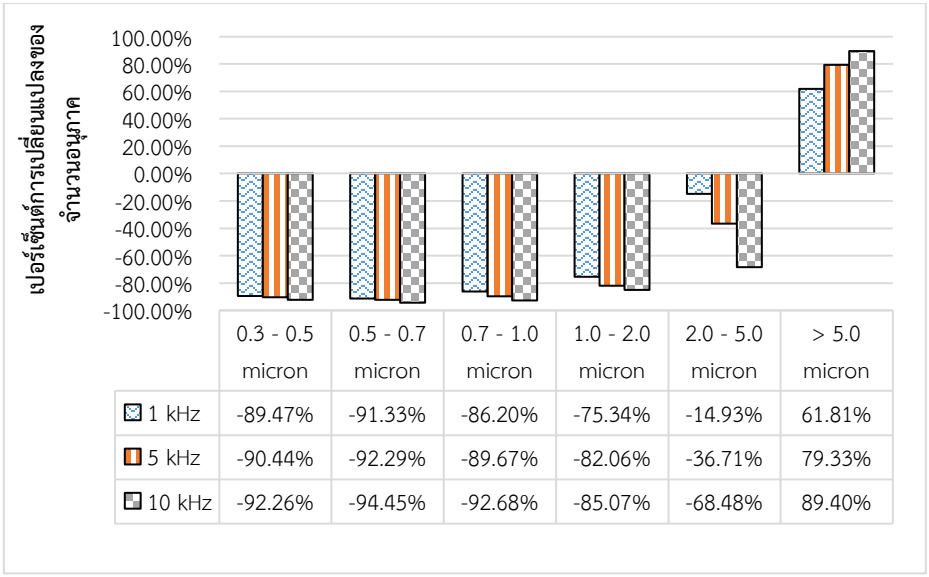
4.2.4 ผลของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและความถี่พัลส์ที่มีต่อการรวมตัวอนุภาคขนาดเล็ก

การทดสอบผลของความถี่พัลส์ที่มีต่อการรวมตัวของอนุภาค โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV ที่อัตราการไหลอากาศ 1 m/s พบว่า ที่ความถี่พัลส์ เท่ากับ 10 kHz จะมีประสิทธิภาพในการลดลงของจำนวนอนุภาคขนาดเล็กได้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เนื่องจาก การเพิ่มความถี่ของพัลส์ที่สูงขึ้นสามารถช่วยเพิ่มโอกาสในการชาร์ตอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านสนามพลาสมาได้มากขึ้น ซึ่งจำนวนอนุภาคขนาดเล็กที่ลดลงมาขึ้นโดยเฉพาะในช่วงอนุภาคขนาด 0.3-0.5 μm จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคมากที่สุด



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
1 kHz	-89.17%	-90.82%	-89.24%	-81.93%	-63.26%	66.41%
5 kHz	-91.77%	-93.01%	-93.00%	-82.25%	-70.57%	69.03%
10 kHz	-94.28%	-95.82%	-92.86%	-84.65%	-72.07%	83.09%

