

การลดผลของจูลฮีตติ้งในอุปกรณ์ของไดอิเล็กโตรโฟรีติกด้วยครีบนีโครสำหรับการ
แยกเซลล์ด้วยอุปกรณ์ไดอิเล็กโตรโฟรีติก

Reduction of Joule Heating in Dielectrophoretic Device with Micro-Scale Fin
for Cell Separation in Dielectrophoretic Device

นายพัชรภัทร

ปะพุระสะโร

นายพิรพัฒน์

ช้างแก้ว

นายวสิน

อัสวโกสินชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การลดผลของจูลฮีทติ้งในอุปกรณ์ของไดอิเล็กโตรโฟรีติกด้วยครีปไมโครสำหรับการ
แยกเซลล์ด้วยอุปกรณ์ไดอิเล็กโตรโฟรีติก

Reduction of Joule Heating in Dielectrophoretic Device with Micro-Scale Fin
for Cell Separation in Dielectrophoretic Device

นายพัชรภัทร

ปะพุทธะโร

นายพิรพัฒน์

ช่างแก้ว

นายวศิน

อัครโกสินชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวุฒิ

หลิวพิริยวงค์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร

บัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

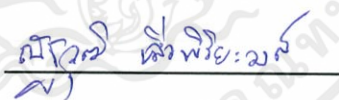
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การลดผลของจูลฮีตติ้งในอุปกรณ์ของไดอิเล็กโตรโฟรีซิสด้วยครีปไมโครสำหรับการแยกเซลล์ในอุปกรณ์ไดอิเล็กโตรโฟรีซิส

(Reduction of Joule Heating in Dielectrophoretic Device with Micro-Scale Fin for Cell Separation in Dielectrophoretic Device with Micro-Scale Fin)

ผู้จัดทำ

1. นาย พชรภัทร ปะพุดสะโร รหัสประจำตัว 53011091
2. นาย พิรพัฒน์ ช้างแก้ว รหัสประจำตัว 53011143
3. นาย วศิน อัครโกสินชัย รหัสประจำตัว 53011443



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.นัฐวุฒิ หลัวพริยะวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดผลของจุลฮีทติ้งในอุปกรณ์ของไดโอดเล็กโตรโพรติกด้วยครีบไมโครสำหรับการแยกเซลล์

นายพัชรภัทร ปะพุทธะโร 53011091

นายพิรพัฒน์ ช้างแก้ว 53011143

นายวศิน อัสวโกสินชัย 53011443

บทคัดย่อ

อุปกรณ์ไดโอดเล็กโตรโพรติกถูกนำมาใช้ในการแยกเซลล์ เพื่อใช้ในการศึกษาทั้งทางการแพทย์และทางเคมีกันอย่างกว้างขวาง โดยอุปกรณ์นี้จะทำงานโดยผ่านสนามไฟฟ้าเพื่อแยกเซลล์แต่ละชนิด อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้านั้นเป็นแหล่งกำเนิดของจุลฮีทติ้งทั้งในของไหลและในเซลล์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางชีวภาพและกายภาพของเซลล์ ทำให้การทำงานของเซลล์ผิดปกติ และตายในที่สุด ดังนั้นเพื่อที่จะลดปัญหาของจุลฮีทติ้งได้ทำการวิจัยและศึกษาการระบายความร้อนโดยการติดครีบในอุปกรณ์ไดโอดเล็กโตรโพรติกโดยศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเชิงตัวเลข และศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อจุลฮีทติ้งเช่น ความต่างศักย์ การนำไฟฟ้าของของไหล และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการระบายความร้อน เช่น ช่องว่างระหว่างครีบ ความสูงครีบ ความเร็วของน้ำหล่อเย็นทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการระบายความร้อนในอุปกรณ์เมื่อคำนวณออกมาพบว่า การติดครีบระบายความร้อนสามารถลดอุณหภูมิลงได้ถึง 57.57 % ทำให้สามารถเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ถึง 61 % และเมื่อวิเคราะห์ผลพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของความสูงต่อความกว้างครีบคือ 4 ต่อ 1 เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทำให้สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและอัตราส่วนของพื้นที่ในรูปตัวแปรไร้มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reduction of Joule Heating in Dielectrophoretic Devices with Micro-Scaled Fins for Cell Separation

Patchaaphat Paputsaro 53011091

Pirapat Changkaew 53011143

Wasin Asssawakosinchai 53011443

Dr.Nuttawut Lewpiriyawong Advisor

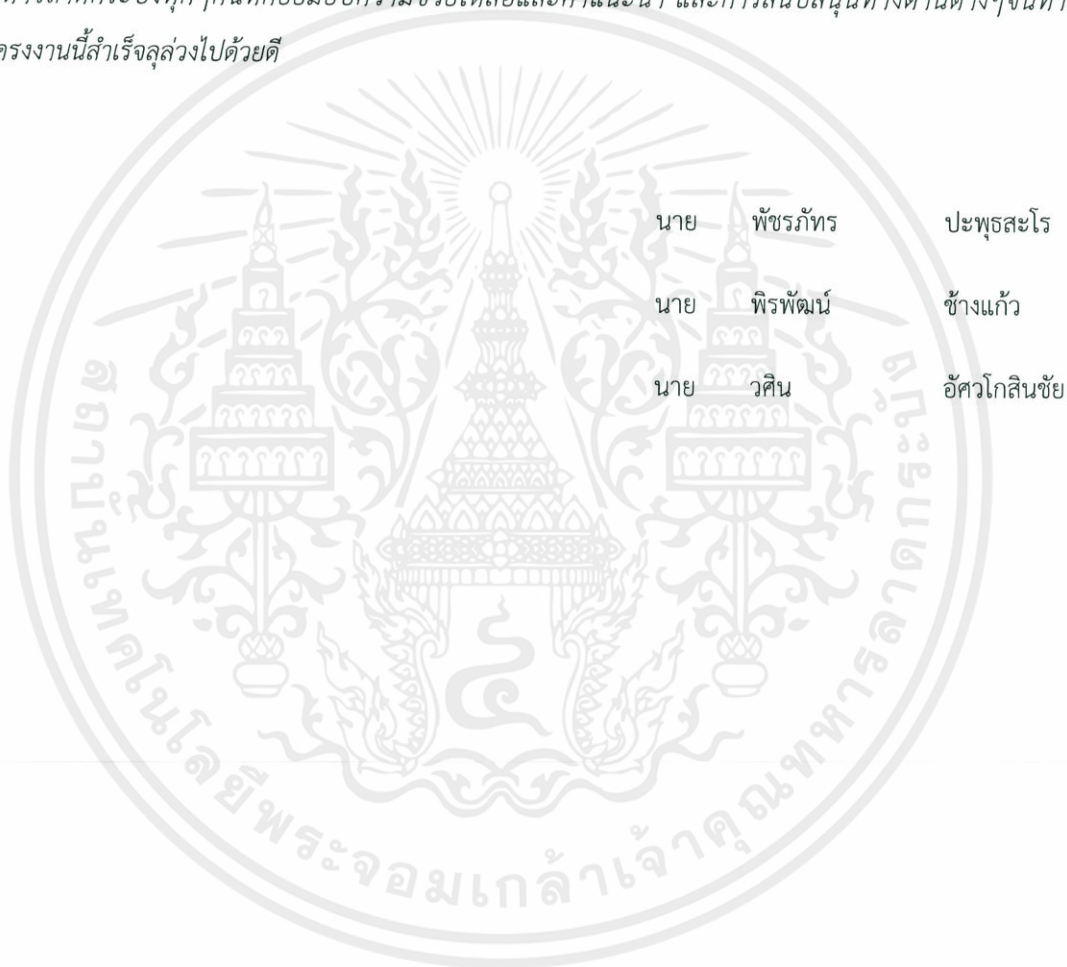
Abstract

Dielectrophoretic devices are widely used in separation of biological cells for further diagnosis in medical or chemical processes. These devices required supplied electric fields to manipulate and thus separate different types of cells. However, the applied electric fields is the major source of Joule heating in the liquid where cells reside in. As a result, high electric fields can change the physiological properties of cells and, if severe, may jeopardize the samples. To mitigate Joule heating effect. This project studies heat transfers in DEP Device with micro-scaled fins. We numerically obtained the temperature distribution, and studied the variables that is related to Joule heating such as the potential difference and conductivity. Also, we studied variables those affect the cooling such as gap between fins , the width of cooling water and the cooling water speed, and then produced the graph of all variables affecting to the heat transfer in DEP devices. The installation of micro fins significantly decrease maximum temperature by 57.57% and can increases voltage by 61%. This graph can be useful to determine the number and sizes of micro-scaled fins.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันที่เคารพอย่างยิ่ง ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าได้ประสบความสำเร็จในทุกๆด้าน
ขอขอบพระคุณอาจารย์ณัฐวุฒิ หลัวพิริยะวงศ์ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหามากมาย และ อาจารย์ท่าน
อื่นๆท่านที่ให้ความรู้ทั้งในสถาบันการศึกษาแห่งนี้รวมทั้งอาจารย์สถาบันอื่นๆที่เคยศึกษามาด้วยเช่นกัน

สุดท้ายขอขอบคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆในภาควิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบังทุกคนที่คอยมอบความช่วยเหลือและคำแนะนำ และการสนับสนุนทางด้านต่างๆจนทำให้
โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญแสดงรูปภาพ.....IX

สารบัญตาราง.....XIV

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....1

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ขอบเขตโครงการ.....2

1.5 วิธีการดำเนินงาน.....2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา..... 2

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 2 หน้าและข้อดีข้อเสีย

2.1	อธิบายความร้อน(Fin).....	3
2.1.1	ชนิดของครี.....	4
2.2	โครงสร้างโดยทั่วไปของอุปกรณ์ DEP.....	6
2.3	Microfabrication.....	6
2.3.1	Photoelective materials.....	7
2.3.2	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการphotolith.....	8
2.3.3	ขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน.....	9
2.3.3.1	การสร้างmask.....	9
2.3.3.2	การถ่ายทอดลายด้วยแสง Optical printing.....	11
2.3.3.3	การล้างPhotoresistด้วยสารละลาย.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 3 ทฤษฎี

3.1 Dielectrophoresis.....	14
3.2 MicroPrep design.....	15
3.3 Electrostatics.....	16
3.4 Heat Transfer.....	16
3.5 Flow Field.....	18

บทที่ 4 การออกแบบการคำนวณ

4.1 Model.....	20
4.2 Boundary conditions.....	21
4.3 กระบวนการวิเคราะห์.....	22
4.3.1 ส่วนประกอบของโปรแกรมCOMSOLMultiphysic.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
4.3.2 Grid independent check..... 24
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 5 บทสรุปและผลวิจารณ์

5.1 สรุปผล.....	27
5.1.1 Electric field.....	27
5.1.2 Fluid dynamic.....	28
5.1.3 Temperature field.....	31
5.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ลดลง.....	32
5.2.1 อิทธิพลความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลในChannel.....	33
5.2.2 อิทธิพลของจำนวนครีบและความเร็วของน้ำหล่อเย็นต่ออุณหภูมิสูงสุดของ ของไหลในChannel.....	34
5.2.3 อิทธิพลของความสูงของครีบที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

5.2.4	อิทธิพลของความกว้างครีบริบที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel.....	38
5.2.5	อิทธิพลของความกว้างระหว่างครีบริบและJoule Number ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel.....	39
5.2.6	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิ,รูปทรงและจำนวนของครีบริบที่เหมาะสม(Chart for Optimal Temperature and Micro Fin Dimensions).....	44
5.3	วิจารณ์ผล.....	45
5.4	ปัญหาที่พบ.....	45
5.5	แนวทางการแก้ไข.....	45
บรรณานุกรม.....		47
ภาคผนวก.....		51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญแสดงรูปภาพ

หน้าที่

2.1 การใช้ครีบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มอัตราถ่ายเทความร้อนจากผนัง.....	3
2.2 ครีบบนพื้นผิวที่หน้าตัดคงที่.....	4
2.3 ครีบบนพื้นผิวที่หน้าตัดไม่คงที่.....	4
2.4 ครีบบางแหวน.....	5
2.5 ครีบบนหลอด.....	5
2.6 แสดงองค์ประกอบของชิ้นงาน.....	6
2.7 วิสตุไแสง Spinner coater การเคลือบสาร Photoresist 1000-6000 rpm, 0.5-3µm.....	7
2.8 ขั้นตอนการถ่ายภาพทอดลอย.....	12
3.1 ภาพแสดงแรงที่กระทำต่ออนุภาคภายในช่องchannel.....	14
3.2 (A) ลักษณะโดยรวมของ Microprep (B) ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในมุมมอง Top view.....	15
4.1 โมเดลที่ใช้ในการ Simulation.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญแสดงรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

4.2 ขนาดของChannel.....	20
4.3 รายระเอียดของครีประบายความร้อน.....	21
4.4 โดเมนที่1.....	22
4.5 โดเมนที่2.....	22
4.6 โดเมนที่3.....	22
4.7 ภาพภายในโปรแกรมCOMSOLMultiphysic.....	23
4.8 ส่วนประกอบของโปรแกรมCOMSOLMultiphysic.....	24
4.9 Local element1.....	24
4.10Local element2.....	24
4.11Local element3.....	25
4.12Local element4.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
4.13 เส้นของชุดข้อมูลที่จะใช้ตรวจสอบความเร็ว และ สนามไฟฟ้าของโดเมนที่ 1..... 25
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญแสดงรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

4.14	ระนาบของข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบอุณหภูมิของโดเมนที่ 2 และ 3.....	26
4.15	ระนาบของข้อมูลที่จะใช้ตรวจสอบอุณหภูมิโดยจะดึงข้อมูลมาเฉพาะโดเมนที่ 3.....	26
5.1	ระนาบxzที่ $y=250\text{ }\mu\text{m}$	27
5.2	แสดงถึงทิศทางของสนามไฟฟ้าในchannelในกรณีที่แผ่นElectrodeวางในแนวเดียวกัน.....	27
5.3	ภาพแสดงการไหลของของไหลในChannelในกรณีที่ไม่ได้คิดอธิบายความร้อน.....	28
5.4	ภาพแสดงการไหลของของไหลในChannelในกรณีที่คิดอธิบายความร้อน.....	28
5.5	แสดงการไหลของของไหลภายในChannelบนระนาบXY ที่ $z=540\text{ }\mu\text{m}$ (บริเวณตรงกลางของ Channel) ในกรณีที่ไม่ได้คิดอธิบายความร้อน.....	29
5.6	แสดงการไหลของของไหลภายในChannelบนระนาบXYที่ $z=540\text{ }\mu\text{m}$ (บริเวณตรงกลางของ Channel) ในกรณีที่คิดอธิบายความร้อน.....	29
5.7	แสดงการไหลของของไหลภายในChannel บนระนาบxz ในกรณีที่ไม่ได้คิดอธิบาย.....	30
5.8	การไหลของของไหลภายในChannelบนระนาบ xzในกรณีที่คิดอธิบาย.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

5.9 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์DEP ในกรณีที่ไม่ได้คิดอธิบายความร้อน..... 31

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้

สารบัญแสดงรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

5.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์ DEP ในกรณีที่ติดครีบบรรบายความร้อน.....	32
5.11 บริเวณที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์.....	32
5.12 โมเดลที่ไม่ติดครีบบนและติดครีบบน.....	33
5.13 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆโดยเปรียบเทียบในกรณีที่ติดครีบบรรบายความร้อนและไม่ติดครีบบรรบายความร้อน.....	33
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสูงสุดกับจำนวนครีบบนในแต่ละความเร็วของน้ำหล่อเย็น.....	35
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและความสูงที่เปลี่ยนไปที่ความกว้างของครีบบน 100 μm และ 250 μm	37
5.16 แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ห่อหุ้มของครีบบนที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel.....	38
5.17 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิสูงสุดกับระยะความกว้างครีบบน.....	38
5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างครีบบนหนึ่งตัวที่เพิ่มความกว้างระหว่างครีบบนกับการเพิ่มจำนวนครีบบนโดยให้ความกว้างระหว่างครีบบนเป็น 100 μm	40
5.19 กราฟแสดงผลความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบบนเท่ากับ 50 μm	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารที่สงวนไว้เท่านั้น

สารบัญแสดงรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

5.20 กราฟแสดงผลความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบเท่ากับ 100 μm	42
5.21 กราฟแสดงผลความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบเท่ากับ 200 μm	42
5.22 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิ,รูปทรงและจำนวนของครีบที่เหมาะสม(Chart for Optimal Temperature and Micro Fin Dimensions).....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

2.1	วัสดุไวแสง(Photo reactivematerials).....	9
2.2	การถ่ายทอดลวดลายด้วยแสงOptical printingลวดลายของวงจรสามารถถ่ายทอดได้โดยแสง ซึ่งฟิล์มส่วนใหญ่จะเป็น Silica, Polysilican, Silicon nitride ,Silicidesand metals.....	11
4.1	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ระหว่างแต่ละ Element size.....	25
5.1	ภาพโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนครีบและความเร็วของน้ำหล่อเย็นต่ออุณหภูมิ สูงสุดของของไหลในChannel.....	34
5.2	แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของความสูงของครีบที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของ ไหลในChannel.....	36
5.3	แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของความกว้างระหว่างครีบและJoule Number ที่มีผล ต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel.....	39
A	ค่าคงที่ทั่วไปและคุณสมบัติของของไหลที่ถูกใช้ในโมเดล.....	52
B	แสดงคุณสมบัติต่างๆของแก้วที่ใช้ทำฐาน.....	52
C	แสดงคุณสมบัติต่างๆของน้ำที่ อุณหภูมิต่างๆ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
D แสดงค่า Conductivity ของสารต่างๆ..... 54
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสิ่งนี้อะไร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้าที่

