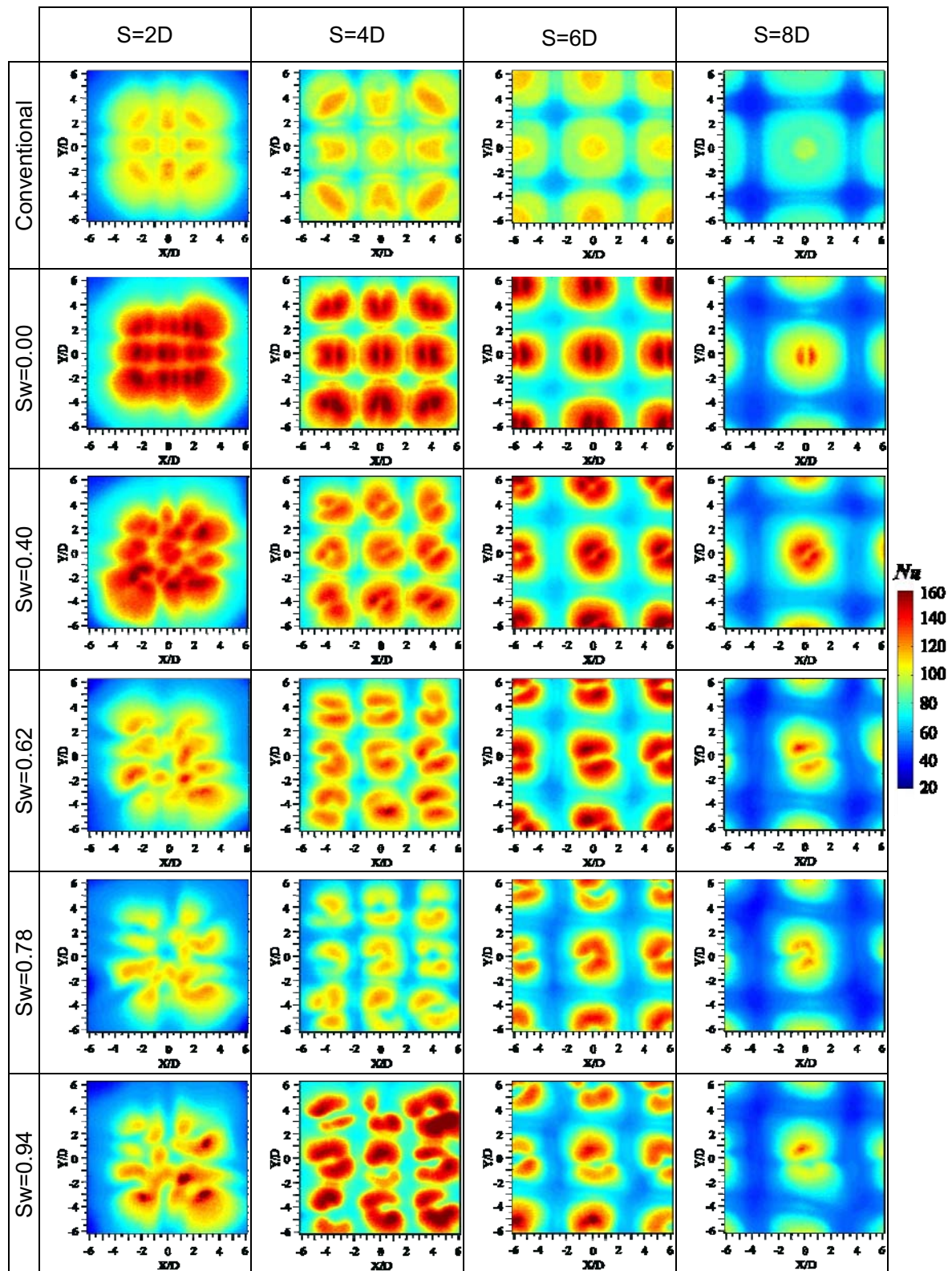
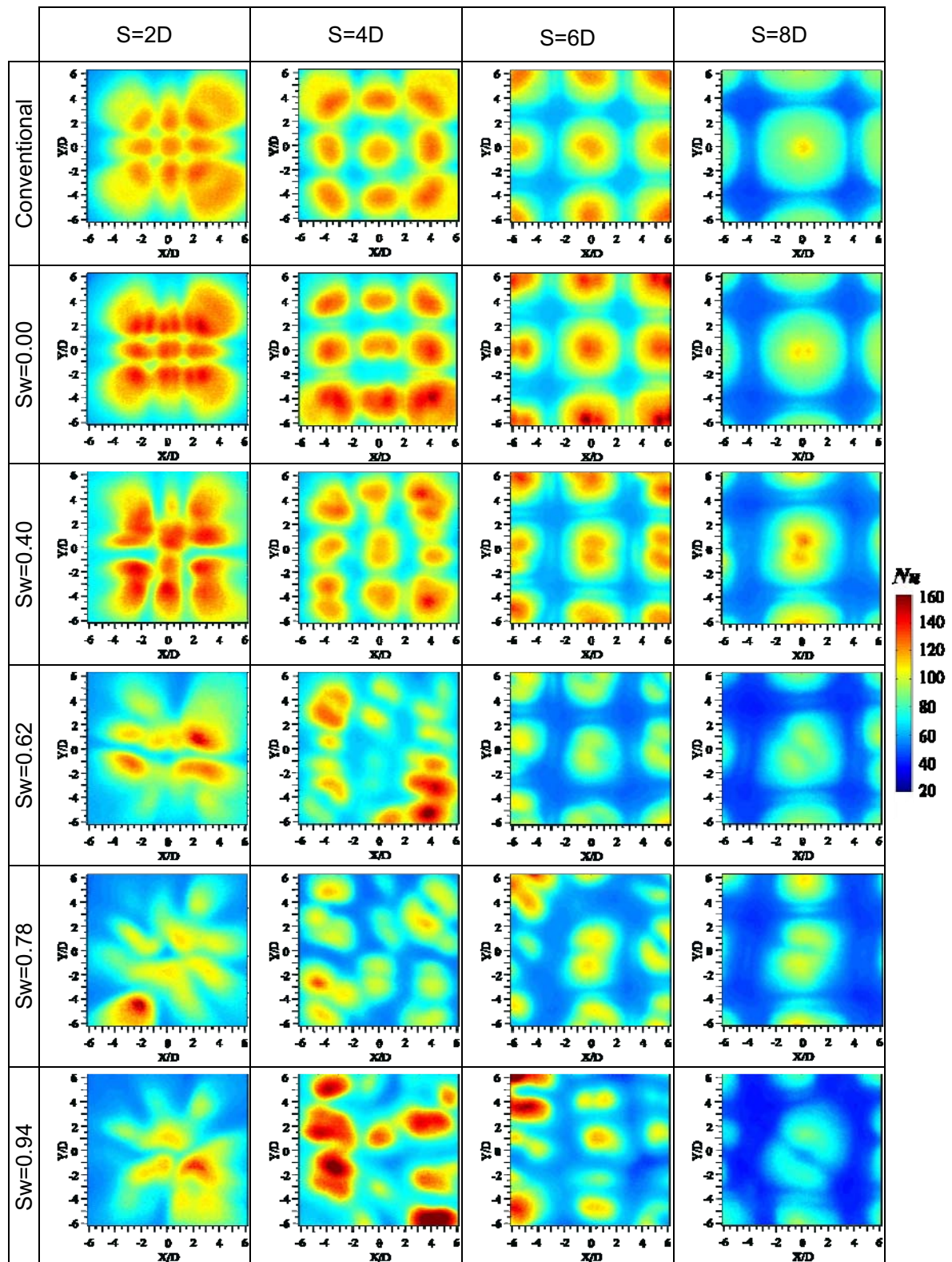
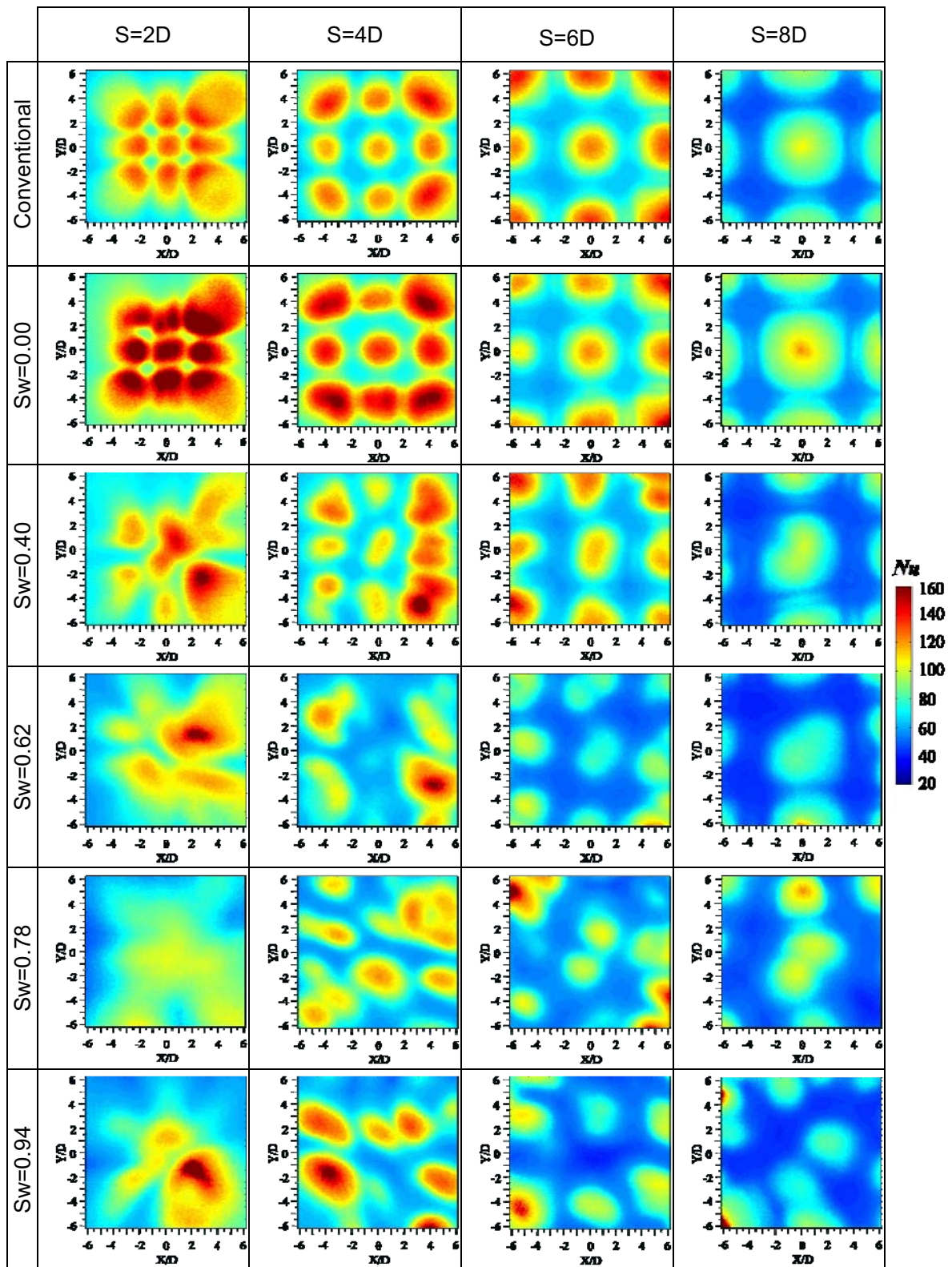




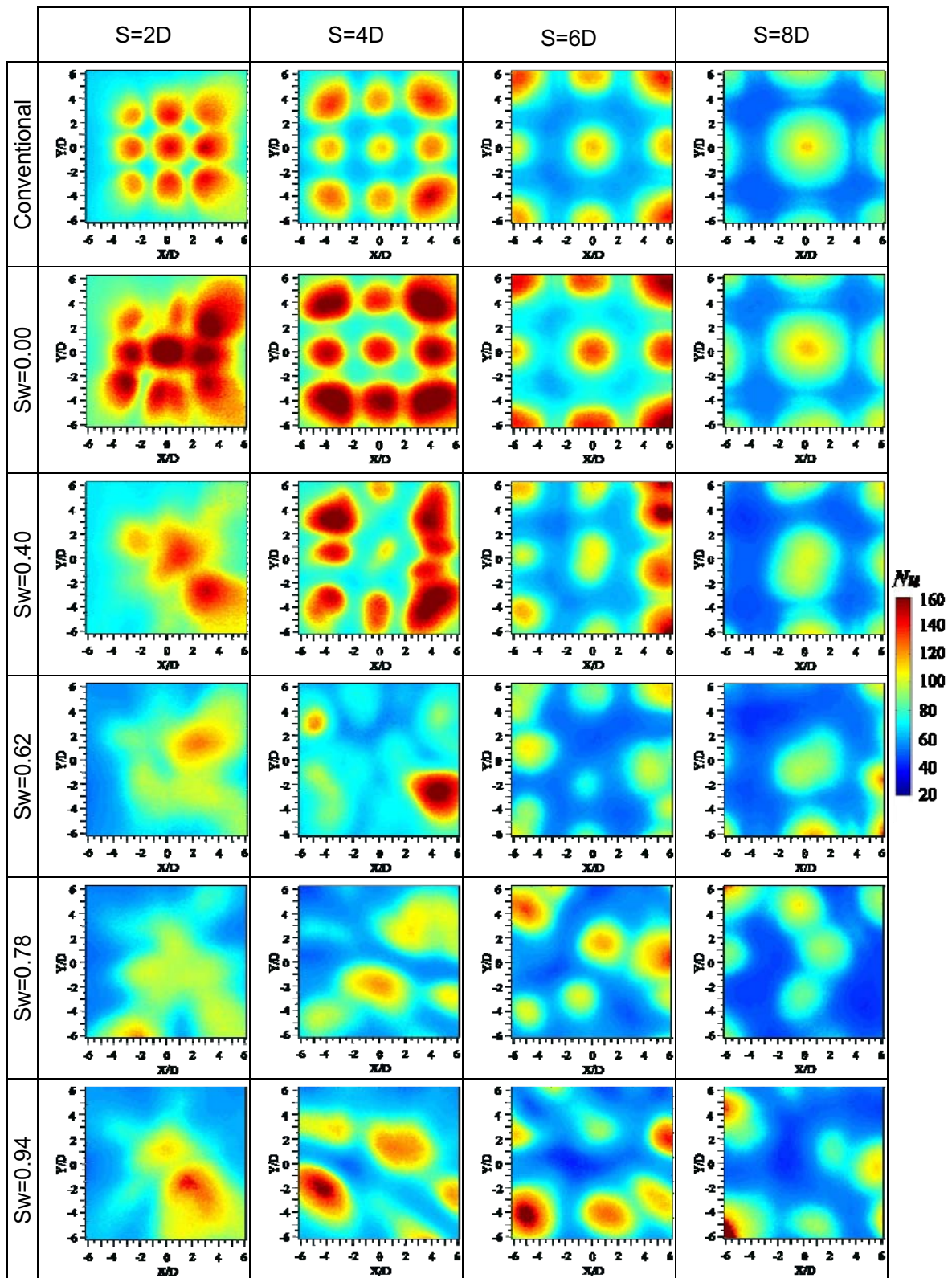
รูปที่ 3 แสดงการกระจายของน้ำเซลล์น้ำมันเบอร์บนพื้นผิวการกั้นของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