(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ

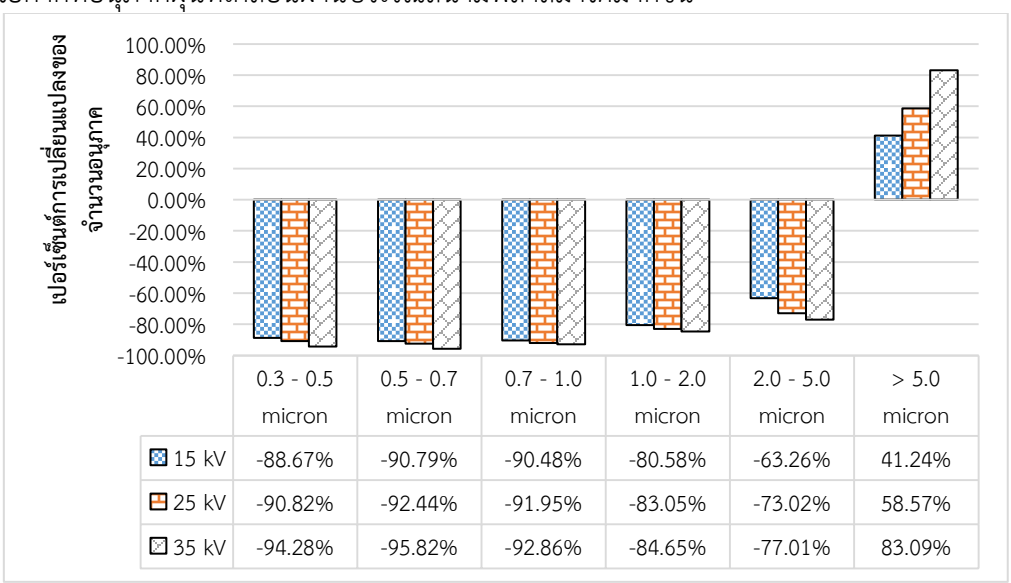


	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
1 kHz	-89.47%	-91.33%	-86.20%	-75.34%	-14.93%	61.81%
5 kHz	-90.44%	-92.29%	-89.67%	-82.06%	-36.71%	79.33%
10 kHz	-92.26%	-94.45%	-92.68%	-85.07%	-68.48%	89.40%

(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

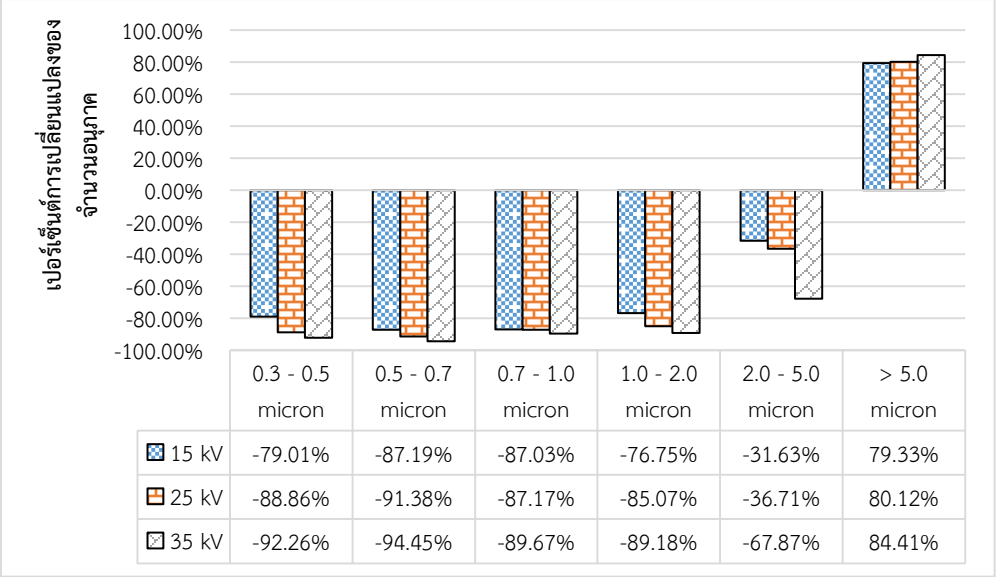
รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ตามการเปลี่ยนแปลงความถี่พัลส์ ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV

การศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรด ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s และความถี่พัลส์ 10 kHz พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 35 kV จะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาคมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เนื่องจากที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น จะทำให้อากาศแตกตัวเป็นพลาสมาได้มากขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาให้มากขึ้น ทำให้เพิ่มโอกาศที่อนุภาคฝุ่นที่เคลื่อนผ่านบริเวณสนามพลาสมาได้มากขึ้น



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
15 kV	-88.67%	-90.79%	-90.48%	-80.58%	-63.26%	41.24%
25 kV	-90.82%	-92.44%	-91.95%	-83.05%	-73.02%	58.57%
35 kV	-94.28%	-95.82%	-92.86%	-84.65%	-77.01%	83.09%

(ก) แนวฟันเลื่อยวางแนวเดียวกับการเคลื่อนที่อากาศ



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
15 kV	-79.01%	-87.19%	-87.03%	-76.75%	-31.63%	79.33%
25 kV	-88.86%	-91.38%	-87.17%	-85.07%	-36.71%	80.12%
35 kV	-92.26%	-94.45%	-89.67%	-89.18%	-67.87%	84.41%