E	แสดงโมเดลที่ใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบท่ำกับ $50\text{ }\mu\text{m}$	58
F	แสดงโมเดลที่ใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบท่ำกับ $100\text{ }\mu\text{m}$	59
G	แสดงโมเดลที่ใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบท่ำกับ $200\text{ }\mu\text{m}$	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความสำคัญและที่มา

การแยกเซลล์ (Cell separation) ในของไหลที่มีเซลล์อยู่ด้วยวิธี Dielectrophoresis (DEP) ในบางกรณีเราต้องการเซลล์ที่มีชีวิตเพื่อใช้ในขั้นตอนทางการแพทย์ต่อ หรือ ใช้ในการทำการวิจัย ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่จะส่งผลต่อการอยู่รอดของเซลล์ในกระบวนการแยกเซลล์ กระบวนการการแยกเซลล์ในอุปกรณ์ DEP อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นและมีโอกาสถึงอุณหภูมิวิกฤต (41°C) ที่ทำให้เซลล์ตายหรือเสื่อมสภาพ[1] [2] เหตุผลของการเพิ่มอุณหภูมิในของไหลคือการผ่านสนามไฟฟ้า (Electric field) ผ่านในของไหล หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "Joule Heating"[3] ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของเซลล์ [4] ทั้งคู่เป็นข้อจำกัดของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วปัญหาเหล่านี้ถูกบรรเทาโดย Peltier Cooling pad[5] และการใช้น้ำที่มีอุณหภูมิ $4-10^{\circ}\text{C}$ [11] มาหล่อเย็นด้านล่างของอุปกรณ์ DEP นอกจากนี้สนามไฟฟ้ายังส่งผลกับการเคลื่อนที่ของของไหล เนื่องจากในสนามไฟฟ้ามีแรงทั้ง 2 แรงคือ แรงคูลอมบ์ (Coulomb Force) และ แรงไดอิเล็กตริก (Dielectric Force) ซึ่งทั้งสองแรงเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ[8] จากที่รู้กันว่าการติดครีปเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถระบายความร้อนออกจากระบบ เพราะการติดครีปเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการระบายความร้อน และมากไปกว่านั้น เมื่อย่อขนาดของครีปให้อยู่ในระดับไมโครจะส่งผลให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มในการเพิ่มขีดจำกัดในการแยกเซลล์ด้วยวิธี Dielectrophoresis

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาว่าการลดลงของอุณหภูมิเมื่อมีการติดไมโครพิน (ครีปในขนาดไมโครเมตร) ในอุปกรณ์ DEP และกำหนดแนวทางการออกแบบการติดตั้งไมโครพินในอุปกรณ์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ครีปเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเมื่อย่อสเกลในระดับไมโครอัตราส่วนระหว่างปริมาตรและพื้นที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตโครงการ

- 1.4.1 ศึกษาเรื่องความร้อนที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่ในของเหลว
- 1.4.2 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ DEP
- 1.4.3 ศึกษาตัวแปรทางด้านขนาดของครีปที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน
- 1.4.4 ศึกษาการเคลื่อนที่ของของเหลวในไมโครเซนแนล

1.5 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาหาความรู้และทำความเข้าใจ ระบบ Dielectrophoresis และ ศึกษาการออกแบบ และทำความเข้าใจ Dielectrophoretic Devices โดยการศึกษาจะใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics เพื่อใช้ในการออกแบบและคำนวณโดยตัวโปรแกรมสามารถจำลองการไหลของของไหลในครีปรวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคนิวตันที่เปลี่ยนไปในของไหลเนื่องจากผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบครีป ดังนั้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวโครงงานดังนี้ คือ Electrostatics, Heat transfer และ Fluid dynamics

1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา

เนื่องจากในทางปฏิบัติการสร้างชิ้นงานเพื่อทดลองนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนเพราะเป็นการสร้างชิ้นงานในระดับไมโครถึงนาโนทำให้กระบวนการสร้างไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีปกติได้ดังนั้นใน

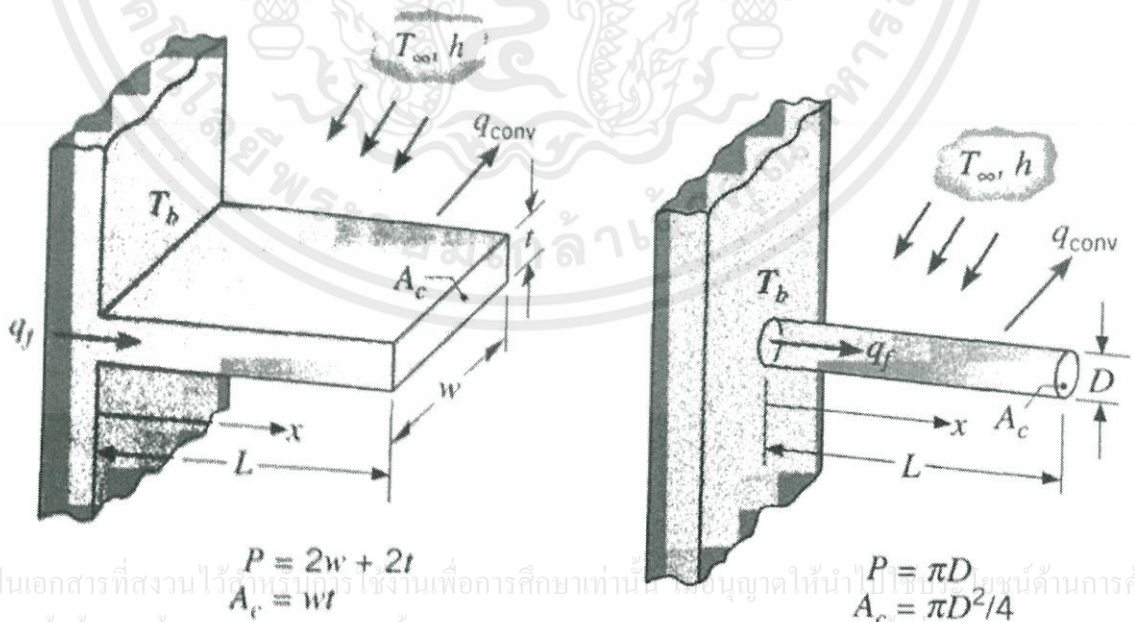
โครงการนี้จะศึกษาแต่เพียงการคำนวณด้วยวิธี Finite Element Method เท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่และความสำคัญการติดตั้งครีบริบระดับไมโครในอุปกรณ์DEP

เนื่องด้วยการแยกเซลล์โดยใช้กระแสไฟฟ้าผ่านจะทำให้เลือดหรือของไหลได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจนทำให้เกิด Joule Heating ในเลือด ซึ่งหากอุณหภูมิของเลือดสูงถึง 41°C ขึ้นไปจะทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงตายได้[1] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนออกจากเลือดในกระบวนการDEP โดยระบบระบายความร้อนนั้นมีหลายรูปแบบเช่น Peltier, Cooling water และ ระบบFin ในที่นี้เราเลือกใช้ระบบ Fin ต่อไปจะเป็นการอธิบายความสามารถของการติดตั้งครีบริบ

2.1 ครีบริบายความร้อน (Fin)

พื้นผิวที่ยื่นลงไปของไหลโดยทั่วไปนั้นหมายถึงของแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นผิว และมีการพาความร้อนระหว่างผิวของมันกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของแข็งและของไหล พื้นผิวดังกล่าวเรียกว่า "ครีบริบายความร้อน (Fin) "

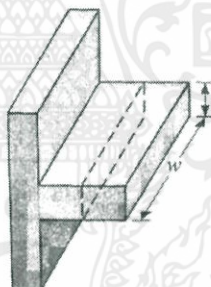


รูปที่ 2.1 การใช้ครีบริบายความร้อนเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนัง[6]

ถ้า T_b เป็นค่าคงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังสามารถเพิ่มได้สองวิธีคือ โดยการเพิ่มค่าประสิทธิภาพการพาความร้อน (h) ซึ่งทำได้ด้วยการเพิ่มความเร็วของของไหล อีกวิธีคือทำให้อุณหภูมิของของไหล T_∞ นั้นลดลง อย่างไรก็ตามจะพบว่าในหลายกรณีแม้ว่าค่า h จะเพิ่มขึ้นสูงจนไม่อาจเพิ่มขึ้นไปอีก แต่ก็ยังไม่พอเพียงพอต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้ได้ตามความต้องการหรือไม่ก็อาจจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมาก เนื่องจากเราจะต้องใช้พัดลม หรือ เครื่องสูบ เพื่อใช้ในการเพิ่มค่า h โดยการเพิ่มความเร็วของของไหล หรืออีกวิธีคือการลดอุณหภูมิของไหล T_∞ นั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมคือการเพิ่มพื้นที่ผิวของการพาความร้อน โดยการติดครีบริบายความร้อนซึ่งยื่นออกมาจากผนังสู่ของไหล ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของครีบริบายนี้มีผลโดยตรงต่อการกระจายอุณหภูมิตลอดตัวครีบริบาย ดังนั้นจึงมีผลต่อการส่งถ่ายความร้อนซึ่งข้อนี้ถือเป็นจุดเด่นของครีบริบายเลยก็ว่าได้ เราจึงนำมาศึกษา

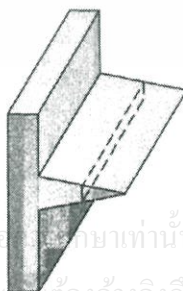
2.1.1 ชนิดของครีบริบาย

1. ครีบริบายพื้นที่หน้าตัดคงที่



รูปที่ 2.2 ครีบริบายพื้นที่หน้าตัดคงที่

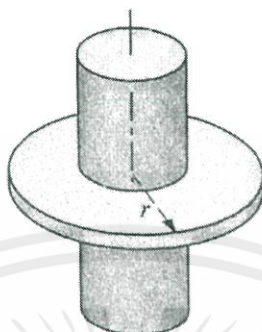
2. ครีบริบายพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่



รูปที่ 2.3 ครีบริบายพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่

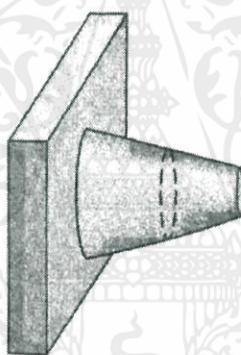
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเพื่อต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ครีบบางแหวน



รูปที่ 2.4 ครีบบางแหวน

4. ครีบหมุด

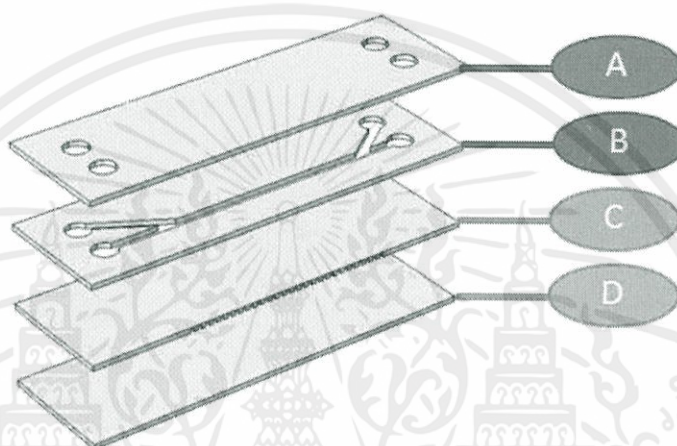


รูปที่ 2.5 ครีบหมุด

เนื่องจากการสร้างครีบบางในระดับไมโคร มีความยุ่งยากและซับซ้อนจนไม่สามารถสร้างครีบบางที่มีรูปทรงที่ซับซ้อนได้ ดังนั้นจึงเลือกรูปทรงแรกคือ square fin ใช้ในอุปกรณ์ DEP เพราะในกระบวนการสร้างชิ้นงานในระดับไมโครมีวิธีการกัดด้วยสารทำให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของอุปกรณ์ DEP



รูปที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบของชิ้นงาน

- A: Cover Glass ที่มีช่องสำหรับของไหลเข้าและออกและมีการติดตั้ง Electrode
- B: แผ่น Cover Glass ที่ผ่านการกัดจนมีช่องสำหรับของไหลไหลผ่าน
- C : Cover Glass ด้านบนมีการติดตั้ง Electrode และด้านล่างผ่านการกัดเพื่อเป็นช่องสำหรับน้ำหล่อเย็นผ่าน
- D : Cover Glass สำหรับปิดกั้นน้ำหล่อเย็นที่ถูกใช้ในระบบ

2.3 Microfabrication[7]

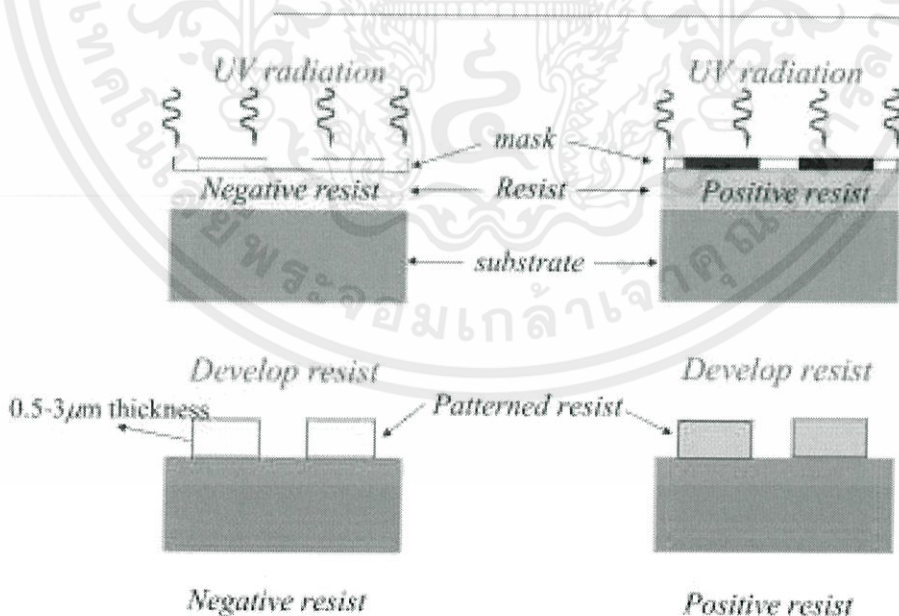
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photolithographyหรือเรียกว่า Optical Lithography หรือ UV Lithography คือกระบวนการที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างขนาดเล็ก โดยฉายแสงเพื่อขนย้าย รูปแบบทางเรขาคณิต ลงบนแผ่นต่างๆที่เคลือบด้วยฟิล์มบางๆ จากสารละลายเคมีไวต่อแสงที่เรียกว่า Photoresist

2.3.1 Photoelective materials

Photoelective materialsหรือเรียกว่าวัสดุ Photresists เป็นวัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาของแสง UV หรือแสงช่วงความยาวคลื่น $< 400\text{nm}$ แบ่งได้เป็นสองชนิดคือ

1. Negative resist หลังจากการฉายแสงลงฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วย Photoresist ชนิด Negative resist แล้วส่วนของฟิล์มที่ถูกฉายแสง ส่วนนั้นจะแข็งขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถละลายได้ในสารละลายของมัน แต่ส่วนอื่นๆจะละลายไป
2. Positive resist หลังจากฉายแสงลงฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยphotoresist ชนิด positive resistส่วนนี้จะอ่อนลงและสามารถละลายได้ในสารละลายของมันแต่ส่วนอื่นๆที่ไม่ถูกฉายแสงก็จะแข็งจนไม่สามารถละลายได้ในสารละลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.7 วัสดุไวแสง Spinner coater การเคลือบสาร Photoresist 1000-6000 rpm, 0.5-3 μm[7]

2.3.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการ Photoresis

High sensitivity:

เวลาการฉายแสงสั้นๆขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีของสารละลายนั้นๆ และความยาวคลื่นของแสงที่ฉายลง

Wave length of UV sources:

สารละลายที่ใช้กับOptical printing จะตอบสนองกับรังสีช่วง330-440 nm แต่ถ้าต้องการรายละเอียดระดับสูงจะต้องใช้แบบ Deep UV region 150-330 nm จาก Excimer lasers เป็นแหล่งกำเนิดของแสงบางชนิด Lasers < 300nm

ความเหนียวเกาะแน่น:

ของสารละลายต้องเกาะติดดีพอ ไม่หลุดออกไปก่อนในกระบวนการอื่นๆ

ความต้านทานการกัด:

ในกรณีที่ใช้แสงพลาสมาในการกัดนั้น ตัวสารละลายจะต้องมีความต้านทานต่อการกัดเพื่อไม่ให้เกิดการ under cutting

ความหนา:

ชั้นของสารละลายไม่ควรหนาเกิน1/3ของขนาดลวดลายที่เล็กที่สุด

Soft Bake

90 Celsius

Hard Bake

120 Celsius

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1วัสดุไวแสง(PhotoreactiveMaterials)