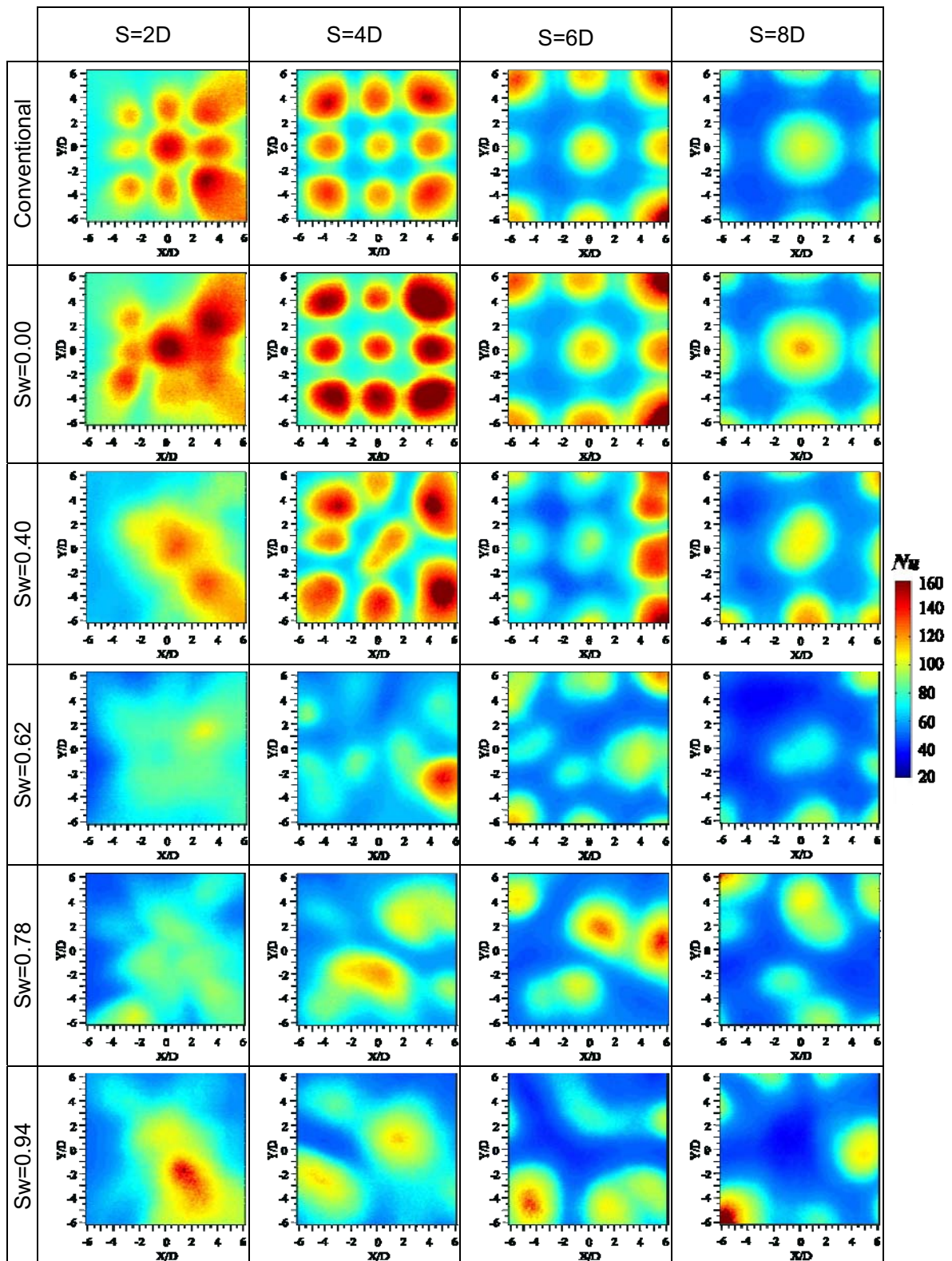
รูปที่ ๔ แสดงการกระจายของนัสเซลล์ต์บนพื้นผิวกรณของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=4D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ ๕ แสดงการกระจายของนัสเซิลต์บนพื้นผิวกรณของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=6D$ ($Re=20,000$)

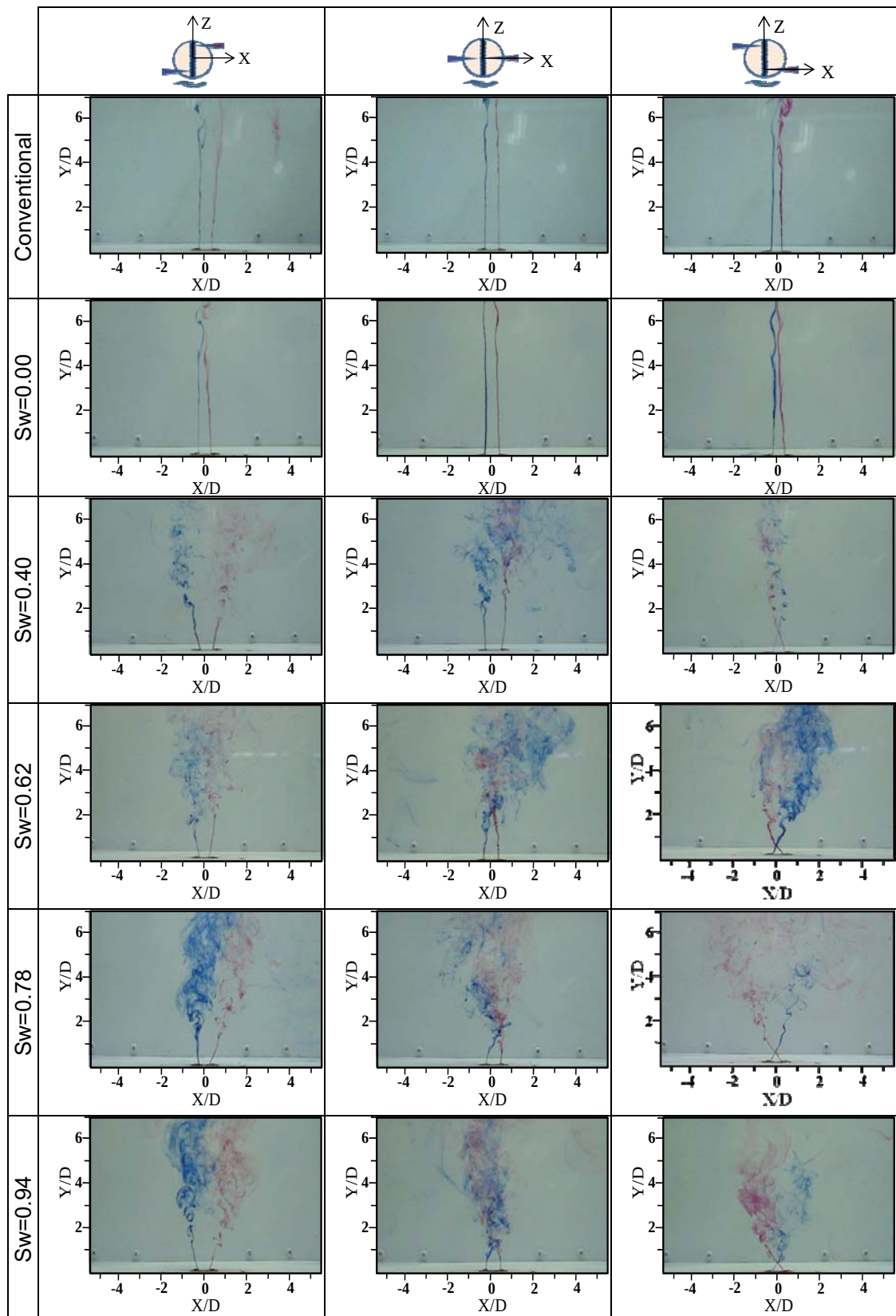


รูปที่ 6 แสดงการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=8D$ ($Re=20,000$)



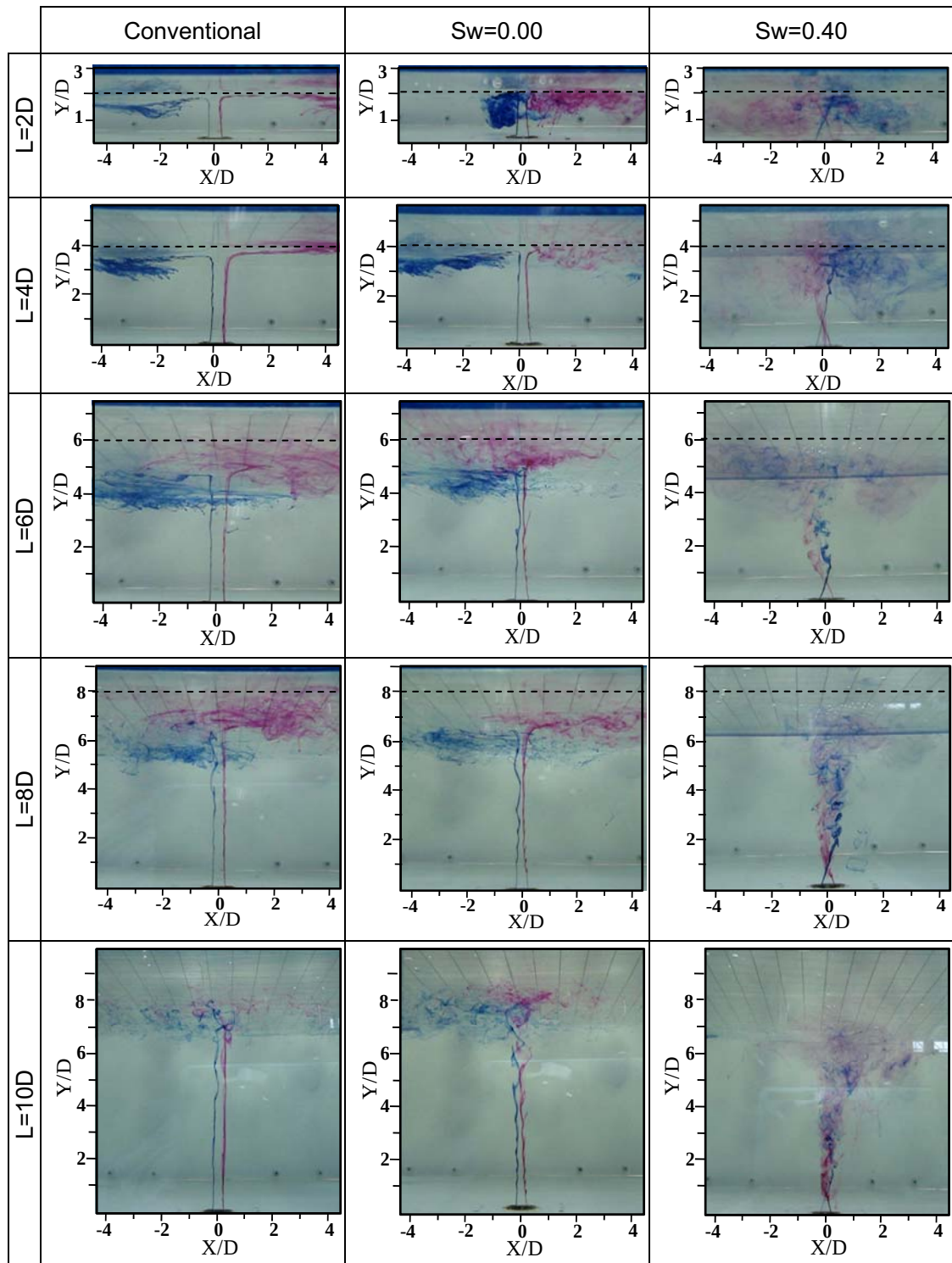
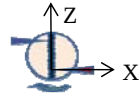
รูปที่ ๗ แสดงการกระจายของนัสเซลล์ต์บนพื้นผิวการก่อกำเนิดของเซลล์
ที่เงื่อนไขระยะ $L=10D$ ($Re=20,000$)

ภาคผนวก ค
ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ้าหน้าที่อิสระ

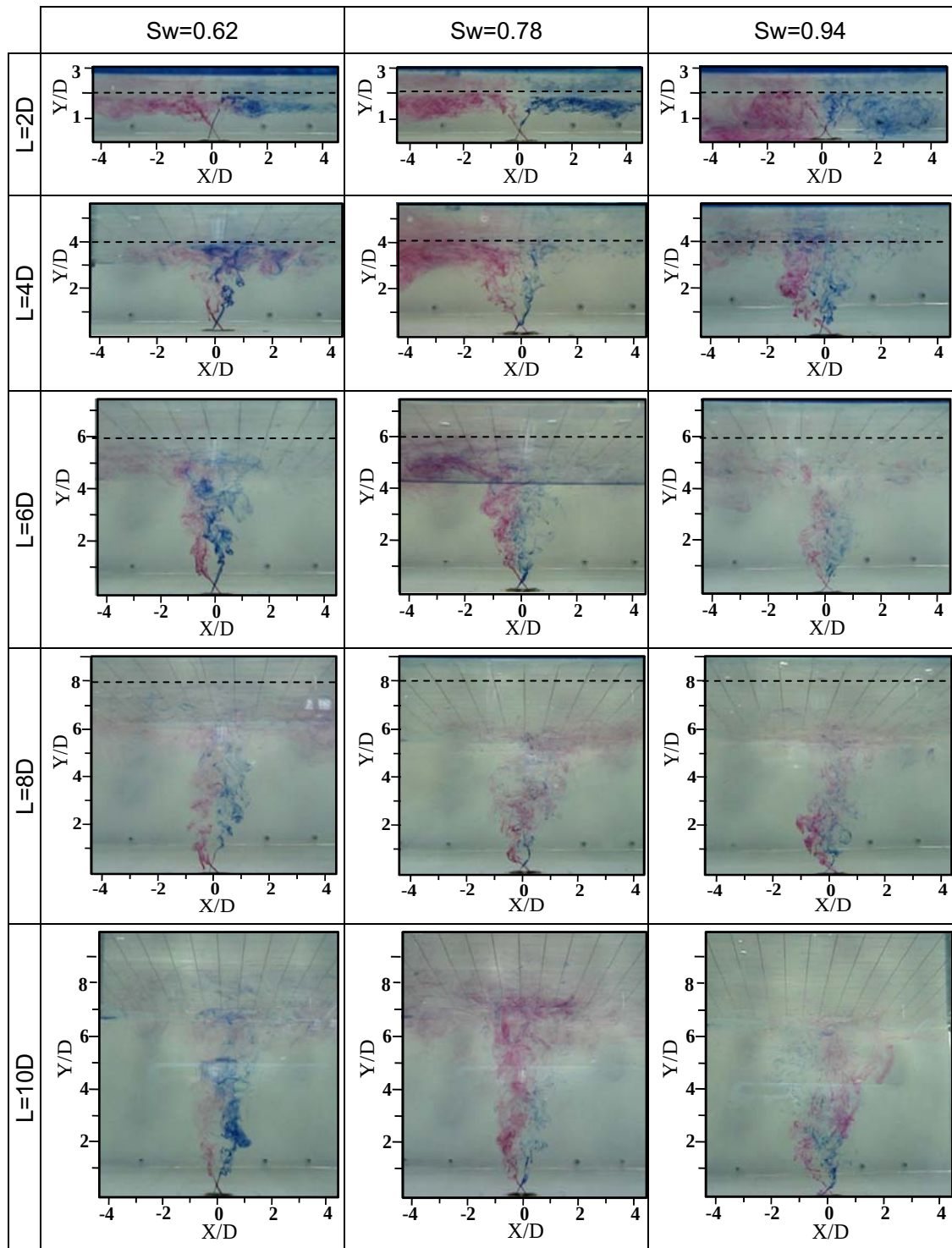
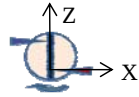


รูปที่ ภาค 1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระกรณีที่วางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกท่อเจ็ท
แบบต่างๆ (Re=760)

ภาคผนวก ง
ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเงินทุนชนพื้นผิว



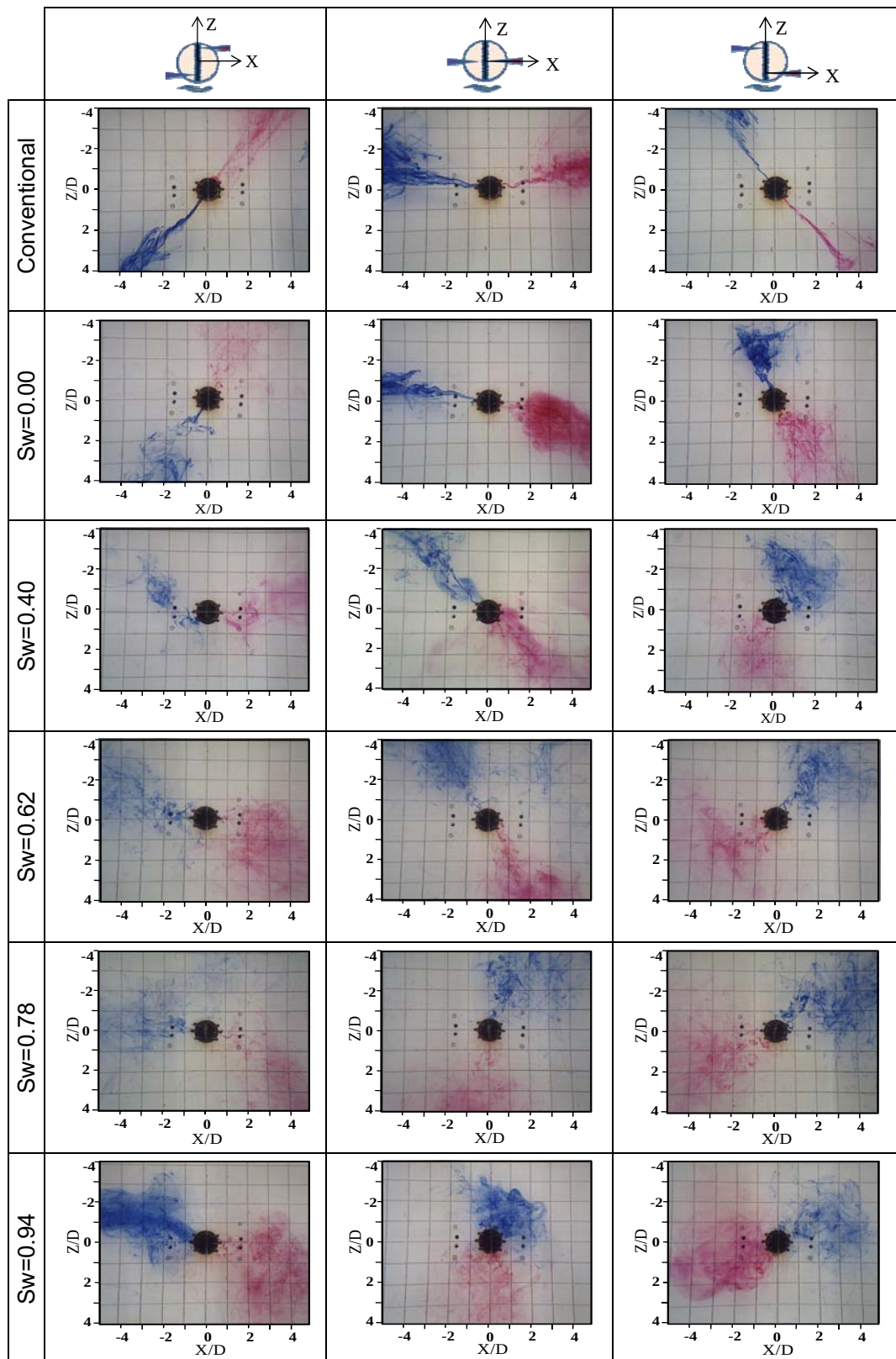
รูปที่ ๑๖ ๑ แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิวกรณีที่วางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกท่อ
 เจ็ทแบบต่างๆ ($Re=760$, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