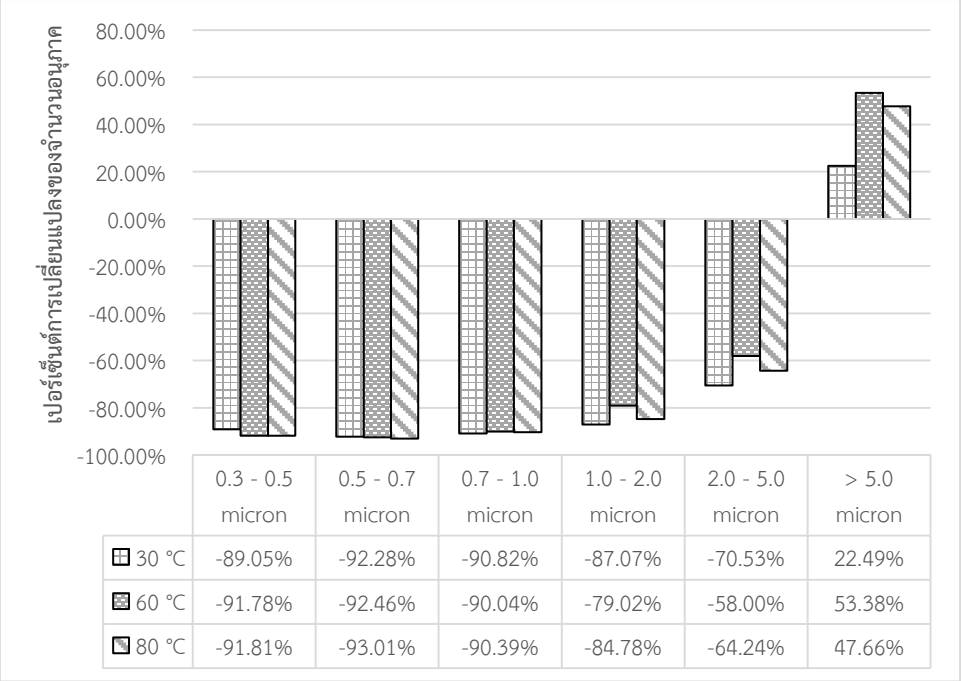
(ข) แนวฟันเลื่อยวางขวางการเคลื่อนที่ของอากาศ

รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ตามการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงสุด ที่ความเร็วก๊าซ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz

จากการศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และความถี่พัลส์ ในครั้งนี้ ที่มีผลต่อการลดลงของจำนวนอนุภาค ภายใต้สนามพลาสมา จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 35 kV และความถี่พัลส์เท่ากับ 10 kHz สามารถลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กได้ดีที่สุด ซึ่งในตัวแปรอื่นๆ จะถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขนี้

4.2.5 ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อการรวมตัวของอนุภาค

การทดสอบผลเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศ พบว่า อุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดลงของอนุภาคเล็ก ที่ขนาด 0.3-0.5 μm มีผลไม่แตกต่างมากนักหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยน้อย เนื่องจาก อุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเริ่มต้นในการกระตุ้นอากาศให้แตกตัวเป็นพลาสมามีค่าน้อยลง ตามสมการที่ 2.21 และ 2.22 ซึ่งเป็นการทดสอบที่อุณหภูมิก๊าซประมาณ 27°C (สภาวะปกติ) 60 °C และ 80 °C จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ดังนั้นในการป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเข้าไปเท่าเดิม แต่อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแตกตัวของพลาสมามาขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ในการแตกตัวของอากาศเป็นพลาสมาอาจไม่ได้สูงขึ้นมาก เนื่องจากอุณหภูมิในการทดสอบมีค่าอุณหภูมิไม่สูงมากนัก อันเป็นผลมาจากหากทดสอบที่อุณหภูมิเกิน 100 °C จะทำให้อุโมงค์ลมที่เป็นอะคิลิคเกิดการละลายได้