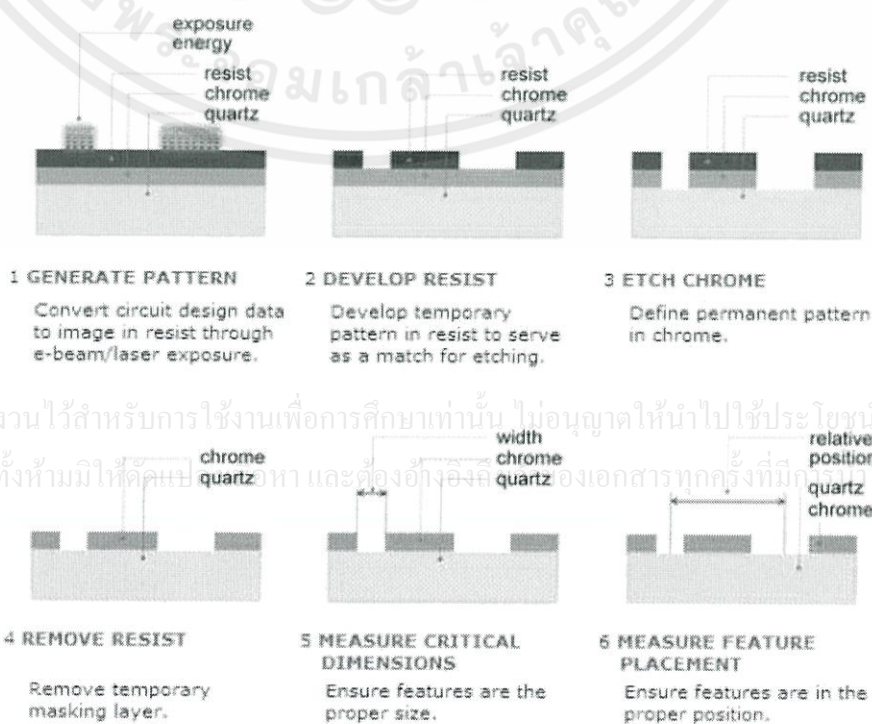
Resists for e-Beam and x-Rays

Resist	Type	X-Ray Sensitivity (mJ/cm ²)	20-keV e-Beam Sensitivity (μC/cm ²)
Naphthoquinonediazine/novolac	AZI450J	2100	40
Poly(methylmethacrylate)	PMMA	1800	80
Poly(hexafluorobutylmethacrylate)	FBM-120	35	0.5
Poly(butenesulfone)	PBS	14	2
Poly(glycidylmethacrylate)-co(ethylacrylate)	COP	5	0.6
Chlorinated poly(methylstyrene)	CPMS	8	0.4

2.3.3กระบวนการสร้างชิ้นงาน

1. สร้างมาร์ค
2. การถ่ายทอดลวดลาย
3. การล้างสาร Photoresist

2.3.3.1การสร้างมาร์ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

1. Generate pattern: สร้างรูปแบบ จากCircuit Design ลงในชั้นสารละลายด้วย E-beam หรือ Laser
2. Develop resist: ด้วยการเตรียมพร้อมก่อนการกัดด้วยสารละลาย
3. Etch chrome: เป็นการกัดแผ่นโลหะให้ได้ตามรูปแบบที่ต้องการอย่างถาวร
4. Remove resist: นำชั้นของสารละลายออกจากชิ้นงาน
5. Measure critical dimension: เป็นการตรวจสอบขนาดหลังการกัด
6. Measure feature placement: ตรวจสอบคุณลักษณะว่าเหมาะสมสำหรับการวางตำแหน่งในกระบวนการหน้า
7. Initial clean: ล้างผิวงานเพื่อกำจัดข้อบกพร่องที่ค้นพบ
8. Inspect for defects: ตรวจสอบว่าไม่เหลือสิ่งตกค้างที่เหลือจากการกัด
9. Repair ซ่อมแซมทุกส่วนบกพร่องที่พบเจอ
- 10.Pre-Pellicle clean: นำทุกอนุภาคออกให้หมดก่อนจะเริ่มกระบวนการลงชั้นป้องกัน
- 11.Apply pellicle: สร้างอนุภาคชั้นป้องกันเพื่อความมั่นใจว่าเป็นไปตามรูปแบบที่ถูกต้อง
12. Audit: ตรวจสอบความถูกต้องโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2การถ่ายทอดลวดลายด้วยแสง Optical printingลวดลายของวงจรมารถถ่ายทอดได้โดยแสง ซึ่งฟิล์มส่วนใหญ่จะเป็น Silica, Polysilican, Silicon nitride ,Silicidesand metals

Some Properties of Silicides of Interest^a

Silicide	Lowest Binary Eutectic Temperature (°C)	Specific Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)	TCE $\times 10^{-6}$ (deg ⁻¹)
CoSi ₂	900	10–18	10.14
HfSi ₂	1300	45–50	
MoSi ₂	1410	100	8.25
NbSi ₂	1295	50	8.4
NiSi ₂	966	50–60	12.06
Pd ₂ Si	720	30–35	
PtSi	830	28–35	
TaSi ₂	1385	35–45	8.8
TiSi ₂	1330	13–25	12.5
VSi ₂	1385	50–55	11.2
WSi ₂	1440	70	6.25
ZrSi ₂	1355	35–40	8.3

^aAdapted from Murarka [55].

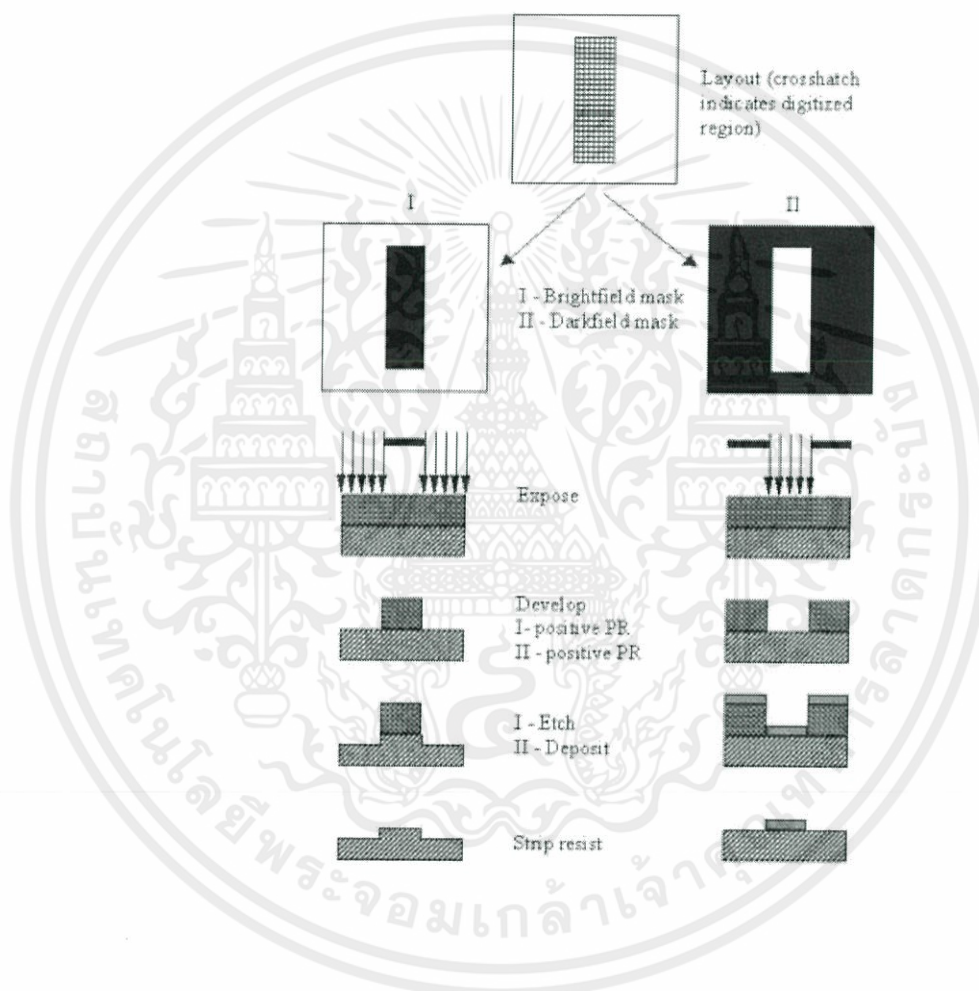
2.3.3.2การถ่ายทอดลวดลายด้วยแสง Optical printing

- แผ่นฐานรองที่ได้จาก กระบวนการ สร้างMask
- เคลือบสาร Photoresist ด้วยกระบวนการ Spincoatingที่ 3000-6000 rpmใช้เวลาประมาณ15-30วินาที
- Prebake ที่ประมาณ 90 Celsius
- การจัดตำแหน่ง Mask ด้วย Mask+Frame
- ฉายแสงด้วย UV หรือ soft X ray
- ล้างสารละลายเพื่อให้เกิดลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Postbake ที่ประมาณ 120°C
- กัดละลายของฟิล์ม
- ล้าง Photoresist ให้หมดด้วยสารละลาย

ขั้นตอนการถ่ายทอดลวดลาย



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการถ่ายทอดลวดลาย

2.3.3.3 การล้าง Photoresist ด้วยสารละลาย

-Positive Photoresist

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Acetone
- Trichloroethylene (TCE)

- Phenol-Based strippers(Indus-Ri-Chem J-100)
- Negative photoresist
- Methylene ketone (MEK)
- Methyl isobutyl (MIBK)

ใช้ส่วนผสมของ H_2SO_4 และ H_2O_2 ที่อัตราส่วน 1:1 ที่ อุณหภูมิ 150 °C

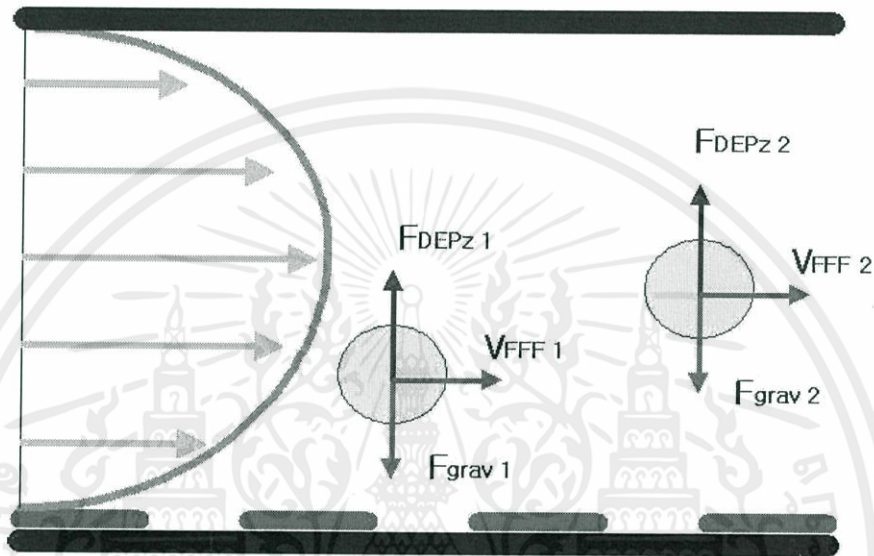


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 Dielectrophoresis



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงแรงที่กระทำต่ออนุภาคภายในช่อง channel [32]

DEP เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็น Polarized Dielectric ภายในช่องไหลที่เป็น Dielectric ผ่านสนามไฟฟ้าแบบ Non-uniform โดยแรง DEP จะขึ้นกับปริมาตรของอนุภาค, ความสามารถที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของประจุ, สนามไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า [8] [9]

$$\langle F_{DEP} \rangle = 2\pi\epsilon_m a^3 \text{Re} \left[f_{CM}(\omega) \right] \nabla |\vec{E}_{rms}|^2 \quad (1)$$

โดย $\langle \rangle$ หมายถึง Time-average operator, ϵ_m คือค่า Permittivity ของตัวกลาง, $\nabla |\vec{E}_{rms}|^2$ คือ Gradient ของกำลังสองของ Root mean square ของสนามไฟฟ้า และ

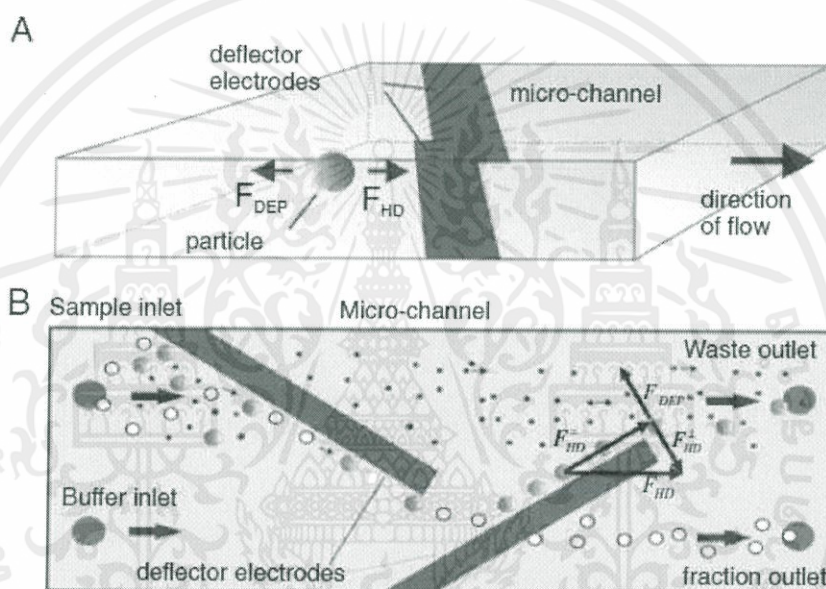
$$f_{CM}(\omega) = \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \text{เรียกว่า complex Clausius-Mossotti } \text{Re} \left[f_{CM}(\omega) \right] \text{เป็นส่วนของ Real}$$

part โดยจะมีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 1 ϵ_p และ ϵ_m คือ Complex permittivity ของอนุภาคและของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าตามลำดับ ตามสมการ $\underline{\epsilon} = \epsilon - \frac{\sigma}{\omega}i$ โดยที่ σ และ ϵ คือ Electric Conduction และ Electric Permittivity ตามลำดับ, $i = \sqrt{-1}$ และ $\omega = 2\pi f$ คือความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้า ถ้าอนุภาคมี

ความเป็นเชิงขั้วมากกว่าสารตัวกลาง $\text{Re}[f_{CM}(\omega)] > 0$ เรียกว่า pDEP คือ แรง DEP จะกระทำในทิศทางจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าน้อยไปยังที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ามาก แต่ถ้าสารตัวนำมีความเป็นขั้วมากกว่าอนุภาค $\text{Re}[f_{CM}(\omega)] < 0$ จะเรียกว่า nDEP คือ แรงจะกระทำจากที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ามากกว่าไปยังที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าน้อยกว่า[2]

3.2 MicroPrep design



รูปที่ 3.2 (A) ลักษณะโดยรวมของ Microprep (B) ทิศทางการเครื่องที่ของอนุภาค ในมุมมอง Top view

MicroPrep คืออุปกรณ์ DEP ที่มีการติดตั้งelectrode ให้ทำมุม 45-70 °[10]กับทิศทางการไหลของของไหลตามรูปที่ 3.2(A) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามการออกแบบโดยอนุภาคจะถูกควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ด้วยแรง 2 แรง คือ แรงไฮโดรไดนามิก(Hydrodynamic Friction Force) กับ แรง DEP โดยแรงไฮโดรไดนามิกเป็นฟังก์ชันของความหนืด, รูปทรง และความเร็วของอนุภาค ตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย μ คือ ความหนืดของของไหล และ v คือ ความเร็วของอนุภาค ซึ่งสมการที่ (2) เป็นสมการด้านการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางที่สวนทางกัน แต่เมื่ออนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงเนื่องจากแรง DEP จะทำให้ แรงไฮโดรไดนามิกมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$F_{HD} = F_{HD} \sin \alpha \quad (3)$$

โดยที่ α คือ มุมระหว่างอิเล็กโทรดกับผนัง และจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.2 (B)

3.3 Electrostatics

ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในของไหลถูกควบคุมโดย Governing Equation [2] สมการดังนี้

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho_e \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\sigma E) + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

โดยที่ ϵ คือ Permittivity ของของไหล, ρ_e คือ Free charge density, σ คือ Electric Conduction ของของไหล และ t คือ Time Coordinate โดยสนามไฟฟ้าหาจาก $E = -\nabla \phi$ โดยที่ ϕ คือ Electric Potential

3.4 Heat Transfer

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) คือการส่งถ่ายพลังงานซึ่งมีผลเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ในกรณีนี้จะไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นจากสมการ General Heat Transfer จะได้

$$\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (6)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่น, C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity), $\vec{u}$ คือ Fluid velocity และ k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เทอมของ $\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla T)$ หมายถึงการสะสมของพลังงานความร้อนในสสาร, $\nabla \cdot (k \nabla T)$ หมายถึงการนำความร้อน

ร้อนภายในสสาร และ Q คือพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ในสสาร โดยในที่นี้ $Q = \sigma \langle \vec{E}^2 \rangle$ หมายถึง พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Joule heating) ดังนั้นจะได้ว่า[11]

$$\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot [k_l(T) \nabla T] + \sigma \langle \vec{E}^2 \rangle \quad (7)$$

Joule Heating คือ ความร้อนที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าเป็นการผ่านกระแสไฟฟ้า (Electric Current) ไปยังของเหลวที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow) ทำให้อุณหภูมิและของเหลวใน Channel เกิดความร้อนด้วยอัตราเดียวกัน โดยค่า Joule Heating จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ายกกำลัง 2 และค่า Electric Conductivity ของของไหลที่นำมาทดลอง ค่า Conductivity หมายถึงค่าการนำไฟฟ้าของของไหล ซึ่งจะเกิดจาก ไอออนต่างๆ ทั้งหมดที่ละลายอยู่ในของไหลเมื่อค่าความกระด้างหรือค่าความเข้มข้นในของไหลมีค่าสูงค่า Electric Conductivity ก็จะมีค่าสูงไปด้วยโดยค่า Electric Conductivity จะเป็นค่าที่คิดจากไอออนโดยรวมของของไหล