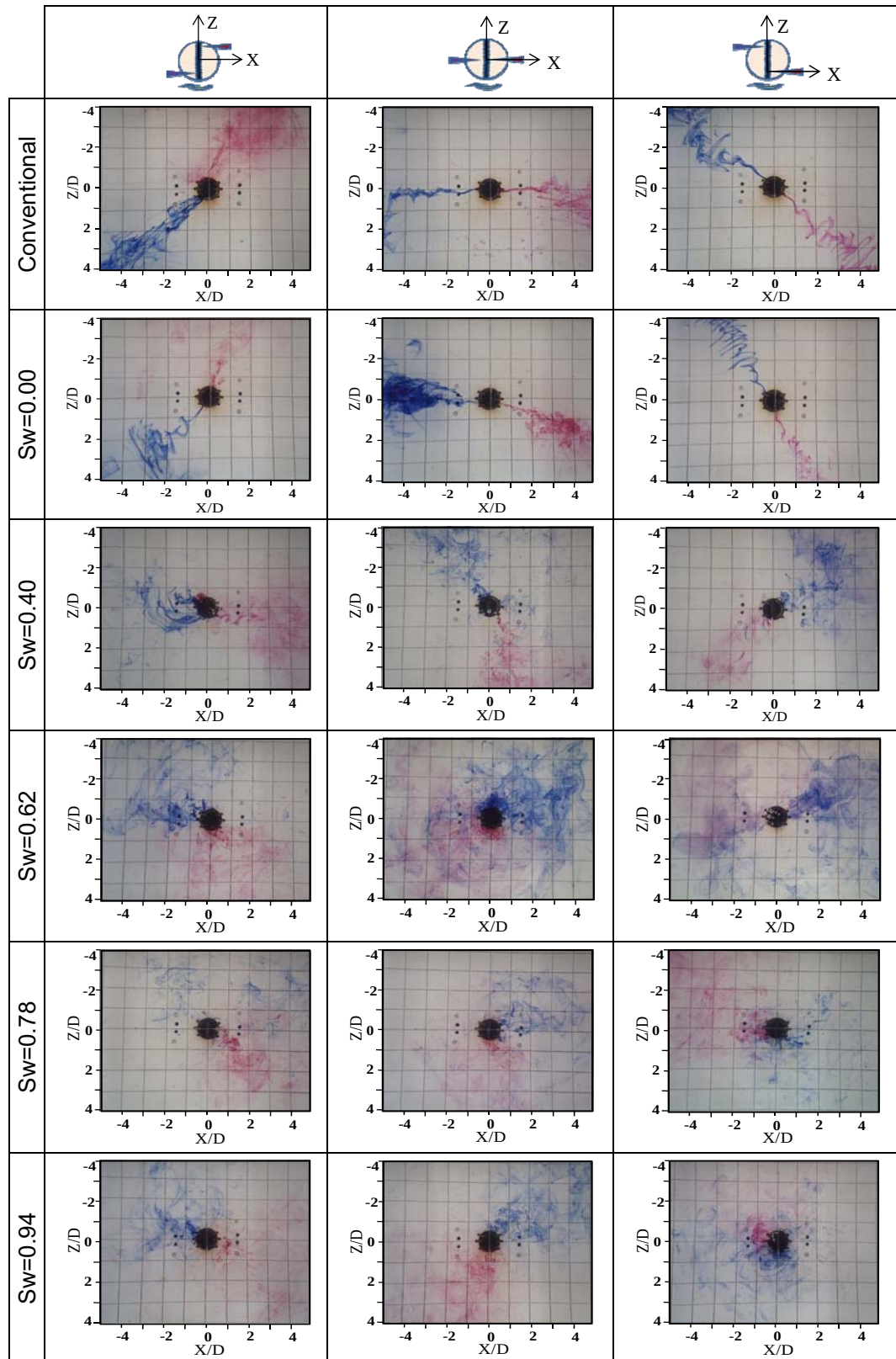
รูปที่ ๒ แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิวกรณีที่วางเข็มฉีดยาปากทางออกท่อ
เจ็ทแบบต่าง ๆ ($Re=760$, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว



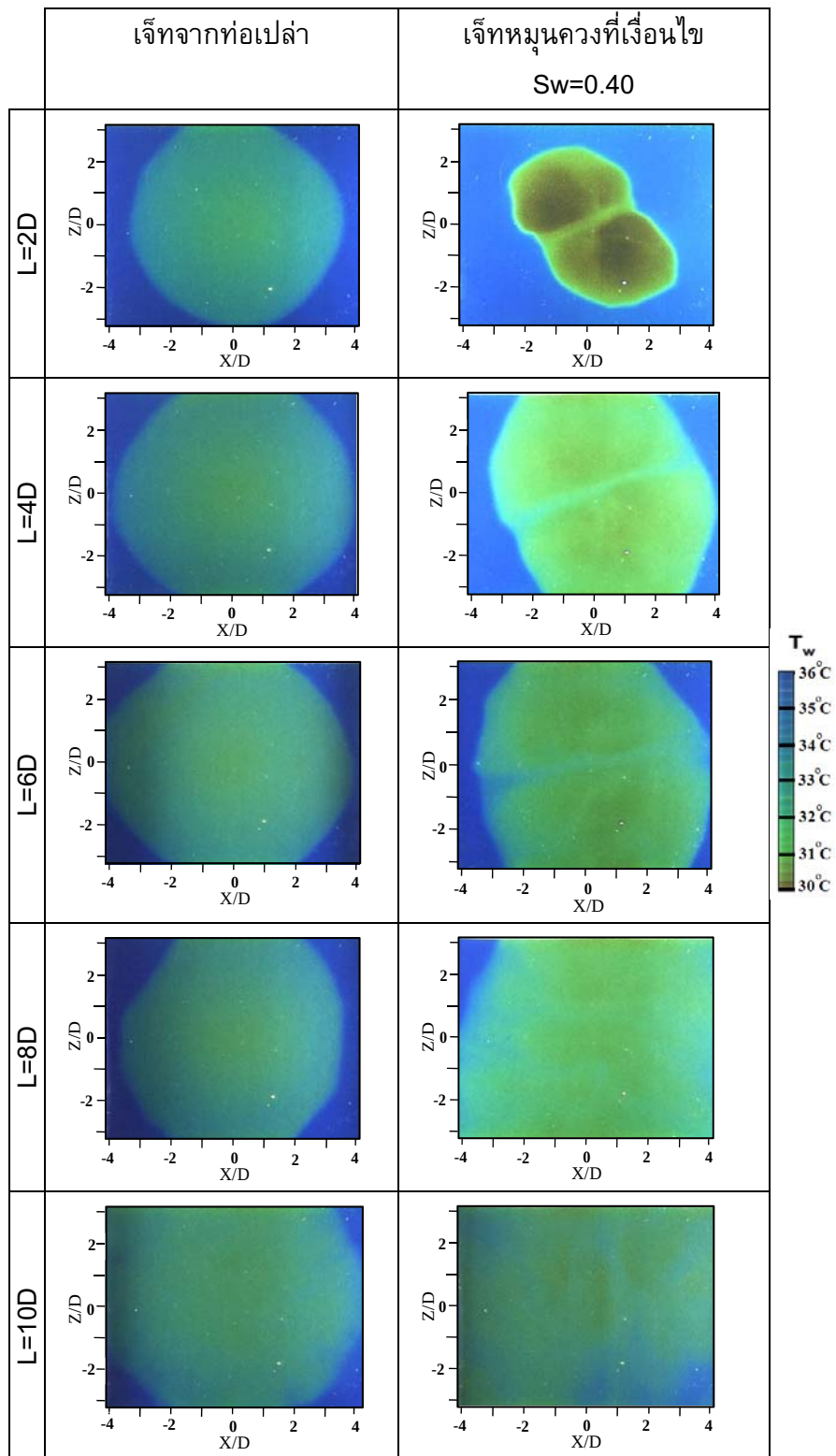
รูปที่ ๑๖ ๑ แสดงการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ
ระยะ $L=2D$ ($Re=760$, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



รูปที่ ๒ แสดงการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณีสี่ที่วางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ ระยะ $L=4D$ ($Re=760$, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาการถ่ายทอดความร้อนบนพื้นผิวของเจ้าหน้าที่



รูปที่ ภาจ 1 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ
 $(\dot{q} = 447 \text{ W/m}^2, T_f = 30^\circ\text{C}, Re = 760)$

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ภาพสีโดยใช้ระบบ RGB

ภข การวิเคราะห์ภาพสีโดยใช้ระบบ RGB

ในภาพผนวก ข จะอธิบายถึงการวิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB ซึ่งเป็นระบบที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัย จากรูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพมาแยกให้อยู่ในระบบสี RGB จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบของสี โดยกำหนดให้อยู่ในรูปความเข้มของสี (Color intensity) ที่เป็นตัวแปรไร้มิติตามสมการต่อไปนี้

$$r = \frac{R - RB}{R_{max} - RB} \quad (\text{ภข 1})$$

$$g = \frac{G - GB}{G_{max} - GB} \quad (\text{ภข 2})$$

$$b = \frac{B - BB}{B_{max} - BB} \quad (\text{ภข 3})$$

ในที่นี้ R คือ ความเข้มของสีแดงของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

G คือ ความเข้มของสีเขียวของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

B คือ ความเข้มของสีน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

R_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีแดงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบ
อุณหภูมิ

G_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีเขียวที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบ
อุณหภูมิ

B_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของน้ำเงินที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบ
อุณหภูมิ

RB คือ ความเข้มของสีแดงที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี

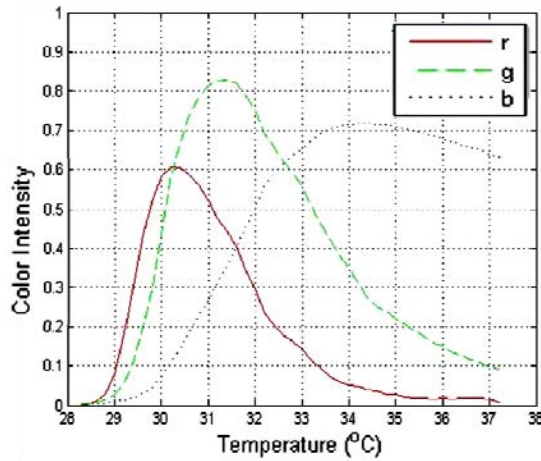
GB คือ ความเข้มของสีเขียวที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี

BB คือ ความเข้มของสีน้ำเงินที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี

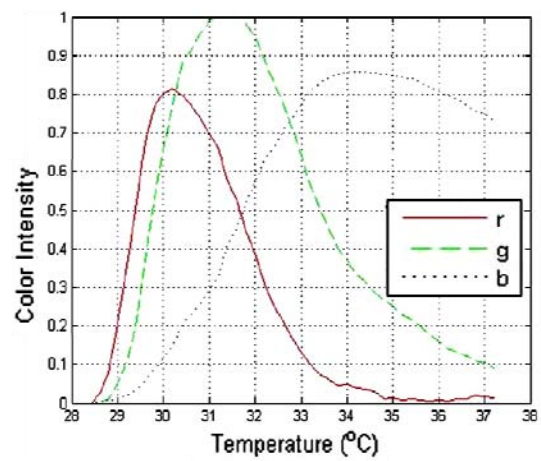
จากสมการที่ (ภข 1) - (ภข 3) ก็จะหาค่าเฉลี่ยความเข้มของสีในรูป 3.6 ทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MATLAB[®] ตามที่ได้แสดงในภาพผนวก ภข. 1 จากนั้นสร้างกราฟโดยให้แกนนอนแสดงระดับของอุณหภูมิและแกนตั้งแสดงความเข้มของส่วนประกอบสี rgb จะได้ความสัมพันธ์ของกราฟตามที่ได้แสดงในรูปที่ ภข 1

จากกราฟที่ได้แสดงในรูปที่ ภข 1 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิที่ 28.2 °C เป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลยังไม่ได้แสดงสี (สีดำ) เมื่อทำการแยกตัวประกอบของสี rgb ตัวประกอบของสีทั้งหมดก็จะเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลจะเริ่มแสดงสีทำให้สามารถแยกตัวประกอบสี rgb ได้ ซึ่งจากผลการสอบเทียบทั้งหมดหาค่าพบว่าเส้นกราฟ r และ g จะตัดกันที่อุณหภูมิ

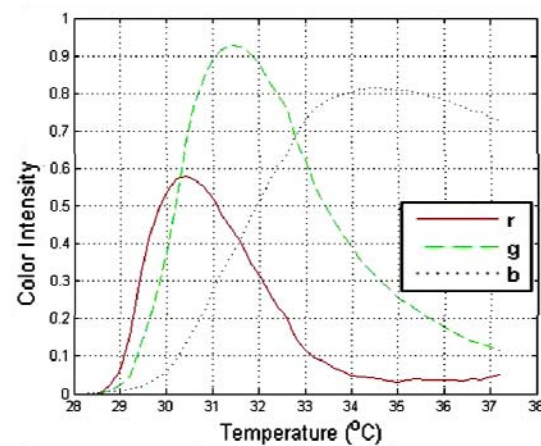
30.2 ± 0.2 °C และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลมีสีเหลืองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 (ญ) ในงานวิจัยนี้จะใช้เงื่อนไขเส้นสีเหลืองที่มีส่วนประกอบของสี r ที่มีค่าเท่ากับสี g ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



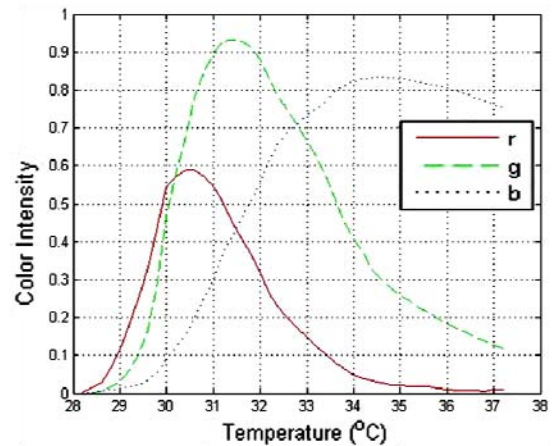
(ก) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 1



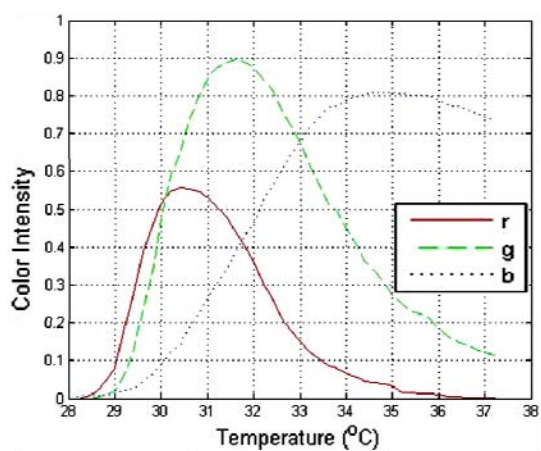
(ข) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 2



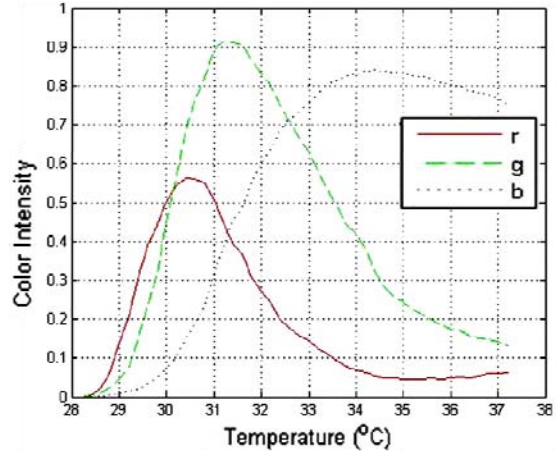
(ค) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 3



(ง) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 4



(จ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 5

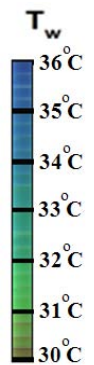


(ฉ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 6

รูปที่ ๓ ข 1 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb จากแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

ตารางที่ ภาข 1 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ภาพแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลด้วยเทคนิค
การวิเคราะห์ภาพ