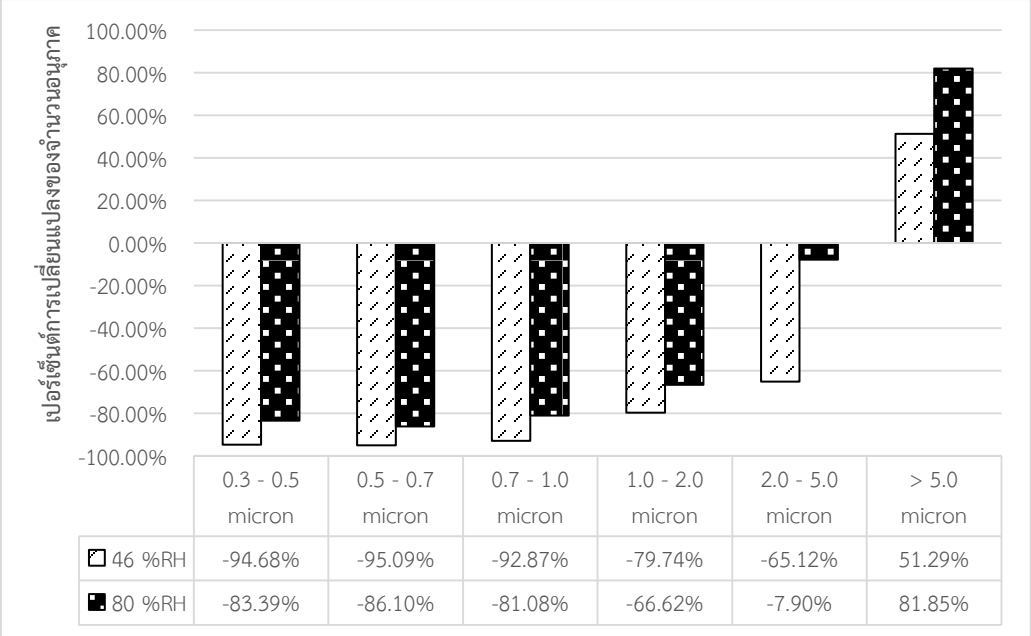


	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
30 ℃	-89.05%	-92.28%	-90.82%	-87.07%	-70.53%	22.49%
60 ℃	-91.78%	-92.46%	-90.04%	-79.02%	-58.00%	53.38%
80 ℃	-91.81%	-93.01%	-90.39%	-84.78%	-64.24%	47.66%

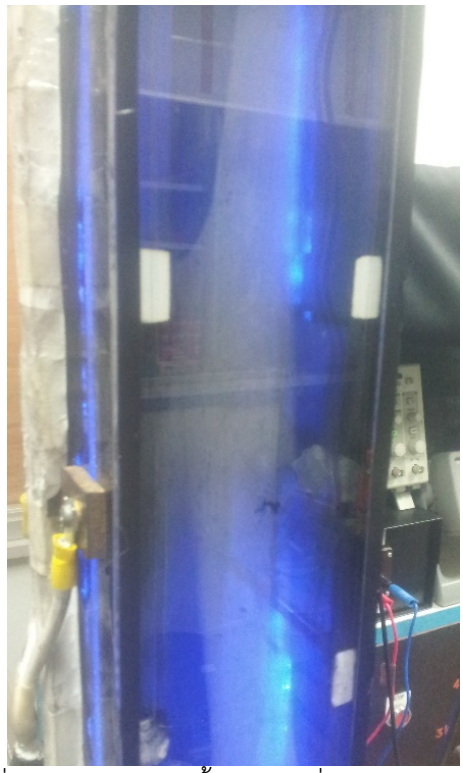
รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV

การทดสอบผลเนื่องจากความชื้น พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความชื้นของอากาศโดยการให้ความร้อนแก่น้ำเพื่อให้น้ำระเหยเป็นไอน้ำ โดยผลของประสิทธิภาพในการลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กที่อัตราการไหลก๊าซ 1 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV ความถี่พัลส์ 10 kHz ในกรณีที่มีความชื้น 80.4% (อุณหภูมิกระเป๋าเปียก 29 $^{\circ}$C และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง 31.9 $^{\circ}$C) จะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเทียบกับกรณีสภาวะปกติ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความชื้น 46.3% (อุณหภูมิกระเป๋าเปียก 19 $^{\circ}$C และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง 27 $^{\circ}$C) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เนื่องจากการแตกตัวของอากาศให้เป็นไอออนจะเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เพราะมีอนุภาคของไอน้ำเข้ามามีผลกระทบ และในกรณีที่อากาศมีความชื้นสูงจะทำให้เกิดไอน้ำเกาะที่ผิวอุโมงค์ลม และอิเล็กโทรดแบบฟันเลื่อยและแผ่นดังแสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลัดวงจรที่ผิวอุโมงค์ลม โดยกระแสไฟฟ้าจะวิ่งจากดิสชาร์จอิเล็กโทรดผ่านผิวอุโมงค์ลมที่ติดกับดิสชาร์จอิเล็กโทรด และผ่านไปยังคอลเลคติงอิเล็กโทรด ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอนุภาค นอกจากนั้นผลของความชื้น ในกรณีที่ป้อนกระแสไฟฟ้าที่ความถี่พัลส์ต่ำจะทำให้การเกิดการลัดวงจรในอากาศ เช่น ที่ความถี่พัลส์ 1 kHz ความเร็วก๊าซ 1 m/s แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 kV ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ดังนั้นในกรณีที่ก๊าซมีความชื้นสูงควรเลือกป้อนแรงไฟฟ้าที่มีความถี่พัลส์สูง