ทำการแปลงให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ(Dimensionless Parameters)โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \bar{\vec{u}} &= \frac{\vec{u}}{U_{ref}} & \bar{\mu} &= \frac{\mu(T)}{\mu_{ref}} & \bar{\vec{E}} &= \frac{\vec{E}}{E_0} & \bar{k}_l &= \frac{k_l(T)}{k_{ref}} \\ \bar{T} &= \frac{T - T_{ref}}{T_0 - T_{ref}} & \text{Pr} &= \frac{\mu_{ref}}{k_{ref} / c_p} \\ \text{Re} &= \frac{\rho H U_{ref}}{\mu_{ref}} & \text{Jo} &= \frac{H^2 \sigma_0 E_0^2}{k_{ref} (T_0 - T_{ref})} \end{aligned}$$

เมื่อ T_{ref} เป็นอุณหภูมิที่น้ำเดือด, k_{ref} เป็นค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิอ้างอิง [12] การนำความร้อนและอุณหภูมิตามลำดับ, Pr คือ Prandtl Number, Re คือ Reynolds number, H คือ Hydraulic diameter, T_0 คืออุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า 25°C และ Jo ถูกเรียกว่า Joule number แสดงถึงความสำคัญของ Joule heating ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความร้อนจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในของไหลต่อการพาความร้อนของของไหล ณ จุดอ้างอิง เพราะฉะนั้นเราจะได้สมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameters)[10] ดังนี้

$$\text{Re Pr} [\bar{\vec{u}} \cdot \nabla \bar{T}] = \nabla \cdot (\bar{k}_l \nabla \bar{T}) + \text{Jo} |\bar{\vec{E}} \cdot \bar{\vec{E}}| \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ในเทอมของการพาความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับค่า Re และ Pr เมื่อพิจารณาของไหลใน Channel ทำการวิเคราะห์หาค่า Re พบว่ามีค่าประมาณ 0.04 ซึ่งทำให้เทอมของการพาความร้อนมีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นเราจะได้สมการดังนี้

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma \langle \vec{E}^2 \rangle = 0 \quad (9)$$

3.5 Flow Field

สมการ Navier-Stokes นั้นเป็นกรณีเฉพาะของสมการการไหล สมมุติฐานที่ถูกใช้ในที่นี่คือของไหลเป็นของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluid) ค่าความหนืดคงที่ และค่าความหนาแน่นคงที่ [2] ในการไหลแบบอุณหภูมิต่ำ ค่าความหนืดและความหนาแน่นจะไม่คงที่ เพราะค่าสองค่านี้เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ นั่นคือสมการ Navier-Stokes จะใช้ไม่ได้ในกรณีนี้ ในกรณีที่ความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมากในระบบ ค่าแรงลอยตัว (Buoyant Forces) จะต้องนำมาคิดด้วย การประมาณค่าความหนาแน่นนั้น ดังสมการนี้

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \eta (\nabla^2 \vec{u}) + \vec{f} \quad (10)$$

โดยที่ p คือความดัน, η คือความหนืดของของไหล (The Dynamic Viscosity of the Fluid) , ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล และ $\vec{u}$ คือ ความเร็วของของไหล โดยแต่ละเทอมในสมการมีดังต่อไปนี้ $\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right)$ คือแรงเฉื่อย (Inertia Force), $-\nabla p$ คือ Pressure Gradient , $\eta (\nabla^2 \vec{u})$ คือ แรงหนืด (Viscosity) และ $\vec{f}$ คือเทอมของแรงภายนอกต่อหน่วยมวล (Body Force)

เนื่องจากระบบการไหลเป็นแบบ Steady State และมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับของไหล จึงได้สมการดังนี้ [33]

$$\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \eta (\nabla^2 \vec{u}) + \vec{f}_e \quad (11)$$

โดยที่ $\vec{f}_e$ จะเป็นแรงจากสนามไฟฟ้าที่ทำการทำกับของของไหลเท่ากับ $\vec{f}_e$ คือ Electrothermal force มีสมการดังต่อไปนี้ [3]

$$f_e = -0.5 \left[\left(\frac{\nabla \sigma}{\sigma} + \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) \cdot E \frac{\varepsilon E}{1 + (\omega \tau)^2} + 0.5 |E|^2 \nabla \varepsilon \right] \quad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

เมื่อ σ เป็น Conductivity, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ เป็นสมการค่า permittivity ของของไหล, ω คือ ความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้า และ τ คือสัดส่วนระหว่างค่า ε กับค่า σ และ E เป็นค่าแอมพลิจูดของ สนามไฟฟ้าในกระแส AC จาก Joule heating ε และ σ ขึ้นอยู่กับ T ดังนี้

$$\nabla \varepsilon = (\partial \varepsilon / \partial T) \nabla T$$

$$\nabla \sigma = (\partial \sigma / \partial T) \nabla T$$

สำหรับน้ำจะได้ว่า $(1/\varepsilon)(\partial \varepsilon / \partial T) \nabla T = -0.004 \text{ K}^{-1}$ และ $(1/\sigma)(\partial \sigma / \partial T) \nabla T = 0.02 \text{ K}^{-1}$

แทนค่าในสมการ(8)จะได้

$$f_c = -0.5 \left[(0.016 \text{ K}^{-1}) \nabla T \cdot E \frac{\varepsilon E}{1 + (\omega \tau)^2} + 0.5 |E|^2 (-0.004 \text{ K}^{-1}) \nabla T \right] \quad (13)$$

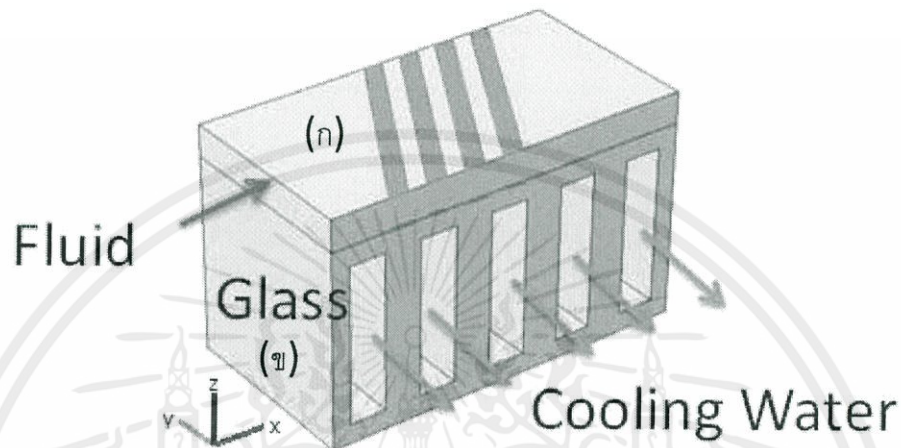


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

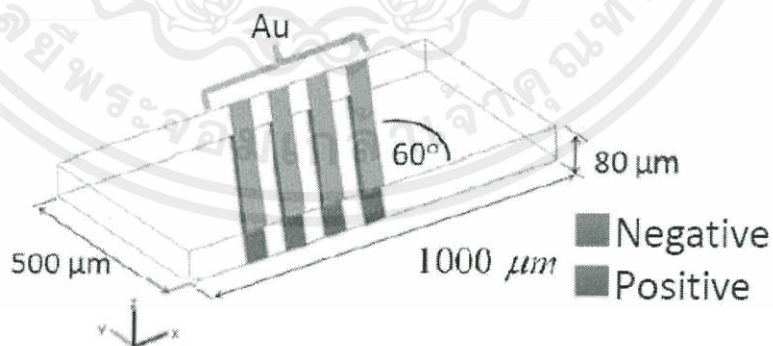
การออกแบบการคำนวณ

4.1 Device Configuration



รูปที่ 4.1 โมเดลที่ใช้ใน Simulation

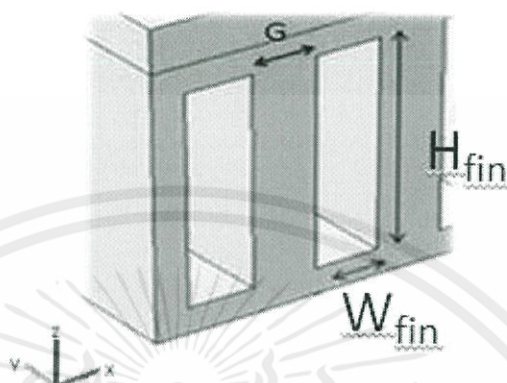
(ก) คือ Channel ของของไหล จะมีเส้นทางของของไหลทดสอบไหลตามแนวแกน X จะมีทางเข้าตามลูกศรสีแดงและ (ข) คือส่วนฐานแก้วที่ติดครีปโดยจะมีเส้นทางไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนตามแนวแกน Y โดยจะมีทางออกตามลูกศรสีฟ้าโดยน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นมีอุณหภูมิที่ 4°C



รูปที่ 4.2 ขนาดของ DEP channel ที่มี electrodes ทำมุมที่ 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะประกอบด้วย Electrode โดยขั้วลบจะอยู่ด้านบน (สีน้ำเงิน) ขั้วบวกจะอยู่ด้านล่าง (สีน้ำเงิน) และ มีความกว้าง $50\mu m$ และทำมุม 60° กับแกน X มีความยาวช่องระหว่าง Electrode $50\mu m$ และทำมุม 60° กับแกน x



รูปที่ 4.3 รายละเอียดของครีบบรรบายความร้อน

กำหนดให้ W_{fin} คือ ความกว้างของช่องว่างระหว่างครีบ H_{fin} คือ ความสูงของครีบ และ G คือ ความกว้างของครีบ ในการคำนวณจะทำการหาความสัมพันธ์ของ W_{fin} คือ ความกว้างของช่องว่างระหว่างครีบ, H_{fin} คือ ความสูงของครีบและจำนวนครีบว่ามีผลต่ออุณหภูมิที่ลดลง

4.2 Boundary conditions

ทำการแบ่ง Boundary conditions ดังต่อไปนี้

Domain1: ของไหลใน Channel (จากรูปที่ 4.4);

Inlet: $\dot{m} = 6\mu g/s$, $T_0 = 298.15 K$, $n \cdot J = 0$

Outlet: $P = 0$, $-n \cdot (-k \nabla T) = 0$, $n \cdot J = 0$

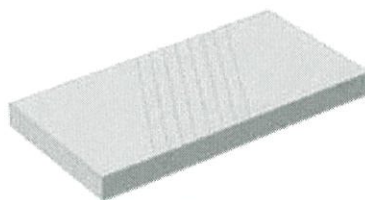
Wall: $u = 0$, $-n \cdot (-k \nabla T) = 0$, $n \cdot J = 0$

Side wall: $K - (K \cdot n)n = 0$, $K = [\mu(\nabla u + (\nabla n)^T)]n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $Z = 0\mu m$ (at Electrode): $u = 0$, $-n \cdot (-k \nabla T) = 0$, $V = \text{Positive Voltage}$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = 80 \mu m (\text{at electrode}): u = 0, -n_u \cdot (-k_u \nabla T_u) - n_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = 0,$$

$V = \text{Negative Voltage}$



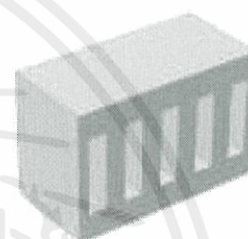
รูปที่ 4.4 โดเมนที่ 1

Domain 2: ฐานของอุปกรณ์ (จากรูปที่ 4.5);

External Wall: Thermal Insulate

Wall $z = 0$: $T = 298.15 \text{ K}$

Wall $z = 500 \mu m$, $-n \cdot (-k \nabla T) = 0$



รูปที่ 4.5 โดเมนที่ 2

Domain 3: น้ำหล่อเย็น (จากรูปที่ 4.6);

Inlet: $u_0 = 3000 - 7000 \mu m/s$, $T_0 = 277.15 K$

Outlet: $P = 0$, $-n \cdot (-k \nabla T) = 0$

Wall: $u = 0$



รูปที่ 4.6 โดเมนที่ 3

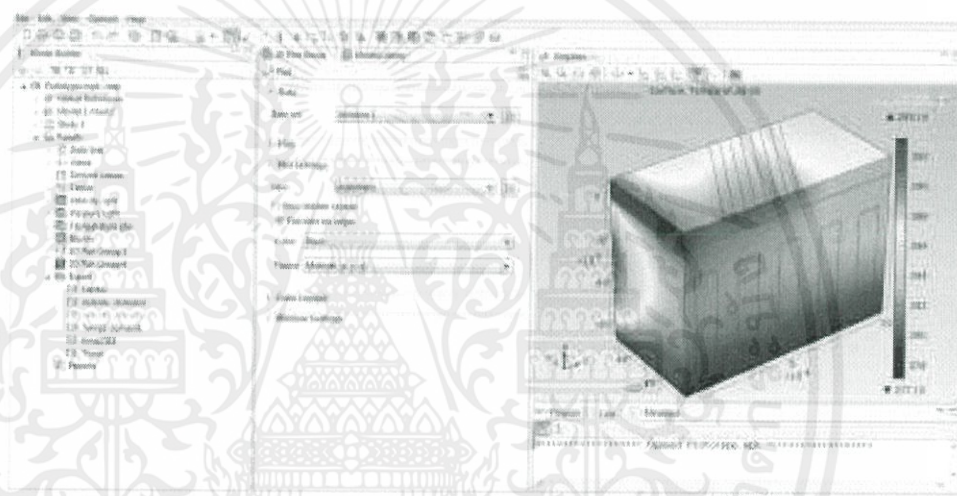
4.3 กระบวนการวิเคราะห์

ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เลือกฟิสิกส์คือ Laminar Flow, Joule Heating โดย COMSOL Multiphysics เป็นโปรแกรมสำหรับวิศวกรที่มีไว้เพื่อทำงานทางด้านการคำนวณและจำลองการออกแบบงานทางวิศวกรรมศาสตร์ ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method , FEM) เปรียบวิธี FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่ง สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบและใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อจะแก้สมการ ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) และ เอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วย

จุดต่อ (node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละ เอลิเมนต์บน โดเมนจากนั้นจึงแก้ระบบสมการดังกล่าว ซึ่งจะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมนนั้น

ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีFEM

- 1) แบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย
- 2) สร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากสมการควบคุม
- 3) นำสมการจากทุกเอลิเมนต์มารวมเป็นระบบสมการFEM ซึ่งเป็นระบบสมการเชิงเส้น
- 4) ให้เงื่อนไขขอบเขต
- 5) แก้ระบบสมการ ซึ่งจะได้ผลเฉลยที่จุดต่อบนโดเมน



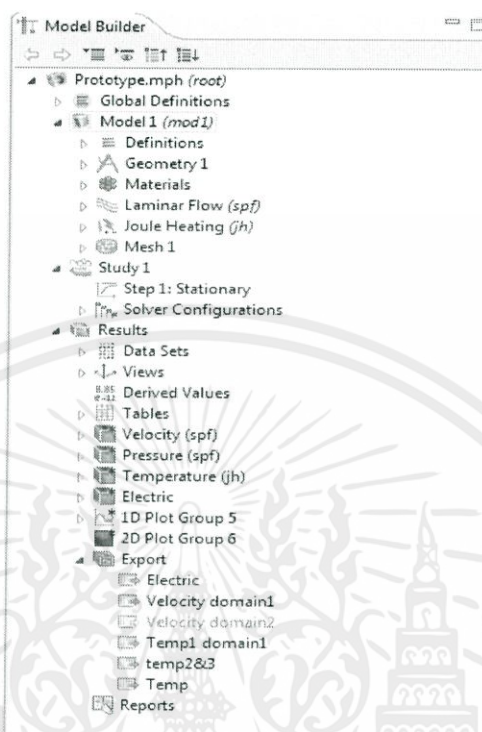
รูปที่ 4.7 ภาพภายในโปรแกรม COMSOL Multiphysics

4.3.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม COMSOL Multiphysics

- Global Definitions : ใช้ประกาศตัวแปรหรือฟังก์ชัน หรือ ค่าคงที่ต่างๆ
- Model : หน้าต่างสำหรับสร้างโมเดลและในค่าต่างๆทางฟิสิกส์
 - Definition : ใช้ประกาศค่าคงที่ ฟังก์ชัน กลุ่มของโดเมนที่ใช้ในแต่ละModel
 - Geometry : ใช้สำหรับวาดรูปโมเดลต่างๆ
 - Material ; ใช้สำหรับการกำหนดโดเมนให้เป็นวัสดุต่างๆ
 - Laminar Flow : เป็นฟิสิกส์ที่ใช้ในการคำนวณ
 - Joule Heating:เป็นฟิสิกส์ที่ใช้ในการคำนวณ
 - Mech : ใช้สำหรับการกำหนด Element และ Node เพื่อใช้คำนวณ
 - Model : หน้าต่างสำหรับสร้างโมเดลและในค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ออกไป และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Study : รูปแบบของการคำนวณ
- Result : หัวข้อสำหรับแสดงผลการคำนวณ

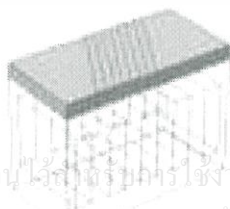


รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบของโปรแกรม COMSOL Multiphysic