$\dot{q}$ (W/m^2)	h^* ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)	Nusselt Number*	รูป ก่อนผ่านการประมวลภาพ	รูปหลังผ่านการประมวลภาพ **	ลักษณะเส้นสีที่นำมาซ้อนกัน
191	109	69			
207	118	75			
224	128	81			
242	138	88			
260	149	94			
279	159	101			
299	171	108			
319	182	115			



* คำนวณจากสมการที่ (3.8) และ (3.9) โดยใช้เงื่อนไขของเส้นสีเหลือง ($T_w = 30.2\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 28.5\text{ }^\circ\text{C}$)

** เส้นสีขาวแสดงเส้นสีที่มีอุณหภูมิ $30.2\text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งมีเงื่อนไขค่า r เท่ากับค่า g ใช้สำหรับแทนนัสเซลล์ดัมเบอร์

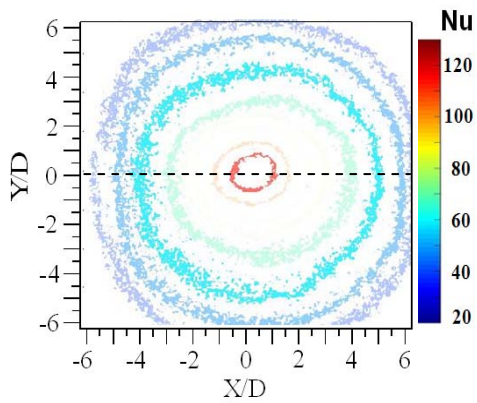
ตารางที่ ภาข 1 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ โดยที่ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่หนึ่งเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณจากสมการ (3.6) ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่สองเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคำนวณจากสมการ (3.8) และค่าจากตารางในคอลัมน์ที่สามเป็นหีสเซลล์ต์นัมเบอร์คำนวณจากสมการ (3.9) ในกรณีที่ใช้เส้นสีเหลือง $T_w = 30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของเจ็ท $T_j = 28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในการคำนวณ

สำหรับวิธีการวัดอุณหภูมิด้วยแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลสามารถหาค่าหีสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว โดยใช้วิธีการเลื่อนเส้นสีที่รู้อุณหภูมิ (เส้นสีเหลืองแสดงอุณหภูมิเท่ากับ $30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) ให้กระจายทั่วทั้งพื้นผิว สำหรับวิธีการเลื่อนเส้นสีที่รู้อุณหภูมิสามารถทำได้โดยการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนโดยให้เส้นสีที่รู้อุณหภูมิเลื่อนทั่วทั้งพื้นผิวตามที่ได้แสดงตัวอย่างของผลการทดลองในคอลัมน์ที่สี่ของตารางที่ ภาข 1 ในการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวก็จะทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นสเตนเลสเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 A

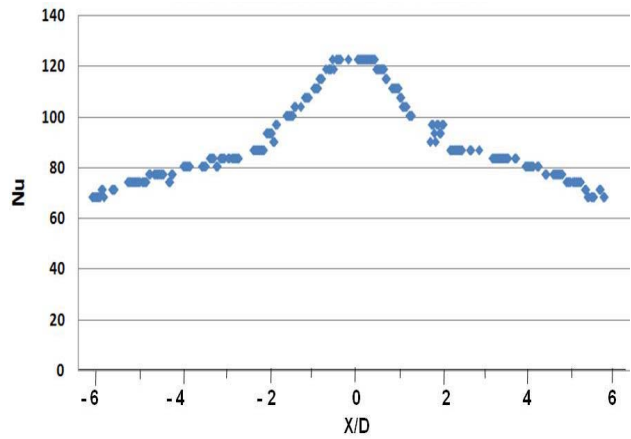
สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ทำการตัดรูปที่ปรากฏเป็นแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์
- (2) สร้างเงื่อนไขที่ r มีค่าใกล้เคียงค่า g ($|r-g| \leq 0.01$) จากนั้นให้คอมพิวเตอร์เลือกจุดสีที่มีเงื่อนไขข้างต้น
- (3) คำนวณหีสเซลล์ต์นัมเบอร์ของจุดสีตามเงื่อนไขข้อ (2)
- (4) ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ (1) – (3) ของรูปทั้งหมด จากนั้นนำหีสเซลล์ต์นัมเบอร์ทั้งหมดมาซ้อนกันตามที่ได้แสดงในตาราง ภาข 1

จากขั้นตอนข้างต้นก็จะได้นีสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่กระจายตามจุดต่างๆซึ่งผลการทดลองอาจจะแสดงให้อยู่ในรูปความเข้มของสีตามที่ได้แสดงในรูปที่ ภาข 2 (ก) หรืออาจจะแสดงที่พิกัดต่างๆตามแกน X หรือ Y ที่อยู่ในรูปกราฟความสูงของหีสเซลล์ต์นัมเบอร์ สำหรับรูปที่ ภาข 2 (ข) เป็นการแสดงกราฟความสูงของหีสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่พิกัด $Y/D=0$ ตามเส้นประในรูป ภาข 2 (ก) อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างที่ได้แสดงเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย สำหรับวิธีการหาค่าหีสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว จึงเลือกฟลักซ์ความร้อนที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 1 A แต่ในการทดลองจริงจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 0.5 A



(ก) การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว



(ข) การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์

ตามเส้นประในรูป ภาช 2 (ก)

รูปที่ ภาช 2 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ได้จากการประมวลภาพด้วยเทคนิค

การวิเคราะห์ภาพ ($T_j=28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_w=30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ภข 1 โปรแกรม MATLAB® สำหรับสร้างกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb ภาพของแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัล กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB

<pre>% crop size p1=265; % position x p2=257; % position y p3=124; % colum p4=78; % row rect=[p1 p2 p3 p4];</pre>	}	กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัล
<pre>% image file input name=char(filename(i)); image=imread(name);</pre>	}	ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®
<pre>% crop imaged=imcrop(image,rect);</pre>	}	ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัล
<pre>% divided to R,G,B image R=imaged(:,:,1); G=imaged(:,:,2); B=imaged(:,:,3);</pre>	}	ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิตควิดคริสตัล
<pre>% RGB dimensionless r=(double(R)-double(RB))./(double(RMax)-double(RB)); g=(double(G)-double(GB))./(double(GMax)-double(GB)); b=(double(B)-double(BB))./(double(BMax)-double(BB));</pre>	}	กำหนดให้ตัวแปรสี RGB อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติตามที่ได้แสดงในสมการ (3.10)-(3.12)
<pre>%RGB Average r1av=sum(r(:))/numel(r); g1av=sum(g(:))/numel(g); b1av=sum(b(:))/numel(b);</pre>	}	ทำการหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรสี RGB ที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ

ภข 2 โปรแกรม MATLAB® สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB

<pre>% set jet temperature / yel temperature Tjet=28.5; Tyel=30.2;</pre>	}	กำหนดอุณหภูมิของเจ็ทและอุณหภูมิของเส้นสีเหลือง (เส้นสีที่ทราบอุณหภูมิที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.3.3)
--	---	---

<pre>%set crop size cx=403; cy=402; rect=[122 39 cx cy];</pre>	}	กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิตวิตคริสตัล
--	---	---

<pre>% set current current=20; flux=current(i)*current(i)*0.023197/(0.269*0.26); h=flux/(Tyel-Tjet);</pre>	}	หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากสมการ (3.8)
--	---	--

<pre>%----- %zero matrix prepared for dump data M=zeros(cy+1,cx+1);</pre>	}	สร้างแมทริกส์ M ที่มีเลขศูนย์ทั้งหมด ซึ่งมี ขนาดจำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาว เท่ากับขนาดของพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่น เทอร์โมลิตวิตคริสตัล
---	---	---

<pre>%image file input name=char(filename(i)) image=imread(name);</pre>	}	ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิตวิตคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®
---	---	--

<pre>%crop imaged=imcrop(image,rect);</pre>	}	ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่น เทอร์โมลิตวิตคริสตัล
---	---	---

<pre>%size of cropped image [a1,b1,c1]=size(imaged);</pre>	}	กำหนดตัวแปรเพื่อแทนจำนวนพิกเซลด้านกว้าง และด้านยาวของภาพแผ่นเทอร์โมลิตวิตคริสตัล
--	---	---

<pre>%divided to R,G,B image R=imaged(:,1); G=imaged(:,2);</pre>	}	ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่น เทอร์โมลิตวิตคริสตัล
--	---	---

```
B=imaged(:,3);
```

```
%normalize r,g,b image
```

```
r=(double(R)-double(RB))./(double(RMax)-double(RB));
g=(double(G)-double(GB))./(double(GMax)-double(GB));
b=(double(B)-double(BB))./(double(BMax)-double(BB));
```

หาค่า rgb ให้ตรงกับที่
แสดงในเงื่อนไขในสมการ
(3.10)-(3.12)

```
for j=1:a1
    for k=1:b1
        if (abs(r(j,k)-g(j,k))<0.01) & (b(j,k)<0.2)
            jj=double(j-a1/2.0);
            kk=double(k-b1/2.0);
            Nu=(h*16.5/1000.0/0.02604);
            imaged(j,k,:)=255;
            M(j,k,:)=Nu;
        end
    end
end
```

หาเส้นสีเหลืองที่ปรากฏบนแผ่น
เทอร์โมลิควิดคริสตัลโดยสร้าง
เงื่อนไขที่ค่า r ใกล้เคียงกับค่า g
แล้วแทนค่าดัชนีเซลล์ด้วยเบอร์ลิง
ในแมตริกส์ M ให้ตรงกับพิกัดของ
เส้นสีเหลือง

ภข 3 โปรแกรม MATLAB® สำหรับสร้างกราฟการแยกตัวประกอบสี H ภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ HUE

<pre>p1= position x p2=position y p3=distance x p4=distance y rect=[p1 p2 p3 p4];</pre>	}	กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล
<pre>Hue1=imread(name); Hue2=imcrop(Hue1,rect);</pre>	}	ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®
<pre>Hue3=double(Hue2)/255; r=Hue3(:, :, 1); g=Hue3(:, :, 2); b=Hue3(:, :, 3);</pre>	}	ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล
<pre>Angle=acos((0.5*((r-g)+(r-b)))/((sqrt((r-g).^2+(r-b).*(g-b))))); %angle Hue4=Angle; %B<=G Hue4(b>g)=2*pi-Hue4(b>g); %B>G</pre>	}	แปลงจากระบบสี RGB สู่อะบบ HUE
<pre>H=Hue4/(2*pi); S=1-3.*(min(min(r,g),b))./(r+g+b); I=(r+g+b)/3;</pre>	}	
<pre>%HSI Average Have=sum(H(:))/numel(H);</pre>	}	หาค่าเฉลี่ยค่า H

ภข 4 โปรแกรม MATLAB® สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ HUE

```
l=24.5;
R=0.023197;
A=0.06994; % m^2
q=(l^2)*R/A;
Tj=28.5;
D=0.0165;
Kair=0.02604;
```

เซตตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

```
%crop size Background
pb1= position x
pb2= position y
pb3=distance x
pb4=distance y
rect=[pb1 pb2 pb3 pb4];
```

กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัล

```
% load figure
Hue='figure name.jpg';
Hue1=imread(Hue);
Hue2=imcrop(Hue1,rect);
```

ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®

```
% divided to R,G,B Background image
Hue3=double(Hue2)/255;
r=Hue3(:,1);
g=Hue3(:,2);
b=Hue3(:,3);
```

ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบน
แผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัล

```
% RGB to HSI
Angle=acos((0.5*((r-g)+(r-b)))/((sqrt((r-g).^2+(r-b).*(g-b))))); %angle
Hue4=Angle;          %B<=G
Hue4(b>g)=2*pi-Hue4(b>g);    %B>G
H=Hue4/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(r,g),b))./(r+g+b);
I=(r+g+b)/3;
```

แปลงจากระบบสี
RGB สู่ระบบ HUE

```
%----- H to temperature distribution -----
```

```
[a,b]=size(H);
```

```
Tem=zeros(a,b);
```

```
for j=1:a;
```

```
    for k=1:b;
```

```
        T=(22183*H(j,k)^6)-(4933*H(j,k)^5)+(43913*H(j,k)^4)
```

```
        -(19914*H(j,k)^3)+(4829*H(j,k)^2)-584.5*H(j,k)+56.62;
```

```
        Tem(j,k)=T;
```

```
    end
```

```
end
```

ใช้ ไดอะแกรม ให้เป็น
ฟังก์ชันของค่า H ตาม
สมการ (3.13) แล้วหา
ค่าอุณหภูมิที่กระจายบน
พื้นผิวแต่ละจุด

```
% -----temperatue to Nusselt number-----
```

```
[a,b]=size(Tem);
```

```
Nu=zeros(a,b);
```

```
for j=1:a;
```

```
    for k=1:b;
```

```
        h=q/(Tem(j,k)-Tj);
```

```
        Nu1=h*D/Kair;
```

```
        Nu(j,k)=Nu1;
```

```
    end
```

```
end
```

คำนวณค่าตัวเลขที่
เบอร์ที่กระจายแต่ละจุด

ภาคผนวก ฅ1

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2551
จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 676-681.

การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

A study flow and heat transfer characteristics on a surface with air jet impingement

มักตาร์ แวะหะยี¹ ชยุต นันทดุษิต²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

Makata Waehahyee¹ Chayut Nuntadusit²

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะพุ่งชนของเจ็ท (ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว) ที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในกรณีที่เจ็ทอากาศจากท่อพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในการทดลองได้ใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 16.5 mm สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยระยะพุ่งชน $L/D = 2, 4, 6, 8$ และ 10 โดยที่ค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทกำหนดไว้ที่ $46,400$ สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้ใช้วิธีเชิงทัศนคือ เทคนิคฟิล์มน้ำมันเพื่อดูลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว และศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) ในการวัดการกระจายอุณหภูมิและคำนวณหาการกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากการทดลองพบว่าที่ระยะ $L/D=8$ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิว

คำหลัก เจ็ทพุ่งชน, พฤติกรรมการไหล, คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน

Abstract

In this study, flow and heat transfer characteristic of impinging jet on a surface was investigated. The jet flow from a nozzle pipe which has 16.5 mm in diameter impinges normally to the surface. We also studied the effect of distance between nozzle and impinged surface $L/D=2, 4, 6, 8$ and 10 at constant jet Reynolds number of $46,400$. Flow patterns on an impinged surface were visualized using oil film technique. Heat transfer distributions on a surface were measured using temperature sensitive liquid crystal (TLC)

sheet. The experimental results show that the heat transfer rate was maximum when the distance between nozzle and impinged surface L/D is 8 .

Keywords: Impinging jet, Flow pattern, Heat transfer characteristic

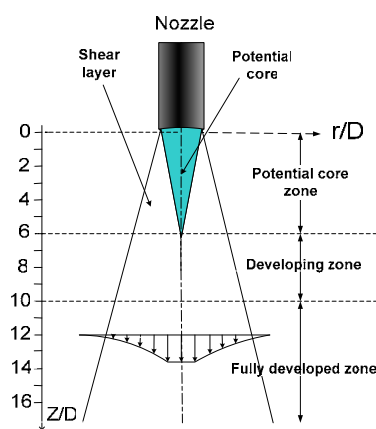
1. บทนำ

การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนสามารถพบได้ในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบายความร้อน การให้ความร้อนบนพื้นผิว ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมผลิตแกว อุตสาหกรรมแผ่นโลหะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่ง ที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงบนพื้นผิวเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการระบายความร้อนหรือให้ความร้อนแบบรวดเร็ว อีกทั้งวิธีนี้ยังมีประสิทธิภาพการพาความร้อนที่สูงโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้

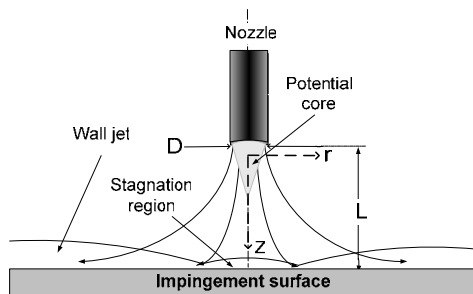
โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ Potential core zone, Developing zone และ Fully developed zone ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ Potential core เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด ของไหลมีความเร็วคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากเจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีดจะมีบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ทจาก Potential core จนถึงบริเวณที่ของไหลหยุดนิ่งอยู่กับที่เรียกว่า Shear layer และที่ระยะห่างจากปากทางออกหัวฉีด ความหนาของ Shear layer จะเพิ่มขึ้นและขนาดของ Potential core จะลดลงและจะเริ่มหายไปในที่ที่สุด และจะเข้าสู่ช่วง Developing zone ที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วภายในเจ็ทจะค่อย ๆ ลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนว

รัศมี ค่าความแปรปรวน (Turbulent intensity) ที่แกนของเจ็ทจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้ หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วง Fully developed zone เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์แล้ว ซึ่งรูปทรงของหัวฉีดจะมีผลต่อโครงสร้างของการไหลของเจ็ทเป็นอย่างมาก