แต่อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้ในระบบจริงที่อนุภาคได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง จะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง ส่งผลให้ความชื้นของอากาศที่เกิดขึ้นไม่มีผลกระทบต่อเครื่องรวมตัวอนุภาคขนาดเล็ก



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV

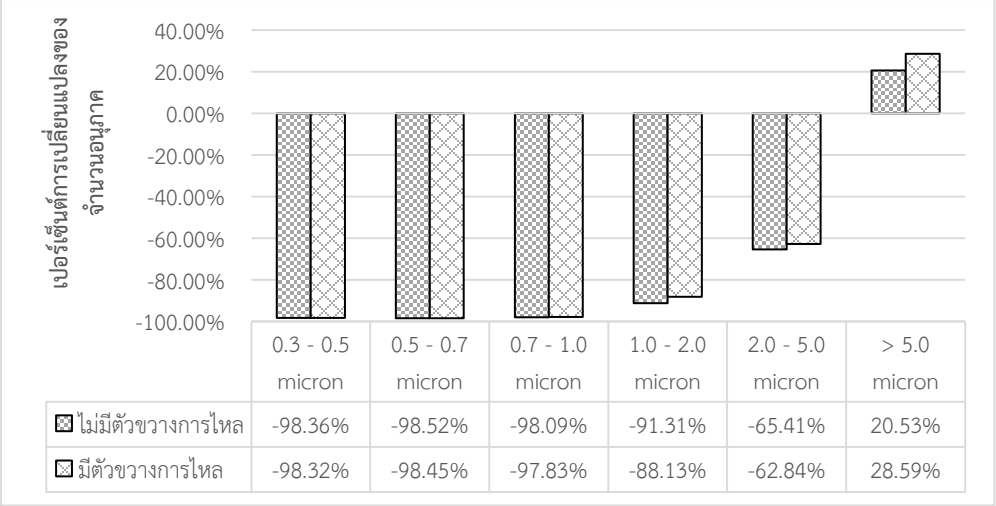


รูปที่ 4.25 การเกิดไอน้ำไปเกาะที่ผิวผนังอุโมงค์ลม

รูปที่ 4.26 การเกิดการลัดวงจรในอากาศ ระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรด และคอลเลคติงอิเล็กโทรด ที่ความเร็วก๊าซ 1 m/s ความถี่พัลส์ 1 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kHz

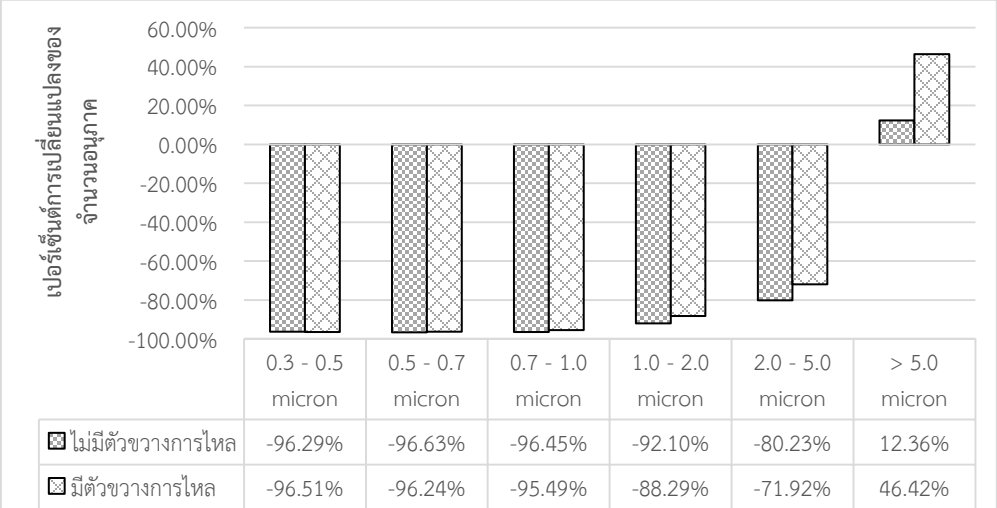
4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงของการรวมตัวของอนุภาค ในกรณีติดตั้งตัวขวางการไหล