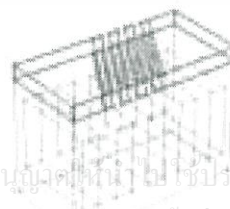
4.3.2 Grid independent check

Grid independent check เป็นกระบวนการตรวจสอบว่าคำตอบที่โปรแกรมคำนวณออกมามีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอที่จะเชื่อถือได้ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบข้อมูล ณ จุดๆ หนึ่งของคำตอบที่ได้จากการกำหนด Grid ที่แตกต่างกัน 2 ขนาด เมื่อลดระดับ Grid ของทั้ง 2 ลงจะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างลดลง โดยคำตอบที่เชื่อถือได้ควรได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่ควรเกิน 1 %

ด้วยมีการกำหนด Grid independent checkดังต่อไปนี้

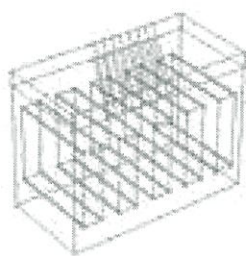


รูปที่ 4.9 Local element 1

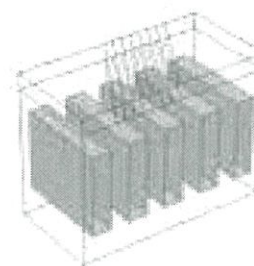


รูปที่ 4.10 Local element 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



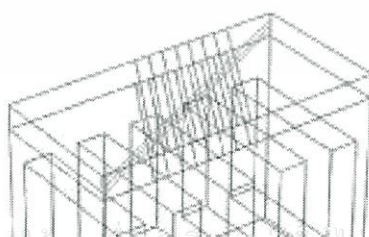
รูปที่ 4.11 Local element 3



รูปที่ 4.12 Local element 4

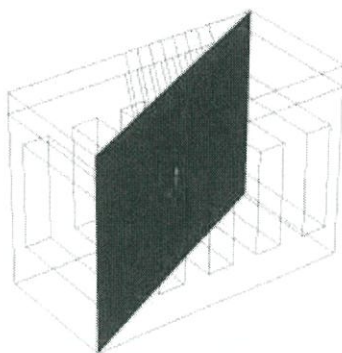
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์ความแตกต่าง ระหว่างแต่ละ Element size

No.	Element size (micrometer)	%error Domain1			Domain 2&3	
		ความเร็ว	อุณหภูมิ	สนามไฟฟ้า	อุณหภูมิ	ความเร็ว
1	25 : 8 : 6.4 : non : non	-	-	-	-	-
2	19.2 : 8 : 6.4 : non : non	0.322196	0.0216	0.45281	0.01596	8.44
3	15.3 : 8 : 6.4 : non : non	0.204914	0.0143	0.13612	0.011247	4.38
4	15.3 : 8 : 6.4 : 5 : 8	0.206469	0.02042	0.2017	0.013413	3.49
5	15.3 : 8 : 6.4 : non : 7	0.19432	0.01546	0.15399	0.0138	2.3793
6	15.3 : 8 : 6.4 : 1 : 7	0.06654	0.00877	0.03194	0.006152	2.015387
7	15.3 : 8 : 6.4 : 0.8 : 7	0.05439	0.00015	0.04815	0.000251	1.156024



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 เส้นของชุดข้อมูลที่จะใช้ตรวจสอบความเร็ว และ สนามไฟฟ้าของโดเมนที่ 1



รูปที่ 4.11 ระนาบของข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบอุณหภูมิของโดเมนที่ 2 และ 3



รูปที่ 4.15 ระนาบของข้อมูลที่จะใช้ตรวจสอบอุณหภูมิโดยจะดึงข้อมูลมาเฉพาะโดเมนที่ 3

ภาพข้างบนแสดงตำแหน่งของข้อมูลที่จะมาใช้ในการตรวจสอบของแต่ละโดเมน โดยโดเมนที่ 1 จะตรวจสอบความถูกต้องของสนามไฟฟ้า, ความเร็วของของไหล และอุณหภูมิ โดเมนที่ 2 จะตรวจสอบอุณหภูมิ และโดเมนที่ 3 จะตรวจสอบความเร็วและอุณหภูมิ จากตารางกำหนดขนาดของ Element ในระดับไมโครเมตร โดยเลขตัวแรกหมายถึง Global Element และเลข 4 ตัวถัดมาคือ Local Element ตามลำดับ จากตาราง Element size ชุดที่ 2 พบว่าค่าความผิดพลาดของความเร็วในโดเมนที่ 3 มีความผิดพลาดถึง 8% ดังนั้นจึงเพิ่ม Local Element ที่ 4 เพื่อลดความผิดพลาดลง ใน Element set ที่ 4 ให้ความผิดพลาดลดลงเป็นอย่างมาก สามารถลดได้ 4.95 % ดังนั้นจึงลดขนาดของ Local Element 4 ลงทำให้ได้ขนาดของความผิดพลาดที่ยอมรับได้เป็น 1.15 % ที่ Element size 7 ดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

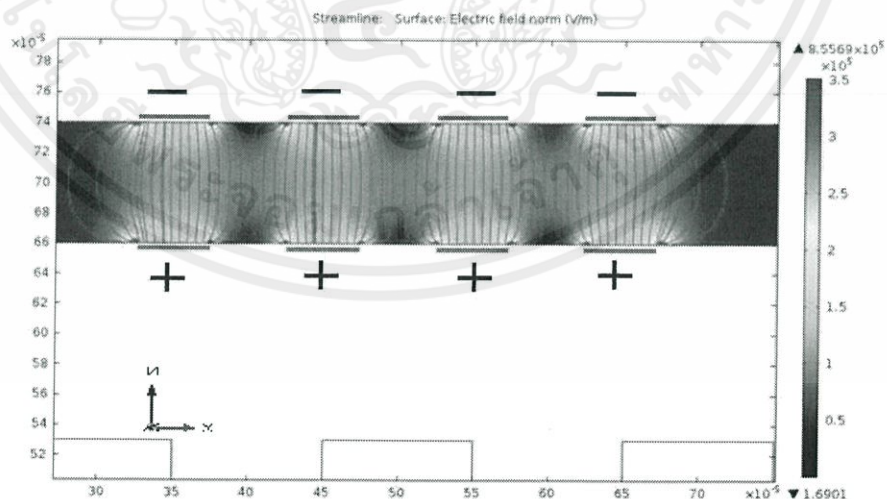
บทสรุปและผลวิจารณ์

5.1 สรุปผล

5.1.1 Electric field

สนามไฟฟ้าเป็นแบบ Uniform Electric Field จากขั้วบวกไปยังขั้วลบ โดยจะเห็นว่าสนามไฟฟ้ามีความเข้มข้นสูงในบริเวณขอบของElectrode เพราะธรรมชาติของประจุจะไปรวมกันในบริเวณที่เป็นปลายแหลม ทำให้ในบริเวณดังกล่าวเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 27 โดยนำข้อมูลจากระนาบxzที่ $Y=250\text{ }\mu\text{m}$ มาพิจารณา

รูปที่ 5.1 ระนาบ xz ที่ $y=250\text{ }\mu\text{m}$

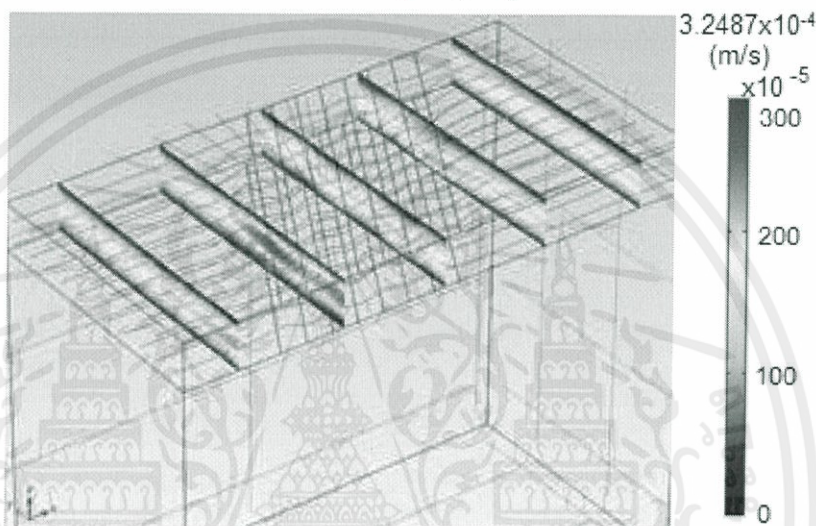


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 5.2 แสดงถึงทิศทางของสนามไฟฟ้าในchannelในกรณีแผ่นElectrode วางในแนว
เดียวกัน

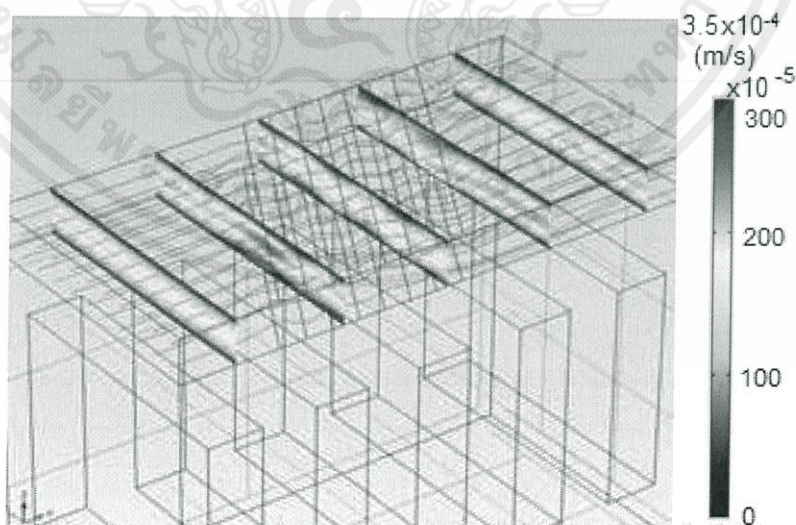
จากรูปพบว่าในบริเวณของขอบของElectrode จะมีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.556×10^5 V/m และมีการกระจายของสนามไฟฟ้าออกทางด้านข้าง อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามแกน X จะพบว่าอนุภาคตัดผ่านสนามไฟฟ้าแบบnon-uniform ทำให้เกิดแรงDEPกระทำต่ออนุภาค

5.1.2 Fluid Dynamic

ภายในช่องChannelของไหลไหลแบบLaminar Flow ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 6 $\mu\text{g/s}$ ผ่านสนามไฟฟ้าจึงเกิดJoule Heating ทำให้ของไหลอุณหภูมิสูงขึ้น



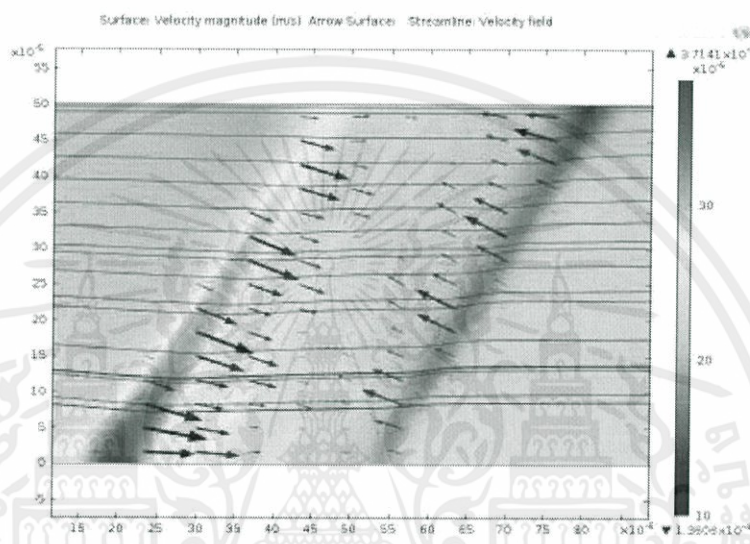
รูปที่ 5.3ภาพแสดงการไหลของของไหลในChannel ในกรณีที่ไม่ได้คิดอธิบายความร้อน



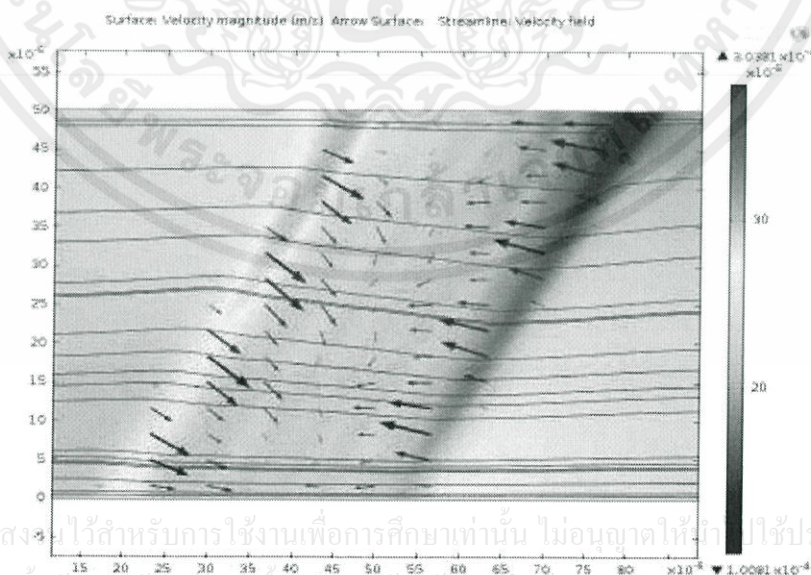
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4แสดงการไหลของของไหลภายในChannel ในกรณีที่คิดอธิบายความร้อน

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 พบว่าของไหลไหลเข้าภายในChannel เป็นแบบFully developed flow คือจะมีVelocity profile เป็นพาราโบลาโดยจะมีความเร็วสูงสุดในช่วงกลางของChannel แต่เมื่อไหลผ่านบริเวณของElectrode จากรูปพบว่าของไหลมีความเร็วสูงขึ้นและมีStream line ที่แปลกไปเนื่องจากElectrothermal force



รูปที่ 5.5 แสดงการไหลของของไหลภายในChannel บนระนาบXY ที่ $z=540 \mu\text{m}$ (บริเวณตรงกลางของChannel) ในกรณีที่ไม่มีติดครีบบระบายความร้อน

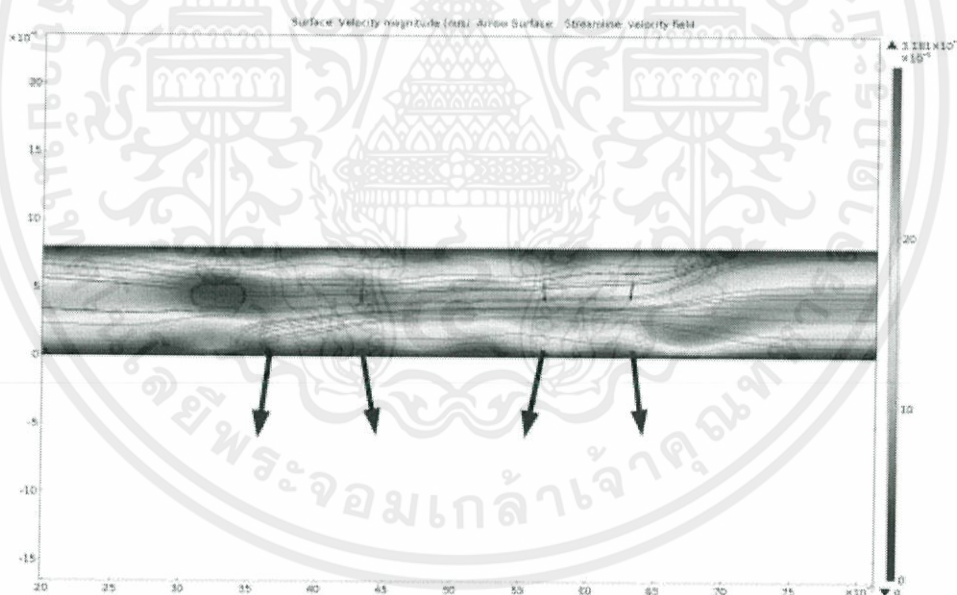


รูปที่ 5.6 แสดงการไหลของของไหลภายในChannel บนระนาบXY ที่ $z=540 \mu\text{m}$ (บริเวณตรงกลางของChannel) ในกรณีที่ติดครีบบระบายความร้อน

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 เมื่อของไหลไหลเข้าสู่บริเวณของ Electrode ซึ่งเป็นบริเวณสนามไฟฟ้าที่เข้มข้นทำให้มีอุณหภูมิสูง ทำให้มี Electrothermal Force เกิดขึ้นโดยแรงดังกล่าวจะกระทำต่ออนุภาคของของไหล โดยเมื่อของไหลไหลเข้าสู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าแรง Electrothermal จะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับของไหลเนื่องจากสมการของ Electrothermal Force ขึ้นกับ Temperature Gradient ตามสมการ