สำหรับกรณีที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวนั้น จะสามารถแบ่งโครงสร้างการไหลได้ออกเป็น 3 ส่วน คือ Free jet zone, Stagnation zone และ Wall jet zone ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่ Free jet zone จะเป็นช่วงการไหลก่อนเจ็ทจะพุ่งชนผนัง และ Stagnation zone เป็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนผนังและมีการเปลี่ยนทิศทางการไหล และ Wall jet zone เป็นบริเวณที่ของไหลไหลบนผนัง ซึ่งคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเจ็ทอิสระก่อนพุ่งชนผนังและระยะพุ่งชนของเจ็ท



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของเจ็ทอิสระ



รูปที่ 2 โครงสร้างทั่วไปของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว

Poreh และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับระดับของความความแปรปรวนและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนผนัง โดยใช้หัวฉีดที่มีทางออกหน้าตัดรูปวงกลม จากการศึกษาพบว่าบริเวณของเจ็ทผนัง (wall jet) ความเร็วของการไหลจะลดลงและความหนาของชั้นขอบเขตบนผนังจะเพิ่มขึ้น โดยจะแปรผันตรงตามระยะห่างจากจุดกึ่งกลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยทั่วไปแล้วชั้นขอบเขตจำกัดจะเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังลดลง

Popiel และ Boguslawski [2] ได้เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดแบบ Orifice และแบบ Bell-shape โดย

กำหนดค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทที่เท่ากัน ผลออกมาคือหัวฉีดแบบ Orifice จะมีความเร็วในแนวศูนย์กลางสูงกว่าหัวฉีดแบบ Bell-shape ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ใช้แบบ Orifice จะสูงกว่าแบบ Bell-shape ทุกๆตำแหน่งรัศมีที่เจ็ทกระจายบนผนัง

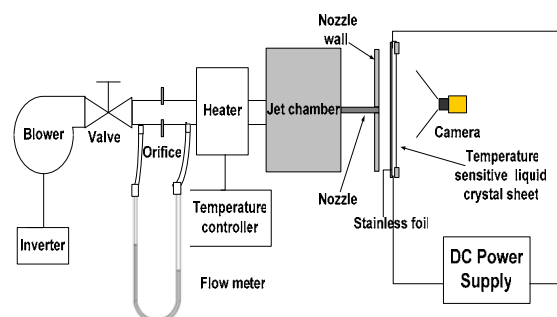
Baughn และ Shimizu [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยใช้หัวฉีดที่เป็นลักษณะท่อยาว ได้นั้นศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงแผ่นระบายที่เจ็ทพุ่งชน จากการที่ได้ศึกษาปรากฏว่า ที่ระยะเจ็ทพุ่งชน $L/D=6$ จะมีค่า Nusselt number สูงสุดบริเวณกึ่งกลางเจ็ทพุ่งชน และนอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะ $L/D < 2$ ค่า Nusselt number จะมีค่าสูงสุด (Peak) หลายตำแหน่งตามรัศมีที่เจ็ทพุ่งชน

วัตถุประสงค์ในการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิว โดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm ศึกษาในกรณีที่เจ็ทพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะพุ่งชน $L/D = 2, 4, 6, 8$ และ 10 และค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทคงที่ที่ $Re=46,400$

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดการทดลอง

เจ็ทอากาศที่ใช้ในการทดลองจะถูกส่งจากโบรเวอร์ ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านชุดของออรัฟฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และชุดฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าถึงกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนังโดยใช้แผ่น

Temperature sensitive liquid crystal (TLC)

ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวเพื่อระบายความร้อน สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดบนด้านหลังของผนังที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งทำจากสแตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm

แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีสเหลือง สีเขียว สีนํ้าเงิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 35°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิทัลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก R, G, B และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิ

สำหรับการให้ความร้อนแก่ผนังหรือแผ่นสแตนเลสนั้นจะทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงผ่านแผ่นสแตนเลส โดยที่อัตราการเกิดความร้อนจากแผ่นสแตนเลสสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q_{\text{input}} = \frac{I^2 R}{A} \quad (1)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q_{\text{input}}}{T_{\text{LC}} - T_j} \quad (2)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวฟุ้งชนจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทที่ปากทางออก และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (3)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้เนื่องจากการเกิดความร้อนบนผนังสแตนเลส นั้นสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังจึงมีค่าคงที่ และจากสมการ (2) เส้นแถบสีของแต่ละอุณหภูมิจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ เพื่อให้สามารถศึกษาการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลของเจ็ทนั้นคือความเร็วเจ็ทและระยะฟุ้งชนให้คงเดิม แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่ง และหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงบันทึกโดยกล้องดิจิทัล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

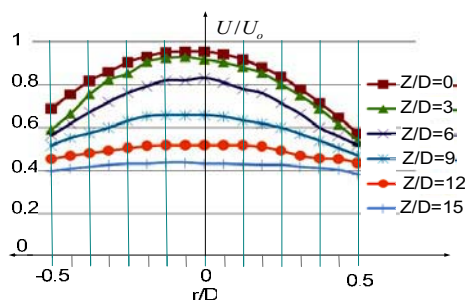
2.3 การศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้วิธี Oil film technique

ในงานวิจัยนี้เพื่อดูพฤติกรรมของการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวจะใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) ในการศึกษา โดยในการทดลองจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนและบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทฟุ้งชนจะทาสีน้ำมันที่มีส่วนผสมของ Paraffin แบบเหลว, ผง Titanium dioxide และกรด Oleic บางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจึงเริ่มให้เจ็ทฟุ้งชนพื้นผิว และจะสังเกตพฤติกรรมของการไหลบนพื้นผิวจากการไหลของชั้นน้ำมัน โดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ

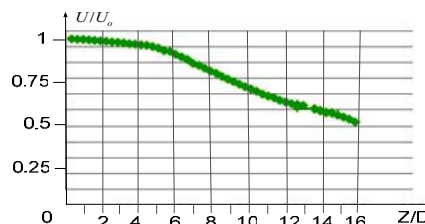
3. ผลการทดลอง

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังของเจ็ทฟุ้งชนพื้นผิวจะใช้เจ็ทจากท่อเจ็ทที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเจ็ท $D=16.5$ mm มีความยาว 300 mm โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทที่ $Re=46400$ และเปลี่ยนแปลงระยะฟุ้งชนในช่วง $L/D=2, 4, 6, 8$ และ 10

3.1 ผลการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ



รูปที่ 4 การกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวรัศมี (r/D) ที่ระยะ Z/D แต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 5 การเปลี่ยนความเร็วภายในแกนเจ็ท ($r/D=0$) ที่ระยะ Z/D ต่างๆ

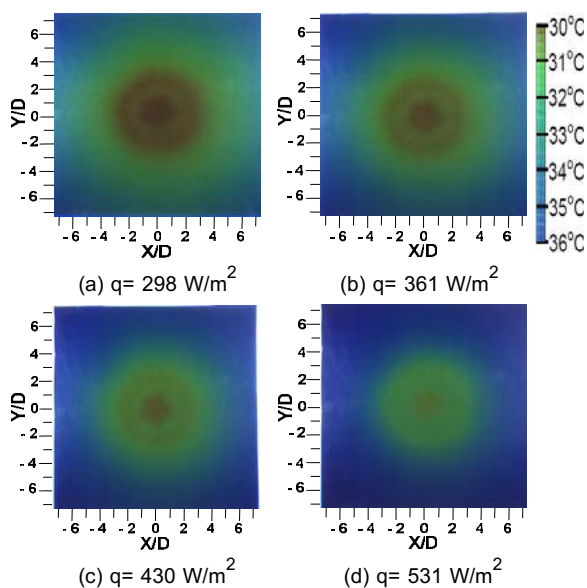
ในงานวิจัยนี้ก่อนการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทฟุ้งชน ได้ทำการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ โดยที่ U คือค่าความเร็วของเจ็ทในแนวแกนเจ็ท และ U_0 คือความเร็วของเจ็ทที่ปากทางออกที่ตำแหน่งกลางท่อเจ็ท

จากผลการวัดการกระจายความเร็วเจ็ทตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง Z/D ต่างๆ (รูปที่ 4) พบว่าการกระจายความเร็วของเจ็ทที่ตำแหน่งปากทางออก ($Z/D=0$) มีลักษณะการกระจายแบบพาราโบลา มีความเร็วสูงสุดที่กึ่งกลางท่อเจ็ท ($r/D=0$) และจะค่อยๆ ลดลงตามรัศมีที่ท่อเจ็ท และที่ระยะห่างจากปากทางออก Z/D เพิ่มขึ้น

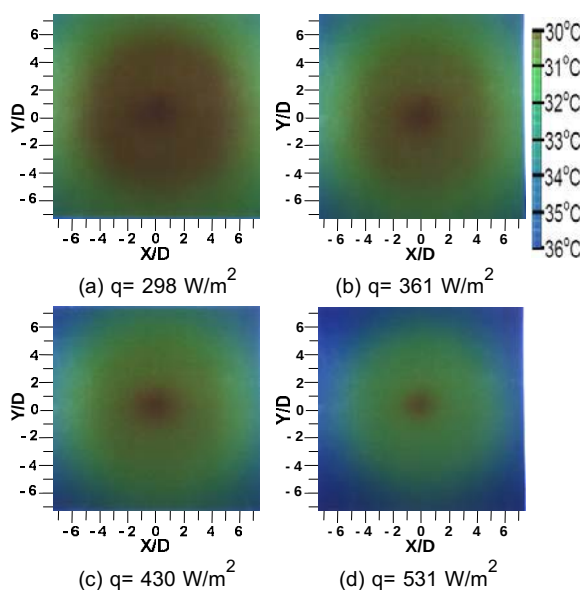
ความเร็วของเจ็ทจะลดลงตามลำดับแต่ยังคงรูปแบบการกระจายตัวแบบพาราโบลาอยู่

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวแกนเจ็ทของ (ที่ $r/D=0$) ที่ตำแหน่ง Z/D ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า จากปากทางออกเจ็ท ความเร็วจะลดลงอย่างช้าๆ จนถึงตำแหน่ง $Z/D=6$ ซึ่งเป็นบริเวณของ Potential core หลังจากนั้นความเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ $Z/D>6$ เนื่องจากบริเวณ Potential core หดไป หรือในกรณีที่เจ็ทพุ่งชนผนัง โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังจะลดลงในกรณีนี้ระยะพุ่งชนของเจ็ท $L/D>6$

3.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 6 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ เมื่อเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน $L/D=8$ เมื่อเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 6 และ รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างผลการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังโดยใช้แผ่น TLC ของกรณีระยะพุ่งชน และ 8 ตามลำดับ และแถบสีในแต่ละรูปแสดงอุณหภูมิของสีต่างๆ ที่ปรากฏบนแผ่น TLC ที่ได้จากการสอบเทียบสีและอุณหภูมิ ในแต่ละรูปบริเวณที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง และบริเวณที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ และในแต่ละรูปหากสังเกตบริเวณแถบสีแดงจะพบว่า เมื่อฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น แถบสีแดงจะเป็นบริเวณที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นด้วย และจากผลการทดลองของกรณีระยะพุ่งชน $L/D=2$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะสูงที่สุดบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ($X/D=0, Y/D=0$ หรือ $r/D=0$) และหลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงและจะเกิดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงสุดอันดับที่สองที่ระยะ $r/D=2$ ห่างจากจุดเจ็ทพุ่งชน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามลำดับเมื่อห่างจากจุดเจ็ทพุ่งชนมากขึ้นระยะพุ่งชน $L/D=2$

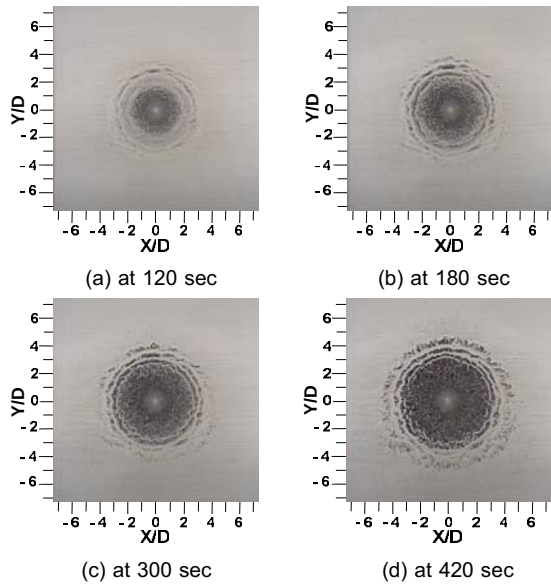
3.3 ผลการศึกษาการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

รูปที่ 8 และ รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างผลการศึกษาพฤติกรรม การไหลของเจ็ทบนพื้นผิวโดยเทคนิคฟิล์มน้ำมัน ในกรณีระยะพุ่งชน และ 8 ตามลำดับ ในแต่ละรูปจะแสดงภาพของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ หลังจากเจ็ทเริ่มพุ่งชน โดยที่บริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมันและบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ไม่มีฟิล์มน้ำมัน

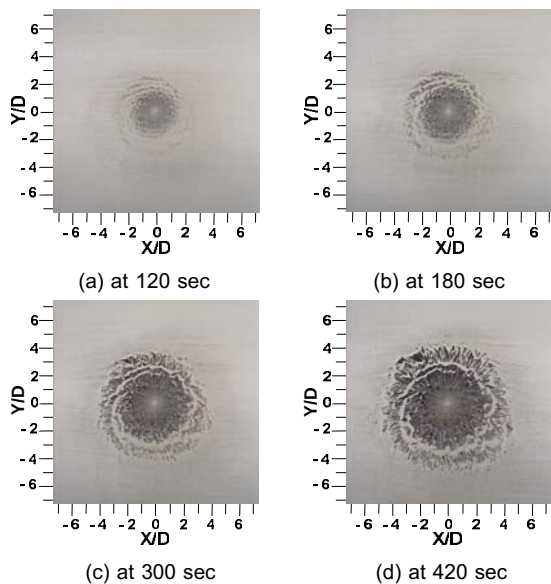
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว และระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งจะเห็นการพัดพาของชั้นฟิล์มน้ำมันเกิดขึ้นเป็นบริเวณต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ

1. Stagnation point เป็นจุดที่ความเร็วเจ็ทเป็นศูนย์ ไม่มีการพัดพาของชั้นฟิล์มน้ำมัน หากสังเกตจะพบว่ามี ฟิล์มน้ำมัน บางๆ ติดอยู่บริเวณจุดพุ่งชนทุกผลการทดลอง
2. Stagnation region เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางความเร็วที่ไหลออกจากเจ็ทในแนวแกนเมื่อชนพื้นผิวจะเปลี่ยนทิศทางเป็นแนวรัศมีอย่างกระทันหัน ซึ่งก่อนที่เจ็ทจะเปลี่ยนทิศทางในแนวรัศมี ความเร็วของเจ็ทในแนวรัศมีจะเป็นศูนย์จากนั้นจึงเพิ่มความเร็วขึ้น บริเวณนี้จะมีการพัดพาของชั้นฟิล์มน้ำมัน มากที่สุด หากสังเกตผลการทดลองบริเวณนี้จะไม่มีการพัดพาฟิล์มน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่ากรณีระยะพุ่งชน $L/D=2$ จะมีบริเวณนี้กว้างกว่ากรณีของ $L/D=8$

3. Wall jet region เป็นบริเวณที่เจ็ทไหลรอบๆ Stagnation region บนผนังหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลงและชั้นขอบเขตการไหลบนผนังจะค่อยๆ หนาขึ้น และมีลักษณะเป็นจุดขาวหรือเส้นขาวของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว สามารถสังเกตได้ชัดเจนในกรณีระยะพุ่งชน $L/D=8$



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีระยะพุ่งชน $L/D=2$ ที่เวลาต่างๆ

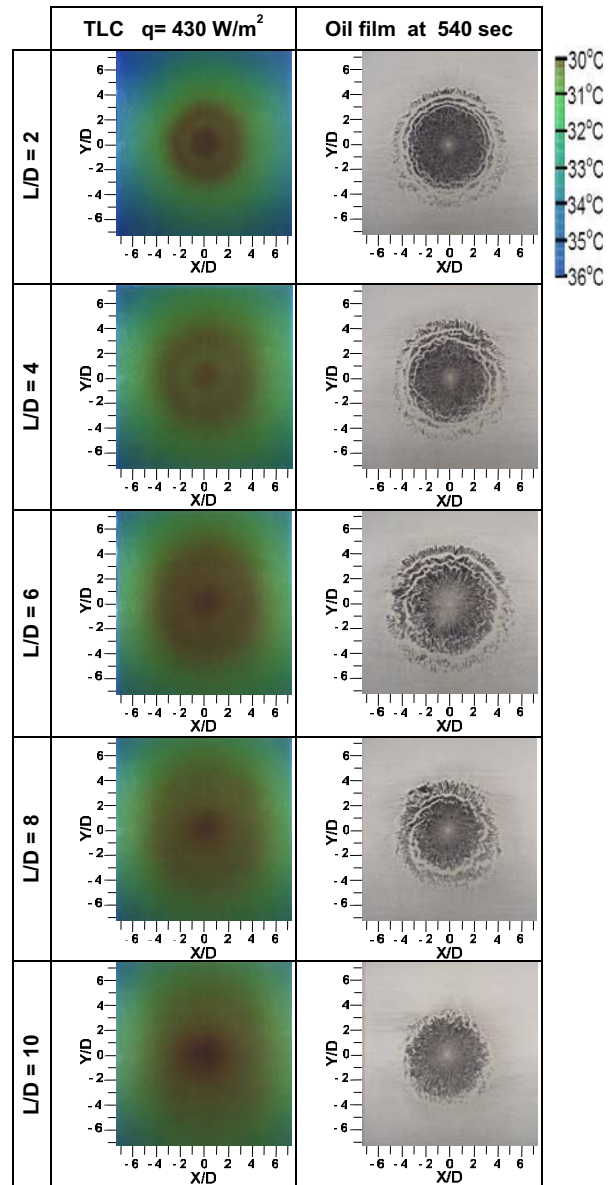


รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีระยะพุ่งชน $L/D=8$ ที่เวลาต่างๆ