การศึกษาผลของการไหลของของไหลผ่านตัวขวางการไหลเพื่อให้เกิด Vortex shedding ด้วย CFD จะได้รูปร่างของตัวขวางการไหลที่น่าสนใจ 2 แบบ คือ ตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม ที่เกิดความดันตกคร่อมน้อยสุด และตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ ที่สามาถทำให้เกิดการแกว่งของการหมุนวนที่รุนแรงที่สุด แต่เกิดความดันตกคร่อมมากที่สุด โดยเมื่อนำตัวขวางการไหลที่ 2 แบบมาติดตั้งในอุโมงค์ลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็ก ในระดับเล็กกว่า 1 ไมครอน สามารถแสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ได้ดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.29 ที่อัตราการไหลก๊าซ 1-3 m/s ตามลำดับ



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ไม่มีตัวขวางการไหล	-98.36%	-98.52%	-98.09%	-91.31%	-65.41%	20.53%
มีตัวขวางการไหล	-98.32%	-98.45%	-97.83%	-88.13%	-62.84%	28.59%

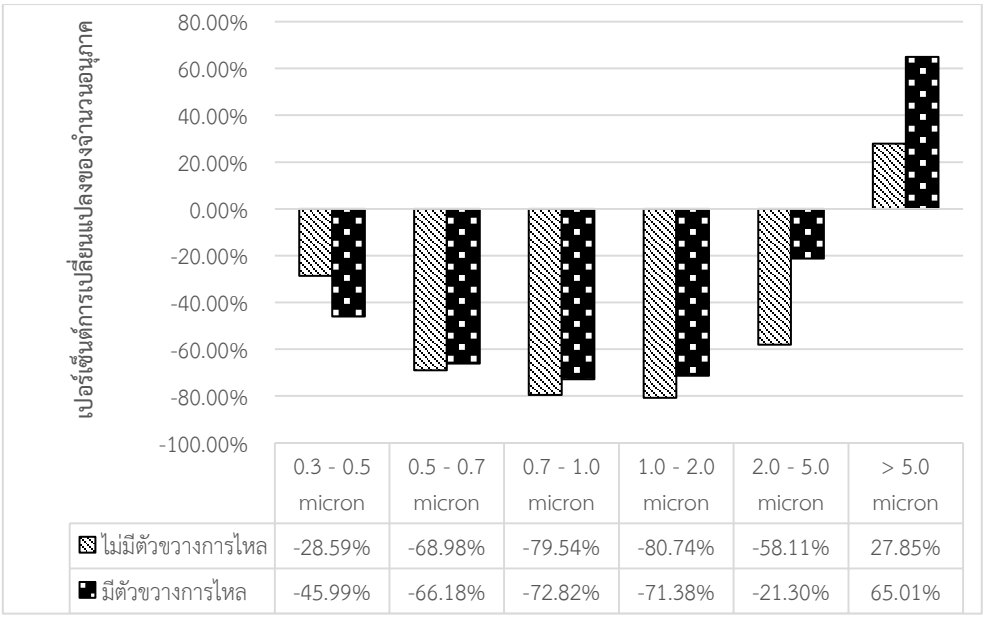
(ก) กรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ไม่มีตัวขวางการไหล	-96.29%	-96.63%	-96.45%	-92.10%	-80.23%	12.36%
มีตัวขวางการไหล	-96.51%	-96.24%	-95.49%	-88.29%	-71.92%	46.42%