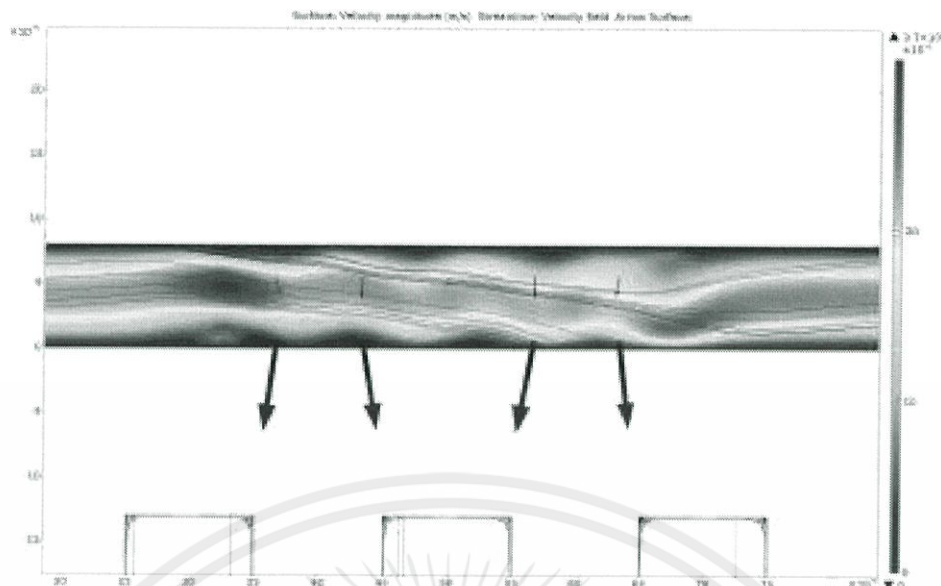
$$f_e = -0.5 \left[(0.016 \text{ K}^{-1}) \nabla T \cdot E \frac{\epsilon F}{1 + (\omega \tau)^2} + 0.5 |E|^2 (-0.004 \text{ K}^{-1}) \nabla T \right]$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลเปลี่ยนจากอุณหภูมิต่ำไปยังอุณหภูมิสูง ทำให้ Temperature Gradient มีค่าติดลบ ทำให้แรง Electrothermal มีทิศทางเดียวกับของไหลทำให้ในขณะที่ของไหลมีความเร็วมากขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อของไหลไหลออกจากบริเวณของ Electrode อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปมาก ทำให้ Temperature Gradient มีค่าเป็นบวกแรง Electrothermal จึงมีทิศตรงกันข้ามกับของไหลทำให้ในขาออกของไหลมีความเร็วลดลง



รูปที่ 5.7 แสดงการไหลของของไหลภายใน Channel บนระนาบ xz ในกรณีที่ไม่มีติดครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

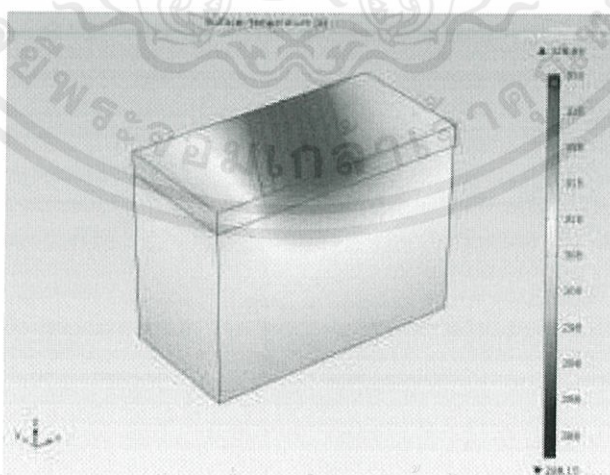


รูปที่ 5.8 แสดงการไหลของของไหลภายในChannel บนระนาบ xz ในกรณีที่ติดครีบ

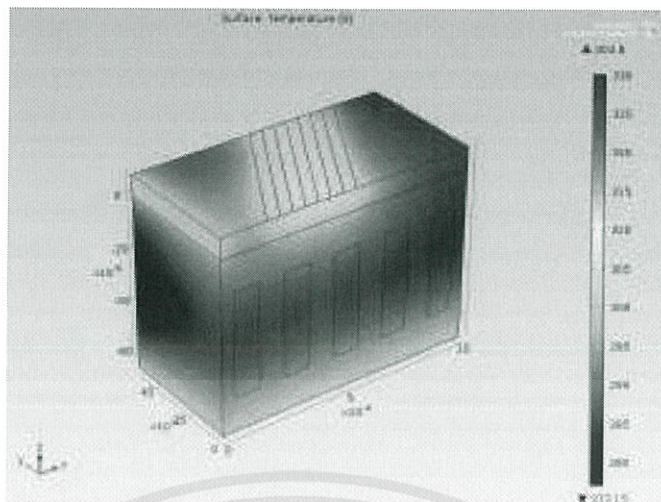
จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าแรง Electrothermal จะมีทิศทางลงเนื่องจาก Temperature Gradient ตามแนวแกน z มีค่าเป็นบวกเพราะในบริเวณ Electrode มีสนามไฟฟ้าเข้มข้นกว่าอุณหภูมิจึงสูงกว่า

5.1.3 Temperature field

ของไหลไหลเข้าใน Channel ด้วยอุณหภูมิคงที่คือ 25°C จากนั้นไหลผ่านสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแผ่น Electrode ที่วางขนานกันทำให้เกิด Joule Heating ส่งผลให้อุณหภูมิของของไหลสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.9 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์ DEP ในกรณีที่ไม่มีติดครีบระบายความร้อน

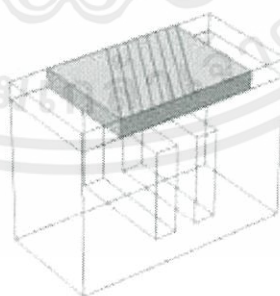


รูปที่ 5.10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอุปกรณ์ DEP ในกรณีที่ไม่มีการระบายความร้อน

จากรูปจะเห็นว่าในบริเวณ Electrode เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเพราะเกิด Joule Heating ในกรณีที่ไม่มีกระบวนการระบายความร้อนด้วยครีระบายความร้อน อุณหภูมิจะเกิดการสะสมจนสูงถึง 53°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เซลล์บางชนิดไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ แต่ถ้ามมีการติดครีระบายความร้อนเพื่อลดผลกระทบของ Joule Heating ทำให้อุณหภูมิลดลงซึ่งในกรณีนี้จะสามารถลดได้ถึง 20°C คิดเป็น 57.57%

5.2 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ลดลง

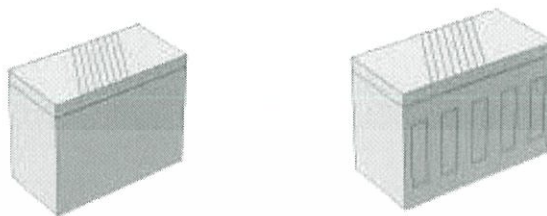
ต่อไปเป็นการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อการระบายความร้อน โดยข้อมูลที่น่าสนใจ วิเคราะห์จะนำมาจากบริเวณสีฟ้า ดังรูป



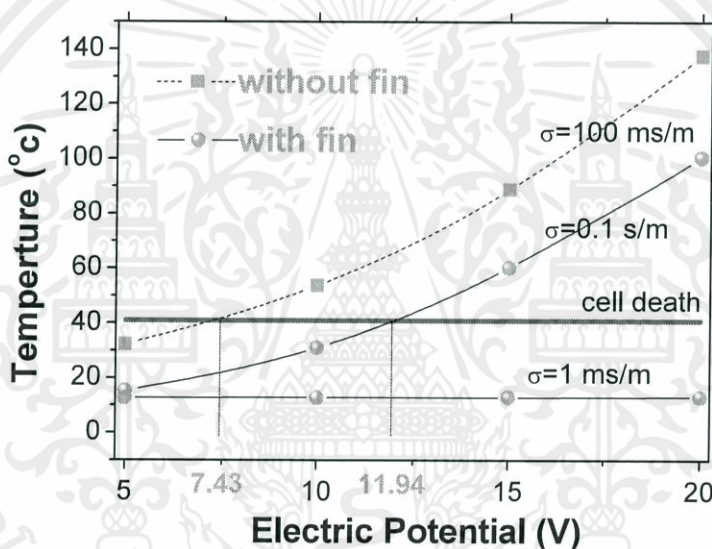
รูปที่ 5.11 บริเวณที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี 5.2.1 อธิบายถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก Joule Heating เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับ electric conductivity และ ความต่างศักย์ไฟฟ้า เราจึงทำการวิเคราะห์ผลของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ electric conductivity ค่าๆหนึ่ง โดยเปรียบเทียบระหว่างไม่ติดครีและติดครีดังรูปที่ 5.10 จากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุด ณ บริเวณที่พิจารณา กับความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 5.12 โมเดลที่ไม่ติดครีและติดครี



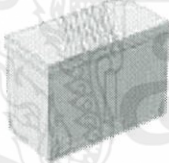
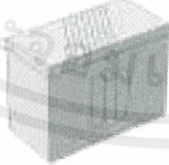
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ โดยเปรียบเทียบในกรณีที่ไม่ติดครี ระบายความร้อนและไม่ติดครีระบายความร้อน

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อติดครีระบายความร้อนจะทำให้เพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยที่ $\sigma = 0.1 \text{ S/m}$ สามารถเพิ่มความต่างศักย์ได้มากถึง 60.69 % ซึ่งความต่างศักย์ที่มากจะช่วยให้การแยกสารทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น จากกราฟจะพบว่านอกจากติดครีเพื่อระบายความร้อนแล้วเรายังสามารถเจือจางสารเพื่อลดค่า Electric Conductivity ทำให้สามารถเพิ่มความต่างศักย์ได้มากขึ้น แต่เซลล์บางชนิดไม่สามารถใช้วิธีการดังกล่าวได้ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

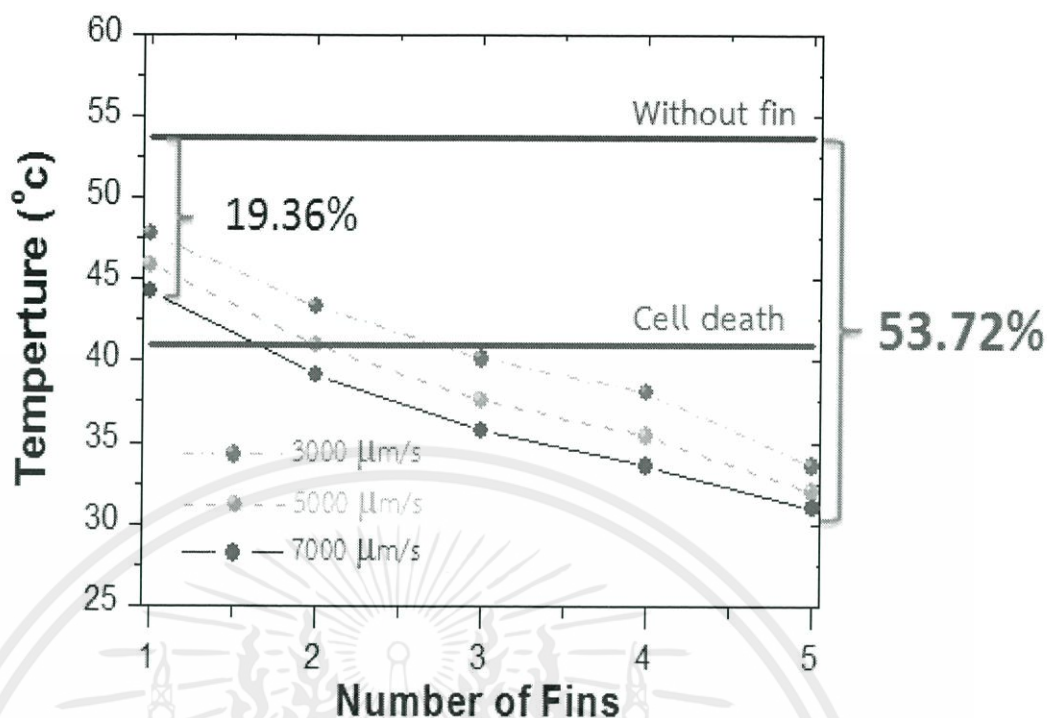
5.2.2 อิทธิพลของจำนวนครีและความเร็วของน้ำหล่อเย็นต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel

ต่อไปแสดงกราฟของอุณหภูมิบริเวณ Electrode เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลหล่อเย็นและจำนวนครีภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10V และ $\sigma = 0.1$ S/m โดยเอาค่ามาจากบริเวณในพื้นที่สีน้ำเงินของระบบจากรูปที่ 36 และโมเดลตามตารางที่ 5.1 และกำหนดให้รูปร่างของโมเดลเป็นไปตามตารางดังนี้

ตารางที่ 5.1 ภาพโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนครีและความเร็วของน้ำหล่อเย็นต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel

Number Fin	$W_{fin}=100$	Number Fin	$W_{fin}=100$
0		3	
1		4	
2		5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสูงสุดกับจำนวนครีบในแต่ละความเร็วของน้ำหล่อเย็น

จากกราฟจะพบว่าที่ความเร็วของน้ำหล่อเย็น $7000 \mu\text{m/s}$ ถ้าติดครีบระบายความร้อน 1 ครีบอุณหภูมิสูงสุดจะลดลงจากในกรณีที่ไม่มีติดครีบ 19.36% แต่ถ้าเพิ่มจำนวนครีบระบายความร้อนเป็น 5 ครีบ อุณหภูมิสูงสุดจะลดลง 53.72% เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของของไหลโดยการเปลี่ยนความเร็วของน้ำหล่อเย็นจะพบว่า ที่ความเร็ว $3000 \mu\text{m/s}$ กับที่ความเร็ว $7000 \mu\text{m/s}$ มีความแตกต่างกัน 9.97% ในทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $5000 \mu\text{m/s}$ กับ $7000 \mu\text{m/s}$ มีความแตกต่างกัน 4.3%

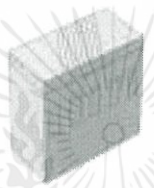
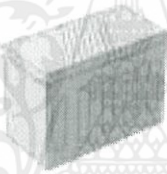
นอกจากความเร็วของของไหลหล่อเย็นและจำนวนของครีบแล้วลักษณะของครีบระบายความร้อนก็มีผลต่อการระบายความร้อนด้วย เราจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างของครีบที่มีผลต่อการระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

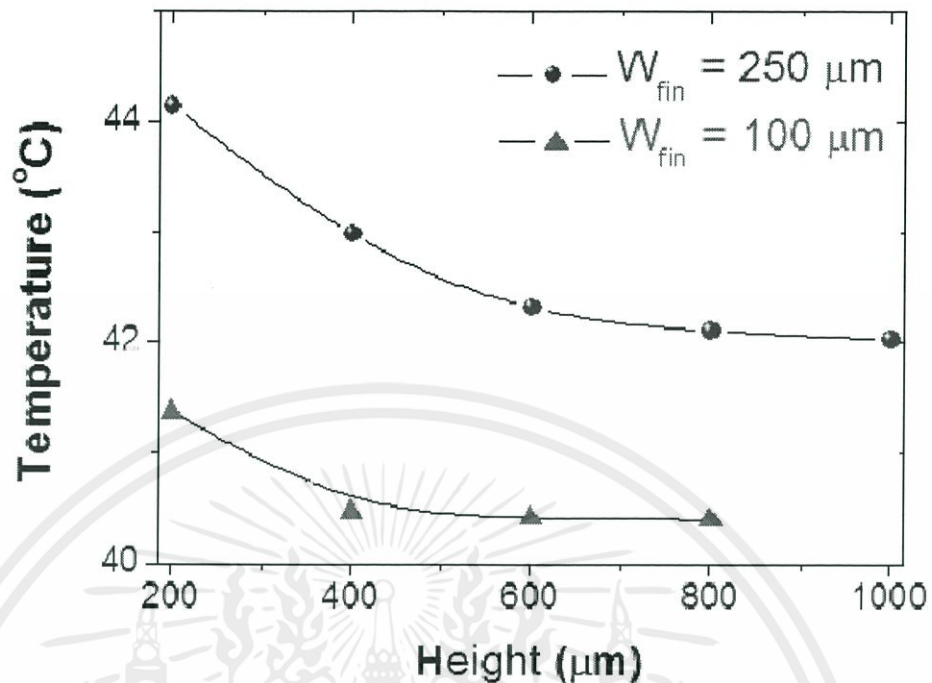
5.2.3 อิทธิพลของความสูงของครีปที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลในChannel

วิเคราะห์ผลของความสูงที่มีผลต่อการระบายความร้อนโดยมีการกำหนดให้ มีค่า $\sigma = 0.035$ S/m ความต่างศักย์เท่ากับ 20 V โดยมีการกำหนดโมเดลในการเปรียบเทียบตามตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของความสูงของครีปที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลในChannel

$H_{fin}(\mu m)$	$W_{fin}=100\mu m$	$W_{fin}=250\mu m$
200		
400		
600		
800		
1000		

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

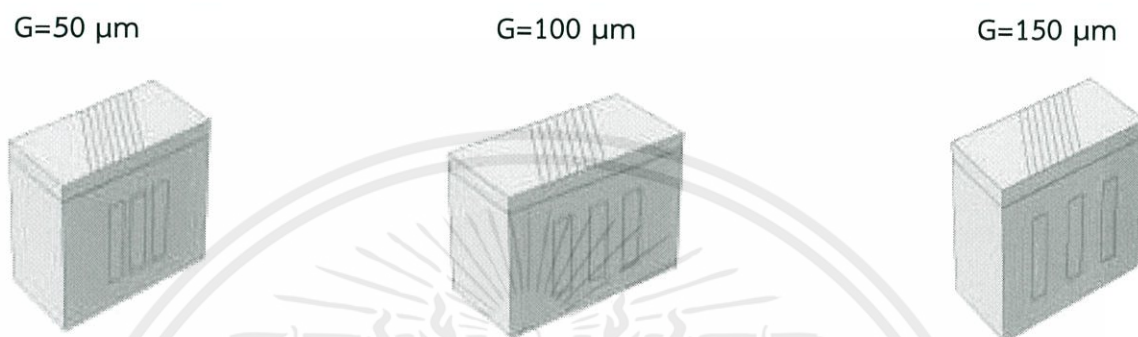


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและความสูงที่เปลี่ยนไปที่ความกว้างของครีบ $100 \mu\text{m}$ และ $250 \mu\text{m}$