3.4 การเปรียบเทียบผลกระทบจากระยะพุ่งชนของเจ็ท

รูปที่ 10 เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทและการไหลของเจ็ทบนผนังที่พุ่งชนบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน $L/D=2, 4, 6, 8$ และ 10 โดยที่ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังคงที่ $q = 430 \text{ W/m}^2$ และผลการทดลองการไหลของเจ็ทบนผนังได้หลังจากที่เจ็ทเริ่มพุ่งชน 540 sec จากผลการเปรียบเทียบพบว่าที่ทุกระยะพุ่งชน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชน $r/D=0$ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามแนวรัศมีที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน และในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D=2, 4$ จะปรากฏบริเวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอันดับที่สองที่ตำแหน่ง $r/D=2$

ในขณะที่ระยะพุ่งชน $L/D=6, 8, 10$ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวรัศมีจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน

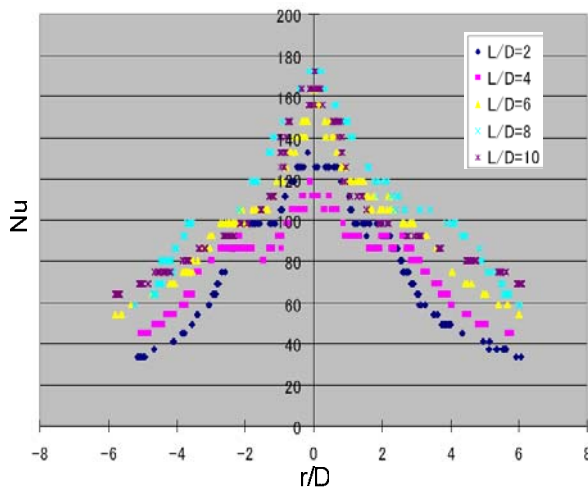


รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลจากระยะพุ่งชน L/D ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

จากการเปรียบเทียบผลของการไหลบนผนังพบว่า บริเวณของ Stagnation region จะกว้างมากที่สุดที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ และเมื่อระยะพุ่งชน L/D เพิ่มขึ้นบริเวณของ Stagnation region จะลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ และ 4 Potential core ของเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง แต่เนื่องจากที่ระยะห่างจากปากทางออก $Z/D>6$ Potential core ของเจ็ทจะหมดไปและความเร็วของเจ็ทที่ชนผนังจะลดลง ทำให้โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังจะลดลง และบริเวณของ Stagnation region จะแคบลง แต่สามารถสังเกตบริเวณของ Wall jet region ได้ชัดเจนขึ้น

3.5 การกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 11 แสดงการกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีที่ระยะพุ่งชน L/D ต่างๆ ซึ่งได้จากการใช้เทคนิคประมวลผลภาพของแผ่น TLC ที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนผนังต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ค่า Nusselt number จะสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชนหรือจุด Stagnation point ($r/D=0$ บนพื้นผิว) ของทุกระยะพุ่งชน โดยที่ค่า Nusselt number สูงสุดที่ตำแหน่งนี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการที่ความแปรปรวนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวสูงขึ้นจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ทุกระยะพุ่งชน L/D จะมีลักษณะคล้ายกันคือ Nusselt number จะสูงสุดที่จุด Stagnation point จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีที่เจ็ทพุ่งชน แต่ที่ระยะ $L/D=2$ การกระจายตัวของ Nusselt number ค่อนข้างที่จะแตกต่างจากระยะพุ่งชนอื่นๆ คือ ที่ตำแหน่ง r/D ประมาณ -2 และ 2 จะมีค่า Nusselt number สูงสุดอันดับที่สองเกิดขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากการที่ระยะพุ่งชนนี้ Potential core ของเจ็ทที่เป็นช่วงการไหลที่มีความเร็วใกล้เคียงกับที่ปากทางออกของเจ็ทและมีระดับความแปรปรวนค่อนข้างที่จะต่ำพุ่งชนบนผนัง หลังที่เจ็ทไหลในแนวรัศมีแล้วความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้เกิดเป็นค่า Nusselt number สูงสุดอันดับที่สอง [4] และในบริเวณ $0 < r/D < 4$ พบว่ากรณีระยะพุ่งชน $L/D=8$ จะมีค่า Nusselt number สูงกว่ากรณีอื่นๆ ทุกตำแหน่ง



รูปที่ 11 การกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีที่ระยะพุ่งชนต่างๆ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง ในกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศเดี่ยวจากท่อเจ็ท พบว่า

- (1) ค่า Nusselt number หรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชนหรือจุด Stagnation point และจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวรัศมีบนพื้นผิวสำหรับทุกระยะพุ่งชน และในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D=2, 4$ ที่ระยะห่างจากจุดพุ่งชน r/D ประมาณ 2 จะมีค่า Nusselt number สูงสุดอันดับที่สองเกิดขึ้น
- (2) ระยะพุ่งชน L/D มีผลต่อค่า Nusselt number สูงสุดที่จุดเจ็ทพุ่งชน เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มมากขึ้นค่า Nusselt number สูงสุดจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะพุ่งชน $L/D=8$ จะมีค่า Nusselt number สูงกว่ากรณีอื่นๆ ทุกตำแหน่งในบริเวณ $0 < r/D < 4$
- (3) ระยะพุ่งชน L/D มีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนผนัง ในกรณีที่ $L/D < 6$ ส่วน Potential core ของเจ็ทจะพุ่งชนผนังทำให้เกิด Stagnation region บนผนังเป็นบริเวณกว้าง และกรณีที่ $L/D > 6$ เนื่องจาก Potential core ของเจ็ทหมดไป ทำให้โมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนผนังน้อยลง สามารถสังเกต Wall jet region บนผนังได้ชัดเจน และการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นนี้อาจเกิดจากความแปรปรวนของเจ็ทและการไหลบนผนังที่เพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pepeh, M., Tsuei, Y.G. and Cemak, C. R. 1967. Investigation of a turbulent radial wall jet. J. Appl. Mech, 34:457-463
- [2] Popiel, C. O. and Boguslawski, L. 1986. Mass or heat transfer in impinging single, round jets emitted by a bell-shaped nozzle and sharp-ended orifice. J. Heat transfer 3:1187-1192
- [3] Baughn, J. W. and Shimizu, S. 1989. Heat transfer measurement from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. J. Heat transfer, 111:1096-1098.
- [4] Lytle, D., and Webb, B.W., 1991 Secondary heat transfer maxima for air jet impingement at low nozzle-to-plate spacing. J. Experimental heat transfer, Elsevier :776-783

ภาคผนวก ฅ2

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเซีย จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทกลุ่มที่พุ่งชนพื้นผิว HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF MULTIPLE IMPINGING JETS ON A FLAT SURFACE

มักตาร์ แวะหะยี

ชยุต นันทกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

อ.ศิ บุญจิตราดุลย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ.กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ในการทดลองนี้ได้ใช้เจ็ทจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ ที่เรียงกันเป็น 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=2, 4, 6, 8$, และ 10 ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1, 2, 3, 4$, และ 5 โดยที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทคงที่เท่ากับ 30,000 สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของบนพื้นผิวได้ใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน นอกจากนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีระยะห่างระหว่างเจ็ทน้อยจะมีความซับซ้อนเนื่องจากอิทธิพลของลำเจ็ทที่อยู่ติดกันและในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทมากขึ้นจะปรากฏบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนต่ำ และที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1$ และระยะพุ่งชน $L/D=8$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงและสม่ำเสมอที่สุด

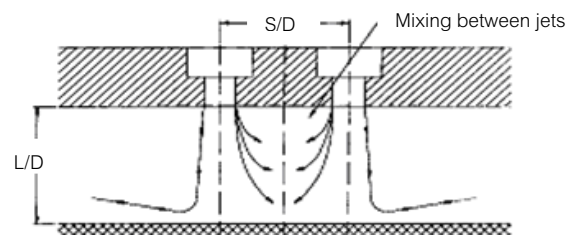
1. บทนำ

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเจ็ทของไหลและพื้นผิววิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การระบายความร้อนในพัดลมเทอร์โบ ใบพัดเครื่องยนต์อากาศยาน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง โดยเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) แต่ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่หรือกรณีที่ต้องการควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผนังที่สม่ำเสมอ เช่น การให้ความร้อนแผ่นฟิล์ม แผ่นโลหะ จะใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนแทนเจ็ทแบบเดี่ยว

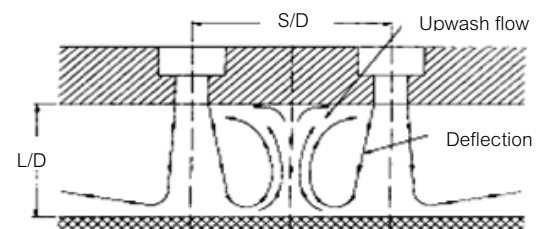
สำหรับการพุ่งชนของเจ็ทเดี่ยวบนพื้นผิว ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนหรือระยะพุ่งชน จะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทขณะพุ่งชนพื้นผิวและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเนื่องจากเจ็ทของไหลที่ออกจากหัวฉีดจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเจ็ทที่ระยะต่างๆ จากหัวฉีด ส่วนโมเมนตัมและความปั่นป่วนภายในเจ็ทขณะพุ่งชนจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

สำหรับกรณีของเจ็ทกลุ่ม โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยว นอกจากระยะพุ่งชนแล้ว การจัดเรียงของเจ็ทและระยะห่างระหว่างเจ็ทจะมีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว กรณีที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดน้อย ก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดปรากฏการณ์การผสมระหว่าง

เจ็ทที่อยู่ติดกัน ทำให้โครงสร้างการไหลของเจ็ทแตกต่างจากกรณีของเจ็ทเดี่ยว นอกจากนี้หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนัง (Wall jet) ที่อยู่ติดกันแล้วเกิดการไหลขึ้นจากผนัง (Upwash flow) ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังที่บริเวณนี้ซับซ้อนยิ่งขึ้น [1]



(ก) ปรากฏการณ์การผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ติดกัน



(ข) ปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนังที่อยู่ติดกัน รูปที่ 1 แสดงปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในกลุ่มเจ็ท [1]

San และ Lai [1] ได้ทำการทดลองใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิว 5 ลำ โดยการจัดเรียงหัวฉีดให้ 1 ลำอยู่ตรงกลาง และอีก 4 ลำที่เหลือล้อมรอบเป็นสี่เหลี่ยมโดยที่ด้านกว้างลำเจ็ทจะทำมุมต่อกัน 60° และด้านยาวจะทำมุม 120° โดยที่ค่าเรย์โนลด์ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง $Re=10,000 - 20,000$ จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ท โดยที่ระยะพุ่งชน $L/D = 8$ พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=2$ จะเหมาะสมที่สุด และในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D = 2$ พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D = 3$ จะเหมาะสมที่สุด

นอกจากนี้ San และคณะ [2] ได้ใช้ชุดทดลองรูปแบบเดียวกันทำการทดลองในกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททั้งหมดให้เท่ากัน และอีกกรณีปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบให้แตกต่างกัน โดยทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ $Re=5,000 - 15,000$ จากผลการทดลองพบว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทให้เท่ากันทั้งหมด อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะต่ำกว่าเจ็ทที่อยู่รอบๆ และกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบให้แตกต่างกัน โดยให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางคงที่และปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่รอบให้สูงขึ้น พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะสูงขึ้นตามการเพิ่มค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่รอบ

Barata [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน 3 ลำ กรณีเรียงเป็นแถว ผลการทดลองได้เสนอเกี่ยวกับที่มาของการเกิดกระแสไหลวนขึ้น (Upwash flow) ว่าเกิดจากจากเจ็ท 2 ลำที่อยู่ติดกัน หลังจากเจ็ทพุ่งชนแล้วเกิดการไหลสวนทางกันบนผนังแล้วเกิดการปะทะและไหลจากผนังขึ้นด้านบน

Brevet และคณะ [4] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนที่เรียงกันแบบ 1 แถว และ 3 แถว ในแต่ละแถวจะมีเจ็ทเรียงกัน 3 ลำ โดยจำลองชุดทดลองให้เหมือนลักษณะการระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ คือ ปรับให้กระแสลมทิ้ง (Spent air) หลังจากเจ็ทพุ่งชนแล้วไหลไปยังทางออกทางเดียว จากผลการทดลองปรากฏว่า เจ็ทที่เรียงกัน 3 ลำ จะเหมาะสำหรับการนำไปใช้จะอยู่ในช่วงระยะพุ่งชน $L/D = 2-5$ และในช่วงระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=3$ จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และหากมีการเพิ่มค่าเรย์โนลด์พร้อมกับลดระยะห่างระหว่างเจ็ทแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในกรณีที่เจ็ทอากาศที่พ่นออกมาจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) จำนวน 9 ท่อที่เรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ เนื่องจากในกรณีนี้มีการผสมกันระหว่างเจ็ทที่ติดกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว และการชนกันของเจ็ทบนพื้นผิวเกิดขึ้น ทำให้การไหลและการถ่ายเทความร้อนซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยวมาก โดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ตรงกลางที่ถูกเจ็ทจากทั้งสี่ด้านล้อมรอบ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาผลของระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ถูกล้อมรอบทั้งสี่ด้านนี้ สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ท โดยที่กำหนดค่าเรย์โนลด์ของ

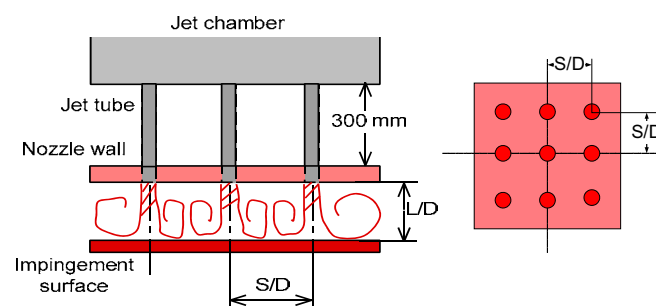
เจ็ทคงที่ เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เงื่อนไขตัวแปรต่างๆ

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

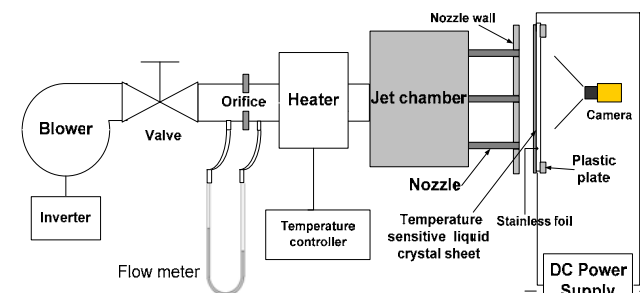
2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของโมเดลการทดลอง ในการทดลองจะใช้เจ็ทจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ เรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทและระยะระหว่างแถวของเจ็ทเท่ากัน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=2, 4, 6, 8$, และ 10 ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1, 2, 3, 4$, และ 5 โดยที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททุกการทดลองคงที่ $Re=30,000$ (ใช้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเจ็ทและความเร็วเจ็ทที่กลางปากทางออกท่อในการคำนวณค่าเรย์โนลด์ของเจ็ท)

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบเวอร์ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และจะผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าห้องกักอากาศและผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากเจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ท และผนังที่เจ็ทพุ่งชน ชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทได้



รูปที่ 2 แสดงโมเดลการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC)

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสแตนเลสจะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q = \frac{I^2 R}{A} \quad (1)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดบนด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 35°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิทัลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ แดง (R) เขียว (G) น้ำเงิน (B) และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายดาต้าลิงก์ในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่ร้อนเพื่อระบายความร้อน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q}{T_{LC} - T_j} \quad (2)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้องกักอากาศ และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวด้านบนได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (3)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้ เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC จะหมายถึงเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิที่คงที่ และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (2) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากันด้วย

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่แคบ (ประมาณ 5°C) เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม (ระยะพุ่งชน ระยะห่างระหว่างเจ็ท ความเร็วเจ็ท และอุณหภูมิของเจ็ท) แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าหรืออัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงบันทึกภาพแผ่น TLC โดย