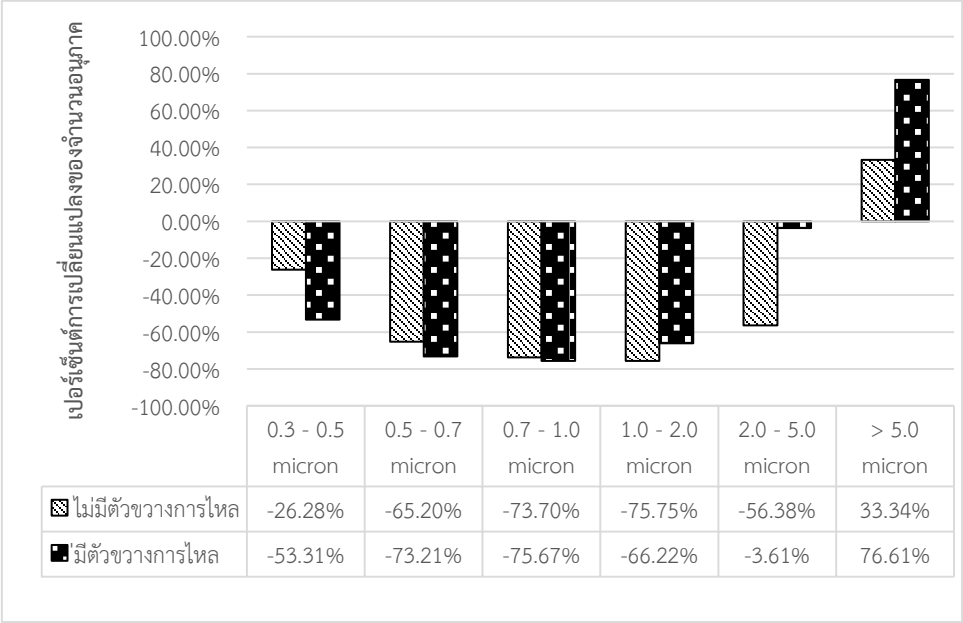
(ข) กรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ

รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV และแนวฟันเลื่อยวางขวางการไหลของอากาศ



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ไม่มีตัวขวางการไหล	-28.59%	-68.98%	-79.54%	-80.74%	-58.11%	27.85%
มีตัวขวางการไหล	-45.99%	-66.18%	-72.82%	-71.38%	-21.30%	65.01%

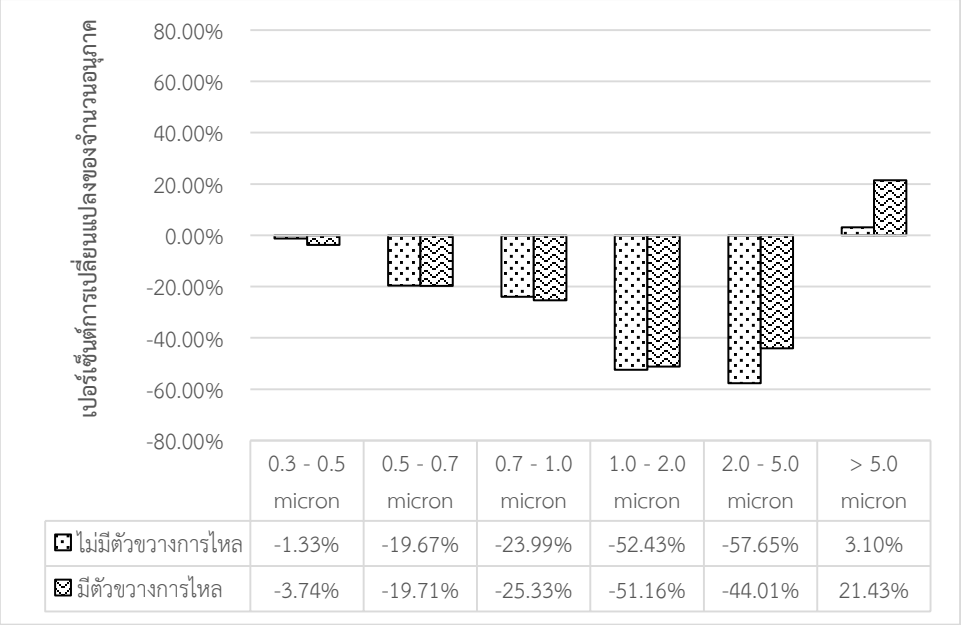
(ก) กรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ไม่มีตัวขวางการไหล	-26.28%	-65.20%	-73.70%	-75.75%	-56.38%	33.34%
มีตัวขวางการไหล	-53.31%	-73.21%	-75.67%	-66.22%	-3.61%	76.61%