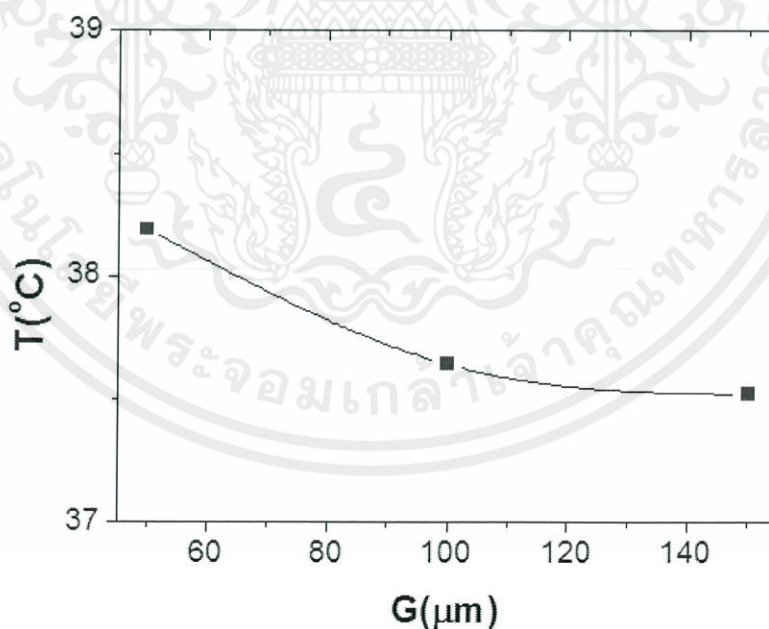
จากรูปที่ 5.15 จะพบว่าเมื่อความสูงของครีบเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะลดลง โดยอุณหภูมิจะลู่เข้าค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อความยาวของครีบระบายความร้อนลู่เข้าค่าๆหนึ่ง จากกราฟจะเห็นว่าที่ความกว้าง $100 \mu\text{m}$ อุณหภูมิจะลู่เข้าค่าคงที่ที่ความสูง $400 \mu\text{m}$ และที่ความกว้าง $250 \mu\text{m}$ อุณหภูมิจะลู่เข้าค่าคงที่ที่ความสูง $1000 \mu\text{m}$ ดังนั้นสามารถประมาณค่าความสูงต่อความกว้างที่ทำให้อุณหภูมิลู่เข้าได้ประมาณ 4 เท่า

5.2.4 อิทธิพลของความกว้างครีปที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลในChannel

วิเคราะห์ผลของความกว้างที่มีผลต่อการระบายความร้อนโดยมีการกำหนดให้ มีค่า $\sigma = 0.035$ S/m ความต่างศักย์เท่ากับ 20 V โดยมีการกำหนดโมเดลในการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.14 ดังนี้



รูปที่ 5.16 แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของความกว้างครีปที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งรูปที่ 5.17 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิสูงสุดกับระยะความกว้างครีป ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.17 เมื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเมื่อเปลี่ยนระยะ Gap ระหว่าง ระยะ 50 μm กับ 100 μm มีค่าประมาณ 1.4% และในระหว่าง 100 μm กับ 150 μm เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเป็น 0.31 % ดังนั้นระยะของ Gap มีผลต่อการระบายความร้อนน้อยมาก

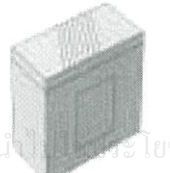
5.2.5 อิทธิพลของความกว้างระหว่างครีและ Joule Number ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel

สามารถแสดงผลของ Joule Heating ให้อยู่ในรูปของ Joule Number ตามสมการดังนี้

$$Jo = \frac{H^2 \sigma_0 E_0^2}{k_{ref} (T_0 - T_{ref})}$$

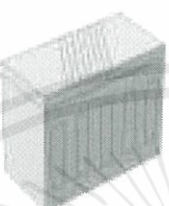
ซึ่ง Joule Number (Jo) จะเป็นฟังก์ชันของ Electric Conductivity และ ความต่างศักย์ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของความกว้างระหว่างครีที่มีผลต่อการระบายความร้อนโดยมีการกำหนดโมเดลในการเปรียบเทียบตามตารางที่ 5.3 จะได้กราฟดังนี้โดยมีการกำหนด model ดังนี้

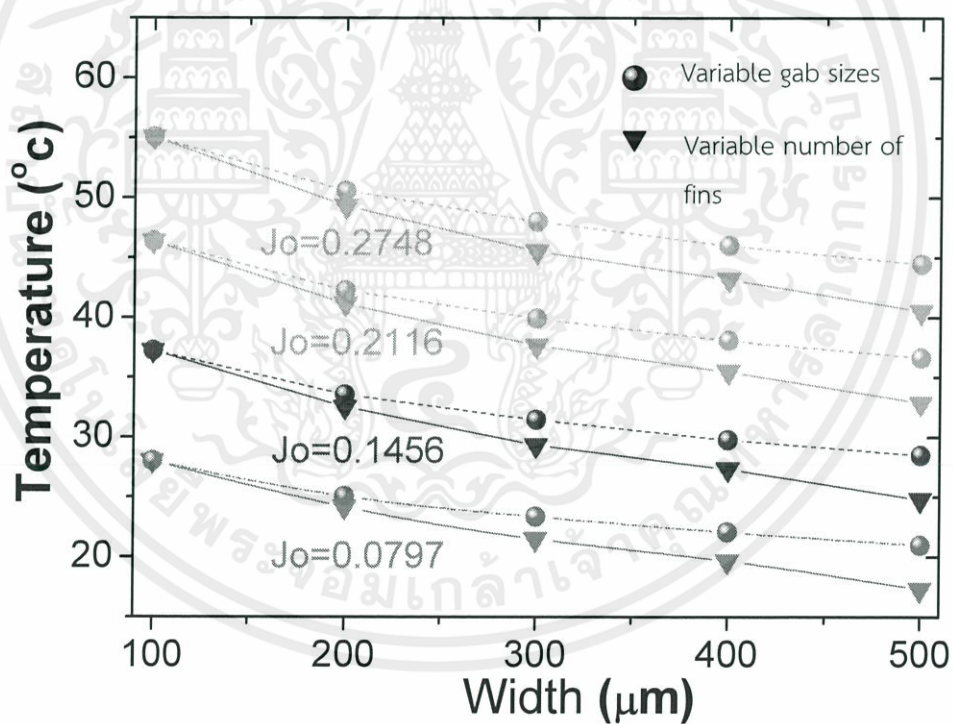
ตารางที่ 5.3 แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของความกว้างระหว่างครีและ Joule Number ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel

Number Fin	$W_{fin}=100$ ไมโครเมตร	W_{fin}	Number Fin
1		100	
2		200	
3		300	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โฆษณาการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

ตารางที่ 5.3 แสดงโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์หัตถิพลของความกว้างระหว่างครีบบและJoule Number ที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของของไหลใน Channel (ต่อ)

4		400	
5		500	



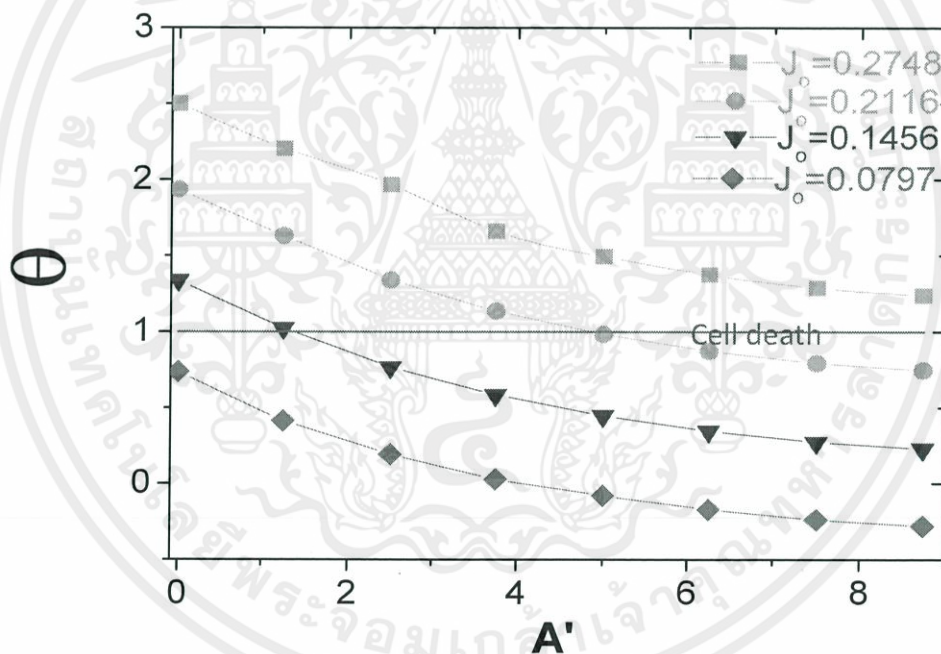
เอกสารนี้เป็นเอกสาร
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างครีบบหนึ่งตัวที่เพิ่มความกว้างระหว่างครีบบกับการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้
กับการเพิ่มจำนวนครีบบโดยให้ความกว้างระหว่างครีบบเป็น 100 μm

จากกราฟจะเห็นว่าในกรณีที่ความกว้างระหว่างครีบริบเท่ากันการเพิ่มจำนวนครีบริบจะทำให้มีพื้นที่ระบายความร้อนมากกว่า ทำให้อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากยิ่งจำนวนครีบริบที่มากขึ้นพื้นที่ผิวข้างจะยิ่งมาก ทำให้การระบายความร้อนที่ผิวข้างโดยที่ความกว้าง $500\ \mu\text{m}$ ในกรณีที่เพิ่มจำนวนครีบริบทำให้พื้นที่ผิวรวมมากกว่ากรณีความกว้างเพียงอย่างเดียวถึง 2.77 เท่า แต่อุณหภูมิมากกว่าเพียง 19.3%

ต่อไปจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและพื้นที่ของการระบายความร้อนในรูปแบบตัวแปรมิติกับJoule Numberโดยแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดในรูปของตัวแปรไร้มิติตามสมการนี้

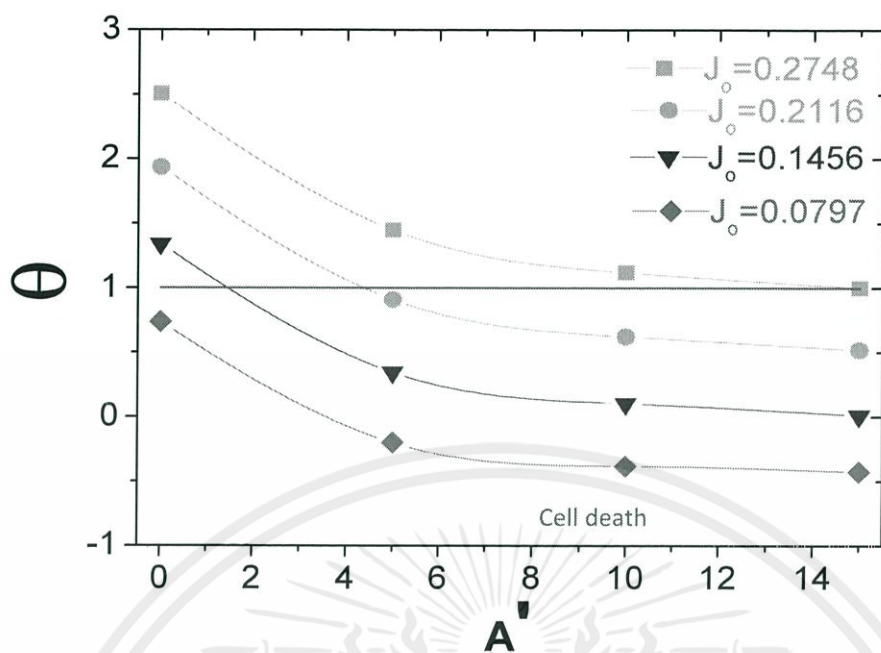
$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_{DEATH} - T_\infty} \text{ เทียบกับอัตราส่วนพื้นที่ของครีบริบต่อพื้นที่ผิวของElectrode เป็นไปตามสมการนี้}$$

$A' = \frac{A_{Fin}}{A_{ele}}$ โดยพิจารณาที่ Joule Numberต่างๆโดยที่ T_∞ เป็นอุณหภูมิที่ทางเข้าของChannelในการคำนวณนี้เท่ากับ 25°C และ T_{DEATH} คืออุณหภูมิที่เซลล์ตายคือ 41°C

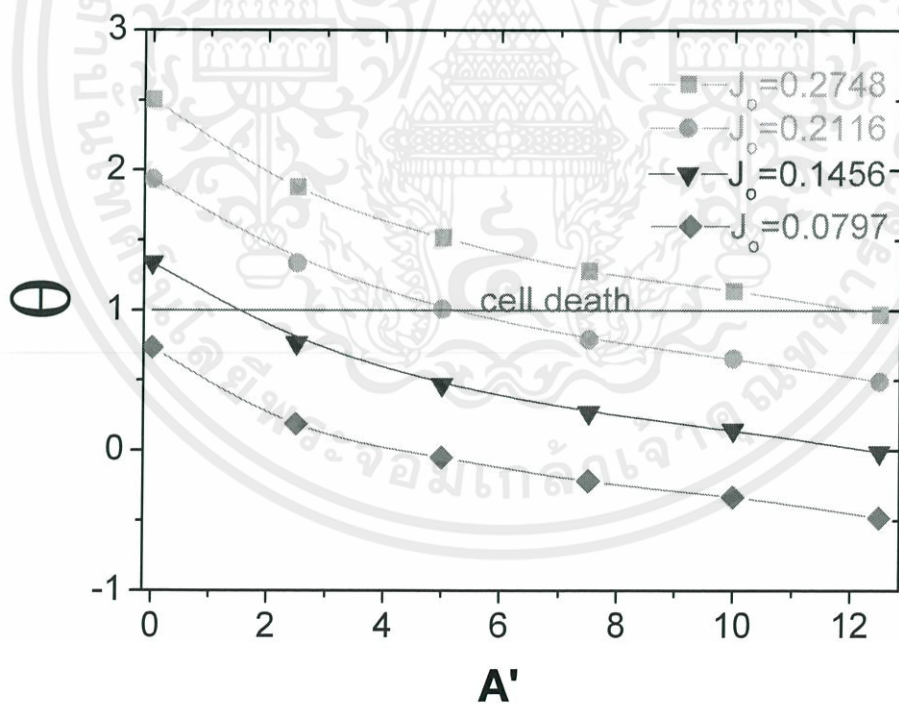


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงผลความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบริบเท่ากับ $50\ \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงผลความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมี ความกว้างครึ่งเท่ากับ $100 \mu\text{m}$



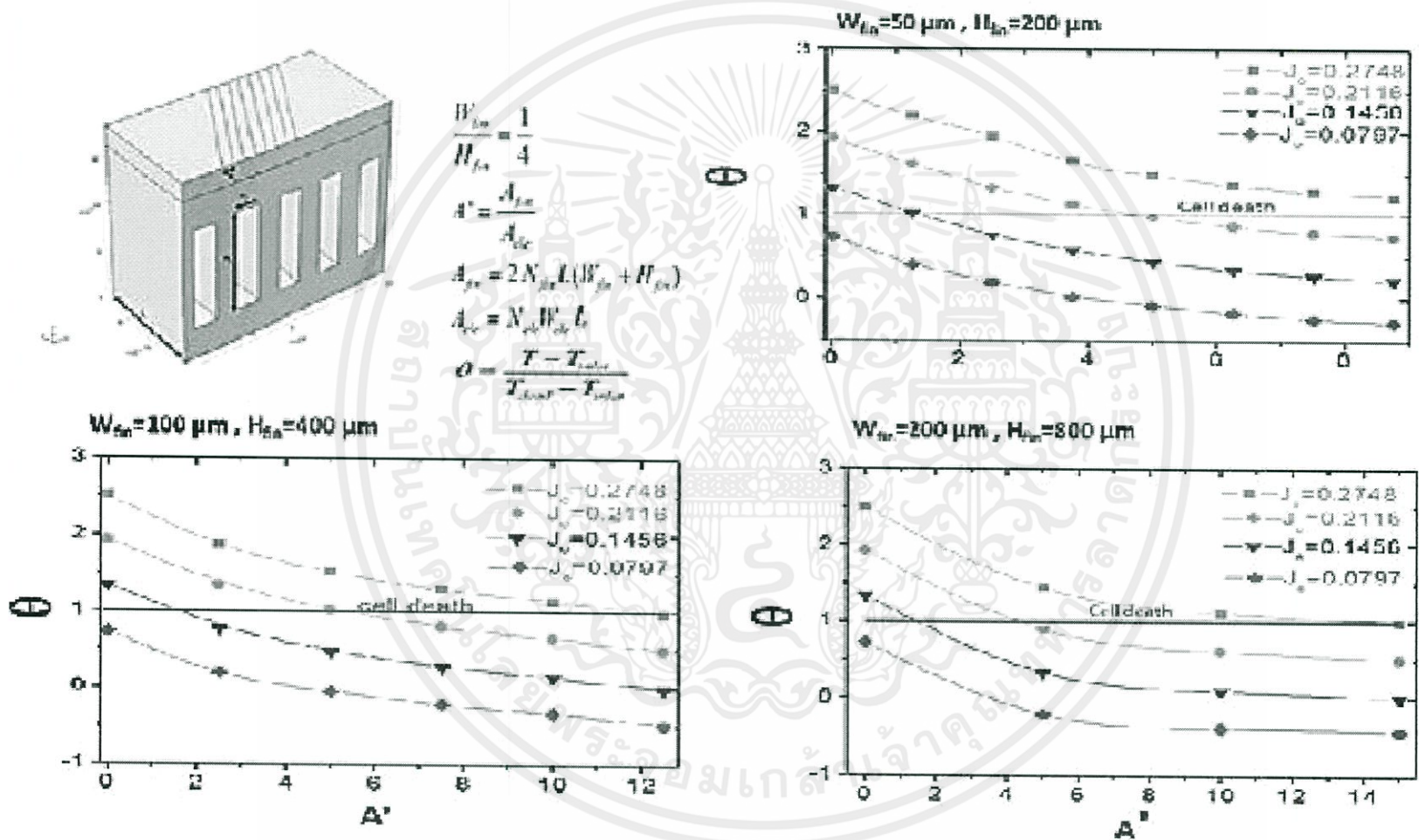
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงผลความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมี ความกว้างครึ่งเท่ากับ $200 \mu\text{m}$

จากกราฟในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ โดยในกราฟกำหนดว่า ที่ $\theta = 1$ คืออุณหภูมิที่เซลล์ตาย ดังนั้นบริเวณที่ปลอดภัยคือพื้นที่ที่อยู่ใต้เส้นสีแดง จากกราฟพบว่าทั้ง 3 กราฟจะพบว่าอุณหภูมิจะคู่เข้าค่าคงที่หนึ่งๆ สำหรับกราฟแต่ละเส้น เนื่องจากกราฟทั้ง 3 อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ จึงทำให้สามารถคำนวณออกแบบจำนวนครีบที่ต้องติดตั้งในอุปกรณ์ DEP สำหรับสถานการณ์ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิ, รูปทรงและจำนวนของครีบทึ่เหมาะสม (Chart for Optimal Temperature and Micro Fin Dimensions)



5.3 วิจารณ์ผล

จากผลการคำนวณพบว่าการติดครีบบรรบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ DEP มีผลทำให้อุณหภูมิในอุปกรณ์ DEP ลดลงเป็น 57.57 % เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไม่ติดครีบ

- การเพิ่มจำนวนครีบ มีผลทำให้อุณหภูมิในอุปกรณ์ลดลงเนื่องจากพื้นที่ในการระบายความร้อนเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มความเร็วของน้ำหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ลดลงเนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้การพาความร้อนมีผลมากยิ่งขึ้น
- การเปลี่ยนแปลงขนาดของครีบมีผลต่อการระบายความร้อนดังนี้
 - (i) ช่องว่างระหว่างครีบ: ทำให้อุณหภูมิในอุปกรณ์ลดลงโดยอิมิตของการลดลงจะขึ้นกับช่วงความกว้างที่มีสนามไฟฟ้าเข้มข้น
 - (ii) ความสูงของครีบ : ทำให้อุณหภูมิในอุปกรณ์ลดลงโดยมีลิมิตอยู่ที่ 4 เท่าของความกว้างของครีบ
 - (iii) ความกว้างของครีบ : จากการคำนวณพบว่าความกว้างมีผลต่อการระบาย

5.4 ปัญหาที่พบ

1. เนื่องจากสเกลของครีบ ต่างกับอุปกรณ์มากทำให้ไม่สามารถตี mesh เพื่อคำนวณได้
2. เนื่องจากมีการย่อสเกลลงมาทำให้ของไหลไม่สามารถอยู่ในรูปแบบของ Fully developed flow
3. การคำนวณเพื่อหาคำตอบไม่สามารถเข้าสู่คำตอบได้
4. เนื่องจากค่าความคาดเคลื่อนของคำตอบที่บริเวณขอบมีค่ามาก
5. ข้อมูลที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ในสถานการณ์ต่างๆได้
6. เนื่องจากผลของขนาดของครีบในด้านความกว้างและความสูงมีผลต่อการระบายความร้อนที่แตกต่างกัน

5.5 แนวทางการแก้ไข

1. ทำการลดขนาดของโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ ทำการพิจารณาเฉพาะส่วน
2. กำหนดให้ทางเข้าของของไหลเป็นอัตราการไหลเชิงมวล่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3. กำหนดขนาดของ local element เฉพาะในส่วนที่มีการคำนวณที่ซับซ้อนที่มีการนำไปใช้
4. เพิ่มการตี mesh เฉพาะบริเวณขอบให้มากขึ้น

5. ทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ
6. ทำการหาความสัมพันธ์ของขนาดของครีบกับอุณหภูมิเพื่อหาขนาดของครีบที่เหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) Lewpiriyawong, N. and C. Yang, Dielectrophoresis Field-Flow Fractionation for Continuous-Flow Separation of Particles and Cells in Microfluidic Devices.
- 2) Cho, B.S., et al., Passively Driven Integrated Microfluidic System for Separation of Motile Sperm. Anal. Chem, 2003. 75: p. 1671-1675.
- 3) Sridharan, S., et al., Joule heating effects on electroosmotic flow in insulator-based dielectrophoresis. Electrophoresis, 2011. 32: p. 2274-2281.
- 4) Kosar, A. and Y. Peles, Micro Scale pin fin Heat Sinks Parametric Performance Evaluation Study. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, 2006: p. 1521-1533.
- 5) Lee, D.-H., et al., Dielectrophoretic particle-particle interaction under AC electrohydrodynamic flow conditions. Electrophoresis, 2011. 32: p. 2298-2306.
- 6) Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Hardcover, John Wiley & Sons, 1996.
 .Dr. Thipwan Fangsuwannarak PHOTO LITHOGRAPHY TECHNIQUE
<http://www.sut.ac.th/engineering/Electrical/courses/429650/IC%20week%205.pdf>
- 7) Nuttawut Lewpiriyawong, Chun Yang, Continuous separation of multiple particles by negative and positive dielectrophoresis in a modified H-filter Electrophoresis 2014, 35, 714-720
- 8) Prof. Robert B. Laughlin, Department of Physics, Stanford University
- 9) Moschallski, M., et al., MicroPrep: Chip-based dielectrophoretic purification of mitochondria. Electrophoresis, 2010. 31: p. 2655-2663.
- 10) Tang, G., et al., Assessment of Joule heating and its effects on electroosmotic flow and electrophoretic transport of solutes in microfluidic channels. Electrophoresis, 2006. 27: p. 628-639.
- 11) Ge, Yang, Tang, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 9.
- 12) RC Handbook of Chemistry & Physics, ISBN-10: 0849304857
- 13) Physicists Show Electrons Can Travel More Than 100 Times Faster in Graphene. Newsdesk.umd.edu (2008-03-24). Retrieved on 2014-02-03.

- 14) Raymond A. Serway (1998). **Principles of Physics (2nd ed.)**. Fort Worth, Texas; London: Saunders College Pub. p. 602. ISBN 0-03-020457-7.
- 15) David Griffiths (1999) [1981]. "7. **Electrodynamics**". In Alison Reeves. **Introduction to Electrodynamics** (3rd ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. p. 286. ISBN 0-13-805326-X. OCLC 40251748.
- 16) Douglas Giancoli (2009) [1984]. "25. **Electric Currents and Resistance**". In Jocelyn Phillips. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics (4th ed.)**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. p. 658. ISBN 0-13-149508-9.
- 17) Copper wire tables : United States. National Bureau of Standards : Free Download & Streaming : Internet Archive. Archive.org (2001-03-10). Retrieved on 2014-02-03.
- 18) Physical constants. (PDF format; see page 2, table in the right lower corner)]. Retrieved on 2011-12-17.
- 19) AISI 1010 Steel, cold drawn. Matweb
- 20) "JFE steel" (PDF). Retrieved 2012-10-20.
- 21) Douglas C. Giancoli (1995). **Physics: Principles with Applications (4th ed.)**. London: Prentice Hall. ISBN 0-13-102153-2.
(see also Table of Resistivity. hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)
- 22) John O'Malley (1992) **Schaum's outline of theory and problems of basic circuit analysis**, p. 19, McGraw-Hill Professional, ISBN 0-07-047824-4
- 23) Glenn Elert (ed.), "Resistivity of steel", **The Physics Factbook**, retrieved and archived 16 June 2011.
- 24) Milton Ohring (1995). **Engineering materials science**, Volume 1 (3rd ed.). Academic Press. p. 561. ISBN 0125249950.
- 25) Y. Pauleau, P  ter B. Barna, P. B. Barna (1997) **Protective coatings and thin films: synthesis, characterization, and applications**, p. 215, Springer, ISBN 0-7923-4380-8.
- 26) Hugh O. Pierson, **Handbook of carbon, graphite, diamond, and fullerenes: properties, processing, and applications**, p. 61, William Andrew, 1993 ISBN 0-8155-1339-9.

- 27) Lawrence S. Pan, Don R. Kania, Diamond: **electronic properties and applications**, p. 140, Springer, 1994 ISBN 0-7923-9524-7.
- 28) **Physical properties of sea water**. Kayelaby.npl.co.uk. Retrieved on 2011-12-17.
- 29) **Transmission Lines data**. Transmission-line.net. Retrieved on 2014-02-03.
- 30) R. M. Pashley , M. Rzechowicz, L. R. Pashley, and M. J. Francis (2005). "De-Gassed Water is a Better Cleaning Agent". The Journal of Physical Chemistry B 109 (3): 1231–8. doi:10.1021/jp045975a. PMID 16851085.
- 31) Munson, Young, Okiishi,Huebsch. **Fundamentals of fluid mechanics**. Sixth edition
- 32) Jong Min Sung December 10, 2007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ A ค่าคงที่ทั่วไปและคุณสมบัติของของไหลที่ถูกใช้ในโมเดล

Name	Value[Unit]	Description
ε_0	8.854188×10^{-12} [F/m]	Permittivity of free space
ε	80.2	Relative permittivity, fluid
k_{ref}	0.691 [W/(m*K)]	Thermal conductivity, fluid
ρ	1000 [kg/m ³]	Density, fluid
c_p	4.184 [kJ/(kg*K)]	Heat capacity, fluid
ω	$2\pi \times 15$ [rad] $\times 15$ [kHz]	Angular frequency, AC electric field
T_{ref}	100 [°C]	Reference temperature
$\dot{m}$	6 [μg/s]	Mass flow rate at the inlet of channel

ตารางที่ B แสดงคุณสมบัติต่างๆของแก้วที่ใช้ทำฐาน

Property	Name	Value	Unit
Heat capacity at constant pressure	C_p	754	$J / (kg \cdot K)$
Density	ρ	2230	kg / m^3
Thermal conductivity	k	1.13	$W / (m \cdot K)$
Electrical conductivity	σ	0	S / m
Coefficient of thermal expansion	α	3.30×10^{-6}	$1 / K$
Relative permittivity	ε	4.8	1
Young's modulus	E	6.30×10^9	Pa
Poisson's ratio	γ	20	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ C แสดงคุณสมบัติต่างๆของน้ำที่ อุณหภูมิต่างๆ[13]

Property	0 °C	20 °C	40°C	60°C	80°C	100°C	Units
Density	999.84	998.21	992.22	983.20	971.82	958.40	kg m ⁻³
Thermal Expansion	-0.07	0.207	0.385	0.523	0.643	0.752	*10 ⁻³ K ⁻¹
Isothermal Compression (Volume Viscosity)	5.0879	4.5895	4.4241	4.4507	4.6418	4.9015	*10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹
Dynamic Viscosity (η)	1.793	1.002	0.6532	0.4665	0.3544	0.2818	*10 ⁻³ kg m ⁻¹ s ⁻¹ (Pa s)
Kinematic Viscosity ν { = η / ρ }	1.787	1.004	0.658	0.475	0.365	0.294	*10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹
Thermal Conductivity	561.0	598.4	630.5	654.3	670.0	679.1	*10 ⁻³ W m ⁻¹ K ⁻¹
Specific Heat at constant pressure C_p	4.2176	4.1818	4.1785	4.1843	4.1963	4.2159	*10 ³ J kg ⁻¹ K ⁻¹
Specific Entropy e	0	0.296	0.581	0.832	1.076	1.307	*10 ³ J kg ⁻¹ K ⁻¹
Specific Enthalpy	0	83.8	167.6	251.5	335.3	419.1	*10 ³ J kg ⁻¹
Saturation Vapor Pressure	611.3	2,338.8	7,381.4	19,932	47,373	101,325	Pa
Surface Tension	75.64	72.75	69.60	66.24	62.47	58.91	*10 ⁻³ N m ⁻¹
Speed of Sound	1,403	1,481	1,526	1,552	1,555	1,543	m s ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ D แสดงค่า Conductivity ของสารต่างๆ[14]-[31]

Material	ρ ($\Omega \cdot m$) at 20 °C	σ (S/m) at 20 °C
Carbon (grapheme)	1×10^{-8}	-
Silver	1.59×10^{-8}	6.30×10^7
Copper	1.68×10^{-8}	5.96×10^7
Annealed copper	1.72×10^{-8}	5.80×10^7
Gold	2.44×10^{-8}	4.10×10^7
Aluminum	2.82×10^{-8}	3.5×10^7
Calcium	3.36×10^{-8}	2.98×10^7
Tungsten	5.60×10^{-8}	1.79×10^7
Zinc	5.90×10^{-8}	1.69×10^7
Nickel	6.99×10^{-8}	1.43×10^7
Lithium	9.28×10^{-8}	1.08×10^7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

Material	ρ ($\Omega \cdot m$) at 20 °C	σ (S/m) at 20 °C
Iron	1.0×10^{-7}	1.00×10^7
Platinum	1.06×10^{-7}	9.43×10^6
Tin	1.09×10^{-7}	9.17×10^6
Carbon steel (1010)	1.43×10^{-7}	6.99×10^6
Lead	2.2×10^{-7}	4.55×10^6
Titanium	4.20×10^{-7}	2.38×10^6
Grain oriented electrical steel	4.60×10^{-7}	2.17×10^6
Manganic	4.82×10^{-7}	2.07×10^6
Constantan	4.9×10^{-7}	2.04×10^6
Stainless steel ^[note 5]	6.9×10^{-7}	1.45×10^6
Mercury	9.8×10^{-7}	1.02×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต อาจทำให้ข้อมูลผิดพลาดได้

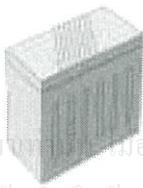
Material	ρ ($\Omega \cdot m$) at 20 °C	σ (S/m) at 20 °C
Nichrome	1.10×10^{-6}	9.09×10^5
GA As	1×10^{-3} to 1×10^8	1×10^{-8} to 10^3
Carbon (amorphous)	5×10^{-4} to 8×10^{-4}	1.25×10^3 to 2×10^3
Carbon (graphite)	2.5×10^{-6} to 5.0×10^{-6} //basal plane $3.0 \times 10^{-3} \perp$ basal plane	2×10^5 to 3×10^5 //basal plane $3.3 \times 10^2 \perp$ basal plane
Carbon (diamond)	1×10^{12}	$\sim 10^{-13}$
Germanium	4.6×10^{-1}	2.17
Sea water	2×10^{-1}	4.8
Drinking water	2×10^1 to 2×10^3	5×10^{-4} to 5×10^{-2}
Silicon	6.40×10^2	1.56×10^{-3}
Wood (damp)	1×10^3 to 1×10^4	10^{-4} to 10^{-3}
Deionized water	1.8×10^5	5.5×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้" ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องแจ้งให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาส

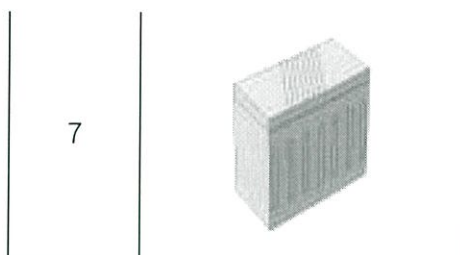
Material	ρ ($\Omega \cdot m$) at 20 °C	σ (S/m) at 20 °C
Glass	10×10^{10} to 10×10^{14}	10^{-11} to 10^{-15}
Hard rubber	1×10^{13}	10^{-14}
Wood (oven dry)	1×10^{14} to 1×10^{16}	10^{-16} to 10^{-14}
Sulfur	1×10^{15}	10^{-16}
Air	1.3×10^{16} to 3.3×10^{16}	3×10^{-15} to 8×10^{-15}
PEDOT:PSS	1×10^{-3} to 1×10^{-1}	1×10^1 to 1×10^3
Fused quartz	7.5×10^{17}	1.3×10^{-18}
PET	10×10^{20}	10^{-21}
Teflon	10×10^{22} to 10×10^{24}	10^{-25} to 10^{-23}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ E แสดงโมเดลที่ใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบเท่ากับ $50\ \mu\text{m}$

จำนวน Fin	รูป
1	
2	
3	
4	
5	
6	

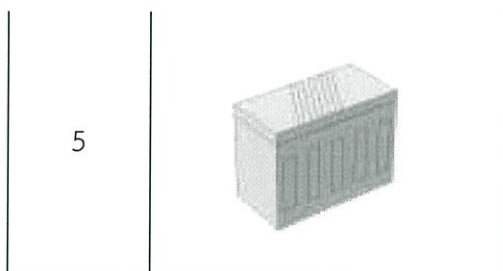
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นและอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ F แสดงโมเดลที่ใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบท่อกับ $100\ \mu\text{m}$

จำนวน Fin	รูป
1	
2	
3	
4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ G แสดงโมเดลที่ใช้สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ θ กับ A' ในแต่ละ Joule Number โดยมีความกว้างครีบเท่ากับ 200 μm

จำนวน Fin	รูป
1	
2	
3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้