กล้องดิจิทัล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

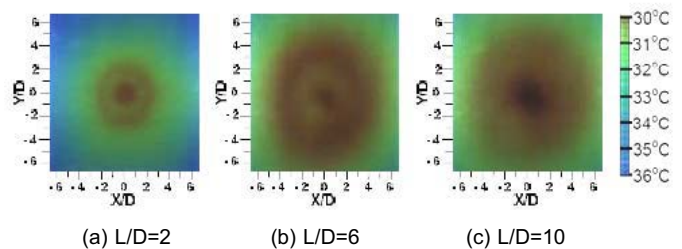
2.3 วิธีการศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique)

ในการทดลองนี้จะศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคเชิงทัศนฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) ในการทดลองจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชนแทนแผ่นสแตนเลส และบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทพุ่งชนจะทาลงน้ำมันสีชาที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์และกรดโอเลอิกบางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจะให้เจ็ทพุ่งชนผิวน้ำมัน และบันทึกการไหลของชั้นน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของผนังใส โดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังด้วย TLC

รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองกรณีของเจ็ทเดี่ยวที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$, 6 และ 10 ในรูปแสดงภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่เงื่อนไข $q=242 \text{ W/m}^2$ และ $T_j=28.5^\circ\text{C}$



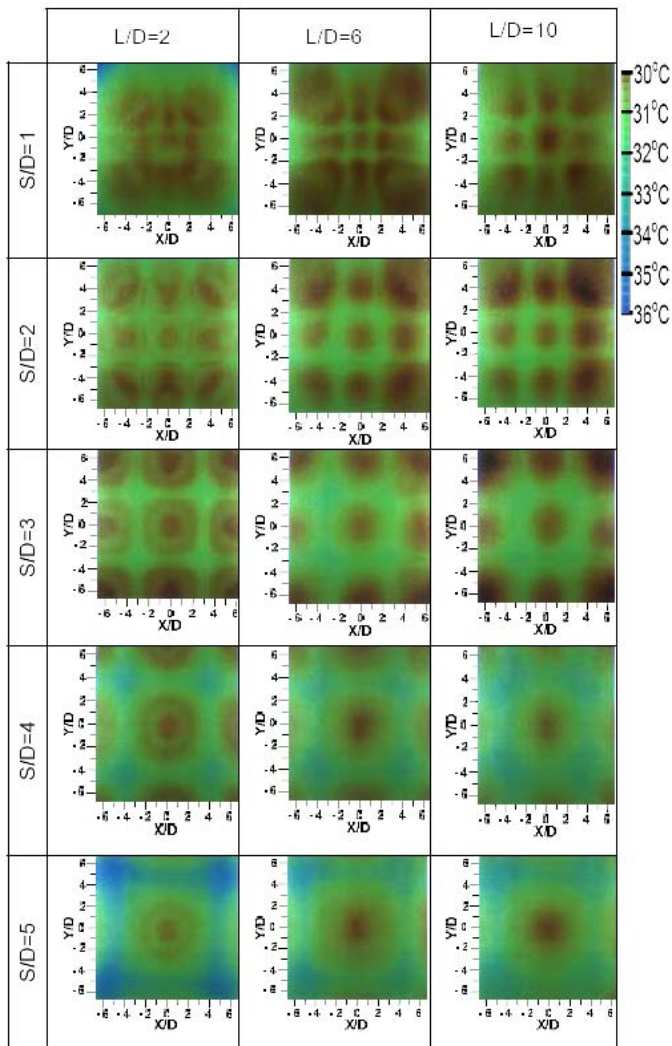
รูปที่ 4 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังของเจ็ทเดี่ยวที่ระยะพุ่งชนต่างๆ ($q=242 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=30,000$)

สำหรับสับบนแผ่น TLC จะแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอุณหภูมิต่ำและมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนอุณหภูมิจะสูงขึ้นและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองของเจ็ทเดี่ยว พบว่า เมื่อเพิ่มระยะพุ่งชน L/D บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำหรือบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงบนพื้นผิวจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเจ็ทมีการขยายหน้าตัดตามระยะจากปากทางออกเจ็ท หรือเมื่อระยะพุ่งชนมากขึ้น พื้นที่หน้าตัดเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบบจากระยะพุ่งชน L/D และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังของเจ็ทกลุ่ม โดยแต่ละผลการทดลองมีเงื่อนไข $q=242 \text{ W/m}^2$ และ $T_j=28.5^\circ\text{C}$

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างกรณีเจ็ทเดี่ยวและกรณีเจ็ทกลุ่มโดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ตรงกลางที่

ถูกเจ็ทจากทั้งสี่ด้านล้อมรอบ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ถูกล้อมรอบจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว โดยเฉพาะกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=6$ และ 10 หรือระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่างๆ เนื่องจากการไหลของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางถูกจำกัดโดยเจ็ทที่อยู่รอบๆ ทั้งสี่ด้าน และหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแล้วเจ็ทผนังจะถูกจำกัดบริเวณการไหลโดยเจ็ทผนังจากทั้งสี่ด้าน สังเกตได้จากกรณีของ $L/D=2$ และระยะห่างระหว่างเจ็ทในช่วง $S/D=1-3$ จะมีการกระจายอุณหภูมิของเจ็ทลำตรงกลางเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทกลุ่ม (ที่เงื่อนไข $q = 242 \text{ W/m}^2$ และ $T_j = 28.5^\circ\text{C}$)

สำหรับผลกระทบของระยะห่างระหว่างเจ็ท (S/D) ต่อการถ่ายเทความร้อนบนผนัง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทต่ำ ($S/D=1$) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอทุกระยะห่าง และเมื่อระยะห่างระหว่างเจ็ทเพิ่มขึ้น ($S/D=2, 3, 4, 5$) จะปรากฏบริเวณที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยตรงเป็นบริเวณกว้างขึ้น (บริเวณสี่เหลี่ยม) โดยเฉพาะบริเวณมุมที่เป็นรอยต่อระหว่างเจ็ท (ที่ล้อมรอบด้วยเจ็ททั้งสี่ลำ) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด (บริเวณสี่เหลี่ยมด้านใน) จะสังเกตได้ชัดเจนใน

กรณีที่ $S/D=5$, $L/D=2$ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้จะดีขึ้นเล็กน้อย

สำหรับผลกระทบของระยะห่างระหว่างเจ็ท (L/D) ต่อการถ่ายเทความร้อนบนผนัง พบว่ามีน้อยกว่าผลของระยะห่างระหว่างเจ็ท (S/D) โดยเฉพาะที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D>6$ เนื่องจากการไหลของเจ็ทตรงกลางบนผนังถูกจำกัดการไหลจากเจ็ทผนังของเจ็ทที่ล้อมรอบอยู่ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังไม่แตกต่างกันมากนัก รูปที่ 6 แสดงการกระจายของค่า Nusselt Number Nu บนแกน X/D ที่ผ่านตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทและระยะห่างระหว่างเจ็ท

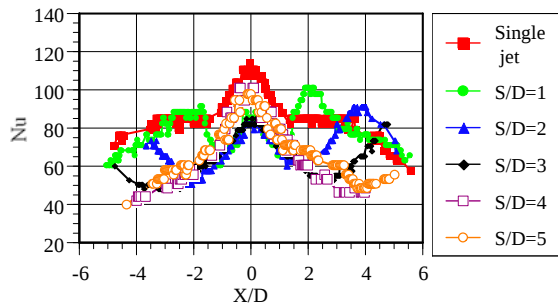
ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=2$ การเปลี่ยนแปลงค่า Nu ของกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1$ ค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ เนื่องจากระยะห่างระหว่างเจ็ทน้อย ส่วนที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=2$ ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางจะต่ำกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยวมาก เนื่องจากการผสมกันระหว่างเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ค่า Nu ของเจ็ทลำตรงกลางจะลดลงตามระยะห่างจากตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชน หลังจากนั้นค่า Nu จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากการพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ติดกัน แต่เนื่องจากอิทธิพลของเจ็ทลำตรงกลางทำให้ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่อยู่ติดกันถูกพัดพาให้ไกลออกไปจากตำแหน่งที่เจ็ทที่ $X/D = \pm 2$ และจากรูปพบว่า ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่อยู่รอบๆ จะมีค่าสูงกว่าค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่อยู่ตรงกลาง และที่ $S/D=3, 4$ ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางจะเพิ่มขึ้นและการเปลี่ยนแปลงค่า Nu จะลดลงคล้ายกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว เนื่องจากระยะห่างระหว่างเจ็ทเพิ่มขึ้นทำให้อิทธิพลจากเจ็ทลำที่อยู่ติดกันลดลง และสามารถสังเกตค่า Nu สูงสุดอันดับที่สองของเจ็ทลำตรงกลางที่ตำแหน่ง $X/D = \pm 2$ ได้

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=4$ ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำกลางจะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D แต่ค่าจะต่ำกว่ากรณีของเจ็ทแบบเดี่ยว และที่ระยะ $S/D=1$ การเปลี่ยนแปลงค่า Nu จะลดลงจากค่าสูงสุดที่ $X/D=0$ อย่างรวดเร็ว เนื่องจากอิทธิพลของเจ็ทผนังจากลำเจ็ทที่อยู่ติดกัน ส่วนที่ระยะ $S/D=3, 4, 5$ การเปลี่ยนแปลงของค่า Nu ในช่วง $-2 < X/D < 2$ จะคล้ายคลึงกับเจ็ทเดี่ยว ส่วนที่ระยะ $S/D=3$ จะสังเกตได้เช่นกันว่า ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางต่ำกว่าของเจ็ทที่อยู่ติดกัน

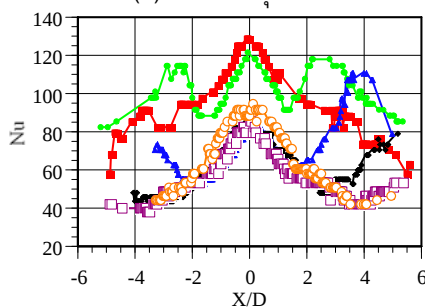
ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=6$ ที่ระยะ $S/D=1, 2, 3$ พบว่าค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าต่ำกว่าค่าของกรณีเจ็ทเดี่ยวมาก นอกจากนี้ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าต่ำกว่าของเจ็ทที่อยู่ติดกันด้วย และที่ระยะ $S/D=4, 5$ พบว่าค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าสูงขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงค่า Nu จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=8$ ที่ระยะ $S/D=1$ ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทแต่ละลำมีค่าใกล้เคียงกับค่า Nu สูงสุดของกรณีเจ็ทเดี่ยว ซึ่งแตกต่างจากผลของกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=2, 4, 6$ คาดว่าอาจเกิดจากระยะห่างที่เจ็ทขยายตัวและการรวมตัวของเจ็ทที่อยู่ติดกันก่อนพุ่งชนผนัง ส่วนที่ระยะ $S/D=2, 3$ ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยวมาก แต่ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่ติดกันของกรณี $S/D=2$ มีค่าสูงกว่าของเจ็ทลำตรงกลางมาก และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทเป็น $S/D=5$ พบว่าค่า Nu ของเจ็ทลำตรงกลางจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และสำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $L/D=10$

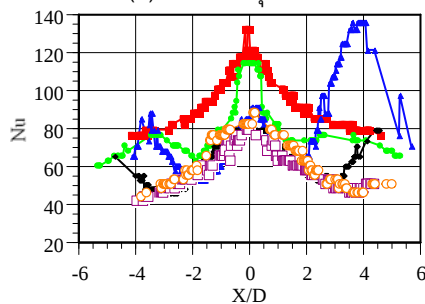
การกระจายของค่า Nu จะมีแนวโน้มคล้ายกับการกระจายของ $L/D=8$ แต่ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ต $S/D=1$ ค่า Nu สูงสุดของลำเจ็ตที่อยู่ติดกันจะน้อยกว่าของลำเจ็ตที่อยู่ตรงกลางมาก ซึ่งอาจเกิดจากเจ็ตที่อยู่รอบข้างรวมตัวกับเจ็ตที่อยู่ตรงกลาง



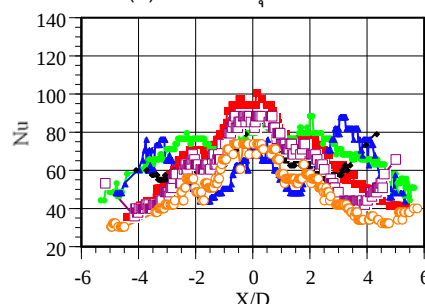
(ก) กรณีระยะพ่นเจ็ต $L/D=2$



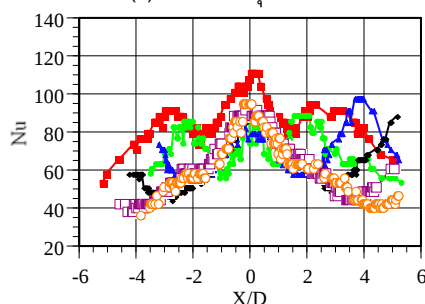
(ข) กรณีระยะพ่นเจ็ต $L/D=4$



(ค) กรณีระยะพ่นเจ็ต $L/D=6$



(ง) กรณีระยะพ่นเจ็ต $L/D=8$

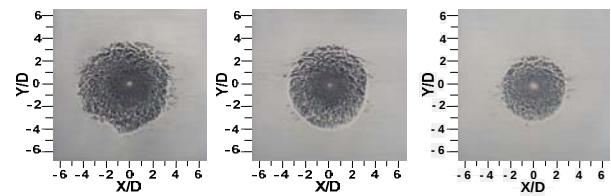


(จ) กรณีระยะพ่นเจ็ต $L/D=10$

รูปที่ 6 การกระจายของค่า Nu บนแกน X/D ผ่านตำแหน่ง $Y/D=0$

3.2 ผลจากการศึกษาการไหลบนผนังด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน

รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองกรณีของเจ็ตเดี่ยวที่ระยะพ่นเจ็ต $L/D=2, 6$ และ 10 ในรูปแสดงภาพถ่ายฟิล์มน้ำมันที่เวลา 600 s หลังเจ็ตเริ่มพ่นเจ็ต

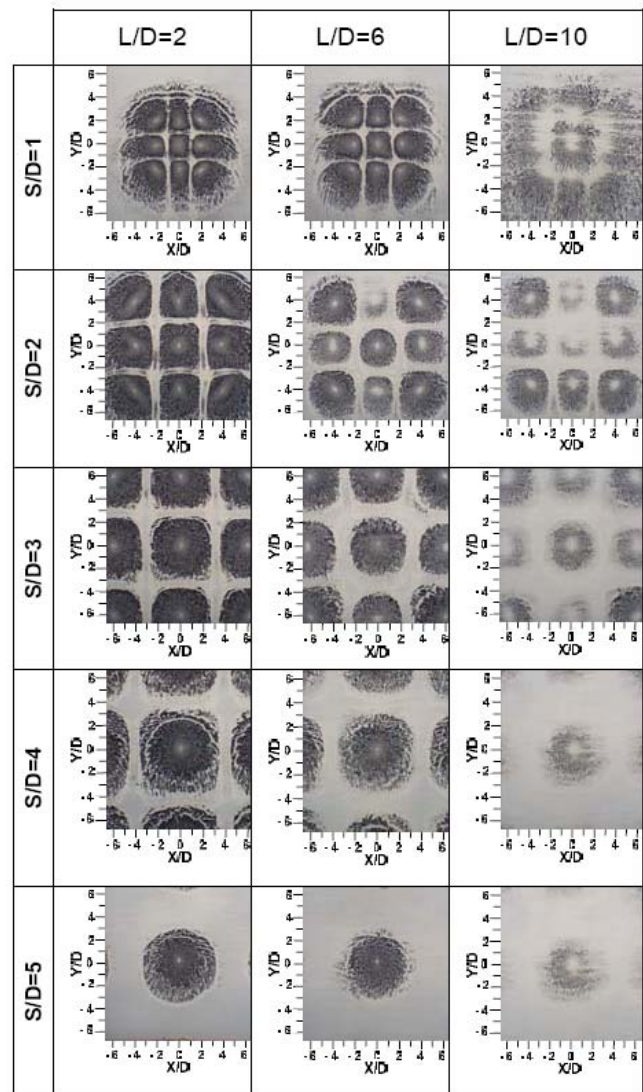


(a) $L/D=2$

(b) $L/D=6$

(c) $L/D=10$

รูปที่ 7 ภาพฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณีของเจ็ตเดี่ยวที่ระยะพ่นเจ็ต



รูปที่ 8 แสดงภาพฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลา 600 s หลังเจ็ตพ่นเจ็ต

จากผลการศึกษาการไหลของเจ็ตบนผนัง บริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมัน และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ตพัดพาออกไปหมด ภาพถ่ายของฟิล์มน้ำมันจะสามารถสังเกตการไหลของบริเวณต่างๆ บนพื้นผิวได้ จุดที่เจ็ตพ่นเจ็ต (Stagnation point) จะสังเกตได้ว่ามีฟิล์มน้ำมันเกาะติดอยู่ (บริเวณสีขาวกลางภาพ)