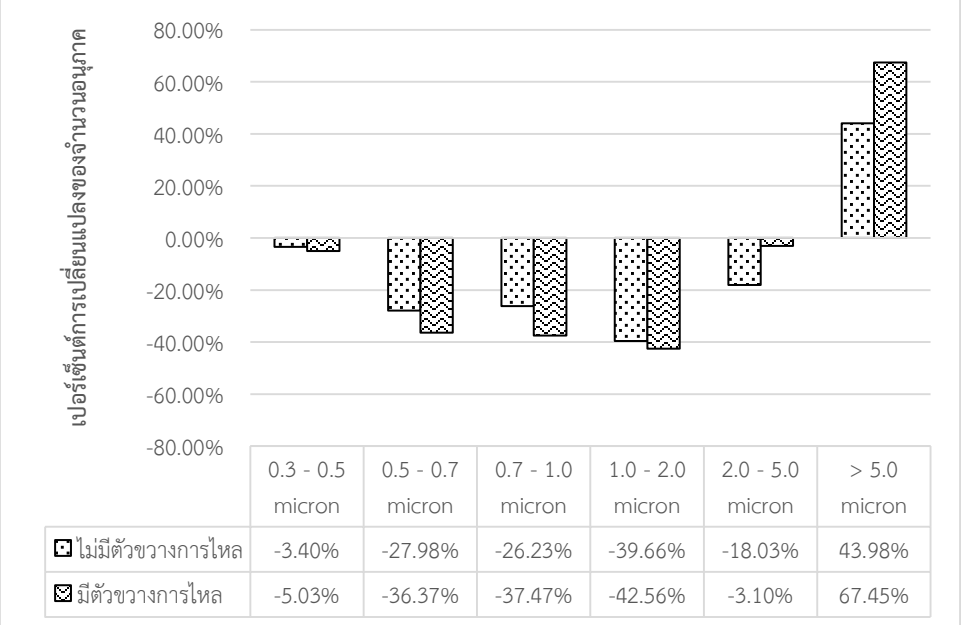
(ข) กรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ

รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ที่ความเร็วอากาศ 2 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV และแนวฟันเลื่อยวางขวางการไหลของอากาศ



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ไม่มีตัวขวางการไหล	-1.33%	-19.67%	-23.99%	-52.43%	-57.65%	3.10%
มีตัวขวางการไหล	-3.74%	-19.71%	-25.33%	-51.16%	-44.01%	21.43%

(ก) กรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบทรงกระบอกกลม



	0.3 - 0.5 micron	0.5 - 0.7 micron	0.7 - 1.0 micron	1.0 - 2.0 micron	2.0 - 5.0 micron	> 5.0 micron
ไม่มีตัวขวางการไหล	-3.40%	-27.98%	-26.23%	-39.66%	-18.03%	43.98%
มีตัวขวางการไหล	-5.03%	-36.37%	-37.47%	-42.56%	-3.10%	67.45%

(ข) กรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบแผ่นเรียบ

รูปที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์การลดลงของจำนวนอนุภาค ที่ความเร็วอากาศ 3 m/s ความถี่พัลส์ 10 kHz และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 35 kV และแนวฟันเลื่อยวางขวางการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.27 ที่อัตราการไหล 1 m/s พบว่าการติดตัวขวางการไหลมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของอนุภาคขนาดเล็ก ไม่แตกต่างกับกรณีไม่ติดตั้งตัวขวางการไหล แต่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 2 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ความเร็วของก๊าซที่สูงมากขึ้น เริ่มมีผลกระทบต่อการลดลงของอนุภาคขนาดเล็ก โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลในกรณีติดตั้งตัวขวางการไหลกับไม่ติดตั้งตัวขวางการไหล พบว่า การติดตัวขวางการไหลสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะขนาดอนุภาค 0.3-0.5 μm ซึ่งสามารถลดได้ 27% และ 17% สำหรับกรณีติดตั้งตัวขวางการไหลแบบ

ทรงกระบอกกลมและแบบแผ่นเรียบ ตามลำดับ โดยขนาดอนุภาคจะรวมตัวใหญ่ขึ้นมากกว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวขวางการไหล ซึ่งสามารถสังเกตได้ ที่อนุภาคใหญ่กว่า 5 μm เนื่องจาก การติดตัวขวางการไหลสามารถเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มพลาสมา รวมถึงการติดตั้งตัวขวางการไหลทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทำให้เพิ่มโอกาศการชนกันของอนุภาคที่ถูกชาร์ตมากยิ่งขึ้น ส่วนที่ความเร็ว 3 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ในกรณีการติดตัวขวางการไหลก็ยังสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการลดจำนวนอนุภาคขนาดเล็กขนาด 0.3-0.5 μm ได้ดีกว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวขวางการไหลเล็กน้อย