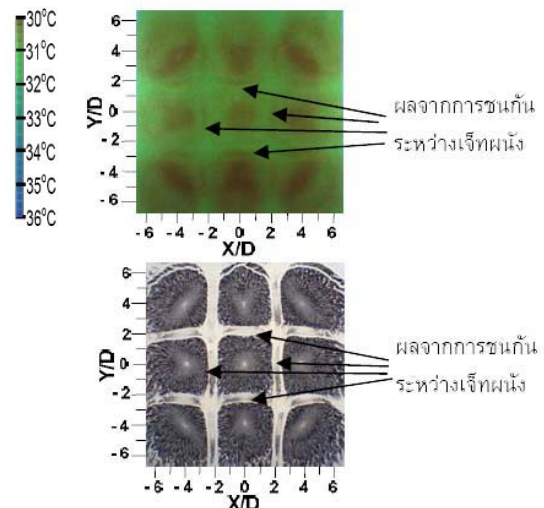
เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วเจ็ทบนผนังเท่ากับศูนย์ ส่วนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) จะเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปรอบๆ จากจุดที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณที่เห็นเป็นผนังสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติด) เนื่องจากการไหลบนผนังมีความเร่งเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนผนังที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนผนัง ในบริเวณนี้ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำ)

รูปที่ 8 แสดงผลการทดลองด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน ที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน L/D และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่างๆ แต่ละภาพจะเป็นภาพของฟิล์มน้ำมันที่เวลา 600 s หลังจากเจ็ทเริ่มพุ่งชน ในภาพบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมัน และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกหมด

จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของฟิล์มน้ำมันสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านการถ่ายเทความร้อนบนผนัง สามารถเห็นบริเวณของจุดพุ่งชน บริเวณเจ็ทพุ่งชนและบริเวณของเจ็ทผนังของเจ็ทแต่ละลำได้ชัดเจน ในกรณีนี้ที่ $S/D=2$ และ $L/D=2$ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือในกรณีนี้ที่ $S/D=4$ และ $L/D<4$ จะสามารถสังเกตเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนมีลักษณะเป็นวงกลม แต่บริเวณของเจ็ทผนังจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากการไหลของเจ็ทตรงกลางถูกจำกัดโดยเจ็ทที่ล้อมรอบ และบริเวณสีขาวที่บนจะเป็นบริเวณที่น้ำมันสะสมอยู่ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนต่ำ คาดว่าเกิดจากการชนกันของเจ็ทบนผนังและเกิดการไหลออกจากผนังที่เจ็ทพุ่งชน (Upward flow)

นอกจากนี้เจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะมีผลต่อคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่รอบๆ เจ็ทตรงกลางด้วย สังเกตได้จากกรณีนี้ที่ระยะพุ่งชน $L/D=2-6$ และระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1-2$ เจ็ทที่อยู่รอบๆ ได้รับอิทธิพลจากการไหลของเจ็ทที่อยู่ตรงกลาง เป็นผลทำให้การถ่ายเทความร้อนมีลักษณะแตกต่างจากกรณีของเจ็ทแบบเดี่ยว

รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทรอบๆ เจ็ทตรงกลางที่เงื่อนไข $L/D=2$ และ $S/D=2$ จากรูปสามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทรอบๆ และผลของการชนกันระหว่างเจ็ทบนผนังได้จากเส้นสีแดงระหว่างบริเวณพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ติดกันเป็นบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D มากขึ้น อิทธิพลจากเจ็ทที่อยู่ติดกันจะลดลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแต่ละลำมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีของเจ็ทเดี่ยวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับทุกกรณี เจ็ทที่อยู่รอบๆ จะถูกการไหลจากเจ็ทที่อยู่ตรงกลางพัดพาออกไปทำให้จุดที่เจ็ทพุ่งชนไม่ตรงกับจุดตำแหน่งของปากทางออกเจ็ท รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างลักษณะการไหลของเจ็ทบนผนัง จากรูปการไหลของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะถูกจำกัดโดยการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบ และการไหลของเจ็ทตรงกลางจะมีอิทธิพลต่อการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบ ทำให้มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณีของเจ็ทเดี่ยว และจากรูปจะสามารถสังเกตเห็นบริเวณที่น้ำมันสะสม (บริเวณสีขาวที่บนระหว่างการไหลของเจ็ทที่อยู่ติดกัน) เกิดจากการไหลออกจากผนัง (Upward flow) และระหว่างเส้นที่ขาวนั้นจะมีบริเวณที่น้ำมันลอกจากผนังเป็นเส้นขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 9 แสดงการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทบนผนังที่เงื่อนไข $L/D=2$ และ $S/D=2$ ที่เวลา 600 s

4 สรุปผลการทดลอง

- (1) ในกรณีที่ใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนบนผนัง การถ่ายเทความร้อนจะสูงในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนรอบๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D และระยะพุ่งชน L/D
- (2) กรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่ำ เจ็ทลำตรงกลางจะถูกจำกัดการขยายตัวทั้งก่อนและหลังการพุ่งชนบนผนังจากเจ็ทที่ล้อมรอบ ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังต่ำกว่ากรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบเดี่ยวมาก และหากระยะ S/D เพิ่มมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำตรงกลางจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธิพลของเจ็ทลำที่อยู่ติดกันน้อยลง
- (3) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสม่ำเสมอมากที่สุดในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ และระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1$ และในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D=8$ และระยะห่างระหว่างเจ็ท $S/D=1$ จะให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดของเจ็ทที่เรียงติดกันจะมีค่าสูงใกล้เคียงกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jung-Yang SAN, Mao De LAI, Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets, 44, 2001, pp.3997-4007
- [2] Jung-Yang SAN, Yi-Ming TSOU, Zheng-Chieh CHEN, Impingement heat transfer of staggered arrays of air jets confined a channel, 50, 2007, pp.3718-3727
- [3] BARATA, J. M. M., Fountain flows produced by multiple impinging jets in cross flow, 34, 12, pp.2523 -2530.
- [4] P. BREVET, C. DEJEU, E. DORIGNAC, M. JOLLY, J.J. VULLIERME, Heat transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization, 45, 2002, pp. 4191- 4200

ภาคผนวก ฅ3

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเซีย จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควง ที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS OF SWIRLING JET IMPINGING ON A FLAT SURFACE

มัทธาร์ แวะหะยี

ชยุต นันทคุลิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

อศิ บุญจิตราดุลย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ.กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยที่เจ็ทหมุนควงถูกสร้างโดยการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท และระดับการหมุนควงของเจ็ทจะขึ้นอยู่กับระยะพิตช์ของเกลียวแผ่นบิด สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยค่า Swirl number $Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 และระยะพุ่งชน $L/D=2, 4, 6, 8$, และ 10 โดยจะกำหนดค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ $Re=30,000$ ทุกกรณี เพื่อทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวได้ศึกษาการกระจายอุณหภูมิโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) และการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้ใช้วิธีเชิงทัศนคติฟิล์มน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงขึ้นและขยายเป็นบริเวณกว้างในกรณีที่ $Sw=0.40$ เมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทแบบไม่หมุนควง แต่การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงเมื่อเพิ่ม Sw มากกว่า 0.40 และลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง จะปรากฏบริเวณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้น 2 บริเวณห่างออกจากจุดเจ็ทพุ่งชน

1. บทนำ

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผงห้องเผาไหม้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือให้อัตราส่วนระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อมวลของไหลที่สูง ดังนั้นจึงสามารถประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น แต่บริเวณรอบๆ การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเจ็ทอิสระก่อนพุ่งชนผนังและระยะพุ่งชนของเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดที่จะเพิ่มอัตราการพาความร้อนและปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อธรรมดา เจ็ทหมุนควงเป็นเจ็ทที่ของไหลเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด ที่มีทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วแนวสัมผัส ซึ่งวิธีการสร้างเจ็ทหมุนควงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การติดปีกบังคับทิศทางการไหลที่ปากทางออกท่อ หรือการหมุนผนังของท่อ

เจ็ท ในแต่ละวิธีจะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่แตกต่างกัน โครงสร้างการไหลของเจ็ทเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยเฉพาะในกรณีที่ปากทางออกเจ็ทเป็นการไหลแบบหมุนควงแล้ว ระดับความหมุนควงของเจ็ทจะมีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท เนื่องจากเจ็ทหมุนควงจะเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆ เจ็ท ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวที่สูง และการหมุนควงของเจ็ทจะมีผลทำให้ระดับความแปรปรวนในเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดา นอกจากนี้ เจ็ทหมุนควงมีคุณลักษณะบางอย่างที่แตกต่างจากการไหลแบบเจ็ทธรรมดาบางประการ เช่น เจ็ทธรรมดามีกลไกการกระจายตัวของเจ็ท ซึ่งเกิดจากการผสมกันที่ขอบของเจ็ทและของไหลรอบๆ แต่สำหรับเจ็ทหมุนควงนั้น การหมุนควงทำให้เกิด Pressure gradient ตามแนวแกนและแนวรัศมีของเจ็ท จึงทำให้การกระจายตัวของเจ็ทเกิดจาก Pressure gradient ด้วย นอกจากนี้จะไม่พบส่วนของ Potential core (บริเวณที่ความเร็วของเจ็ทเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด) ภายในโครงสร้างของเจ็ทหมุนควง

Huang และ El-Genk [1] ได้ออกแบบอุปกรณ์สร้างเจ็ทหมุนควงสำหรับสอดในท่อเจ็ท โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตันคว้านให้เป็นร่อง 4 ร่อง ทำมุมกับแกนของเจ็ท ในการทดลองมุมบิดที่ใช้สร้างเจ็ทหมุนควงจะอยู่ที่ $15^\circ, 30^\circ$ และ 45° จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน

บนผนังได้ค่อนข้างมาก และช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดา และเงื่อนไขที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด คือกรณีที่มีมุมบิดเท่ากับ 15 องศา และระยะฟุ้งชน $L/D=2$

Alekseenko และคณะ [2] ได้ทำการทดลองเจ็ทฟุ้งชนผนังโดยมุ่งศึกษาผลกระทบของค่า Swirl number ของเจ็ทที่ฟุ้งออกมาจากหัวฉีดที่ติดตั้งสร้างกระแสหมุนวน ซึ่งมีลักษณะเป็นใบพัดค้ำทศทางที่สามารถปรับค่า Swirl number โดยการปรับมุมเอียงของใบพัด ในการทดลองใช้ค่า Swirl number ตั้งแต่ 0.0 - 1.0 และกำหนดระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวฟุ้งชนที่ระยะ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ซึ่งผลการศึกษาพบว่า อัตราการหมุนวนของเจ็ทที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการแพร่กระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทดลองไม่ได้มุ่งเน้นไปที่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นระนาบที่เจ็ทฟุ้งชน แต่จะศึกษาลักษณะการกระจายของความเร็วเจ็ท

Bakirci และ Bilen [3] ได้ทำการศึกษารายละเอียดของเจ็ทเดี่ยวแบบหมุนวน ที่ฟุ้งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในการทดลองใช้หัวฉีดที่เป็นท่อธรรมดาและติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนวนแบบ Helical four channel และบิดให้เป็นเกลียวทำมุมกับแนวแกนของท่อเจ็ทดังนี้ $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 41^\circ, 50^\circ$ และทำการศึกษาที่ระยะฟุ้งชน $L/D = 6 - 14$ สำหรับผลการทดลองที่มีมุมบิด $\theta = 50^\circ$ ค่า Nusselt number สูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุด Stagnation point แต่จะเกิด Nusselt number สูงสุด บริเวณรอบๆ แทนถึง 4 จุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากตัวสร้างกระแสหมุนวนที่ออกแบบมาให้มีร่อง 4 ช่อง ส่วนกรณีที่มีมุมบิด $\theta = 22.5^\circ$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมรอบบริเวณฟุ้งชน

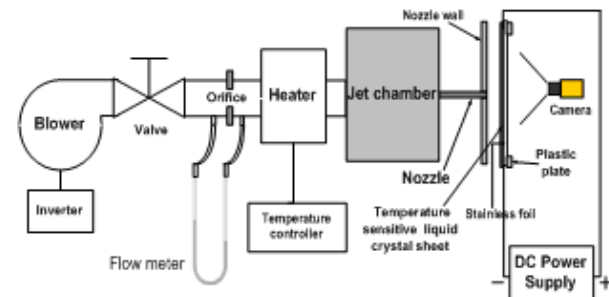
ในงานวิจัยนี้จะใช้เจ็ทหมุนวนที่สร้างจากการสอดแผ่นบิด (Twisted tape) ภายในท่อเจ็ท สาเหตุที่เลือกใช้วิธีนี้ เพราะการใช้แผ่นบิดเพื่อสร้างเจ็ทหมุนวนนั้นง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่มีการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สร้างกระแสหมุนวน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ซึ่งระยะพิทช์ของเกลียวแผ่นบิดหรือจำนวนรอบที่บิดต่อความยาวแผ่นบิด จะมีผลต่อระดับความหมุนวนของเจ็ท งานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีต ได้ทำการศึกษารายละเอียดของความร้อนบนพื้นผิว โดยการวัดการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวโดยใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิล ทำให้ไม่สามารถวัดการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากสามารถวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ทุกจุด สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะฟุ้งชน $L/D=2, 4, 6, 8, 10$ และ Swirl number $Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 โดยที่จะกำหนดค่าเรย์โนลด์ให้คงที่ $Re=30,000$ เพื่อทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบเวอร์ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัด

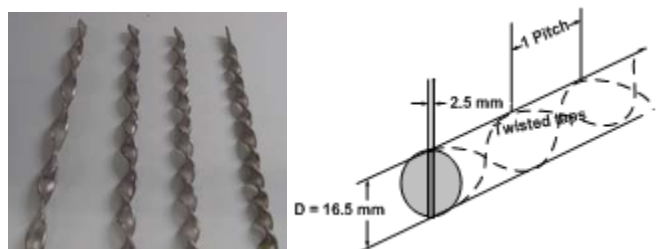
ด้วยอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิซเพื่อวัดอัตราการไหล และจะผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าห้องกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังด้านของท่อเจ็ทไว้ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากเจ็ทฟุ้งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ท และผนังที่เจ็ทฟุ้งชน ชุดทดลองนี้สามารถปรับระยะฟุ้งชนระหว่างปากทางออกเจ็ทและพื้นผิวฟุ้งชนได้ ในการทดลองนี้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ท $Re=30,000$ ได้คำนวณจากความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่หาจากอัตราการไหลของเจ็ท ดังนั้นสำหรับทุกกรณีของ Swirl number จะมีอัตราการไหลเท่ากัน



รูปที่ 1 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

2.2 ตัวกำเนิดกระแสหมุนวน

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิดที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิดนี้ทำจากแผ่นสแตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ขนาดความกว้างประมาณ 16.5 mm มีขนาดความยาว 300 mm สอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิดสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ท และสันของแผ่นบิดที่ตำแหน่งปลายท่อเจ็ทจะอยู่ในตำแหน่งแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 2 ทุกการทดลอง



รูปที่ 2 ตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ระดับความหมุนวนของเจ็ทจะนิยามโดยใช้ค่า Swirl Number (Sw) ซึ่งมีนิยามคือ

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \quad (1)$$

ในที่นี้ G_θ คือฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ทของโมเมนตัมเชิงมุม, G_n คือ

พลักร์ตามแนวแกนของโมเมนต์เชิงเส้นและ R คือรัศมีท่อ โดยที่ค่าพลักร์ในแต่ละเทอมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทได้ดังนี้ คือ

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \quad (2)$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho V_\theta V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_\theta \omega R^4}{2} \quad (3)$$

เมื่อ V_n คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, V_θ คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, ρ คือความหนาแน่นของเจ็ท ในที่นี้หากสมมติให้ V_n มีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี และให้ $V_\theta = \omega r$ โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุม

ในกรณีที่ใช้แผ่นบิตสอดในท่อเจ็ท ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทจะคำนวณได้จากจำนวนพิตช์ (n) และความยาวแผ่นบิต (l) ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (4)$$

จากสมการทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ของค่า Swirl Number ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi n R}{l} \quad (5)$$

ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์นี้พบว่า ค่า Swirl Number นี้ไม่ขึ้นกับความเร็วของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้ได้มาจากสมมุติฐานของกรณีที่เหมาะสมทำให้ความเร็วในแกนของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทคงที่ตลอดทางออกของท่อเจ็ท ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว จะเกิดขึ้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อเจ็ท ทำให้ความเร็วในแกนของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งรัศมีของท่อเจ็ท ดังนั้นค่า Swirl Number ที่ได้จากสมการข้างต้นเป็นค่าประมาณทางทฤษฎีเท่านั้น สำหรับค่า Swirl Number จริงนั้นสามารถหาได้จากการทดลองวัดการกระจายความเร็วในแนวแกนของเจ็ท และความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ ที่ปากทางออกของท่อเจ็ท ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแผ่นบิตทั้งหมดที่สร้างขึ้นและค่าประมาณทางทฤษฎีของ Swirl Number ของแผ่นบิตแต่ละแบบ

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนพิตช์ต่อความยาวและค่า Swirl number

Number of pitch (l=300mm)	Swirl number
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

2.3 วิธีการศึกษาการกระจายตัวของเจ็ทหมุนควงแบบอิสระ

ในเบื้องต้นจะทำการศึกษากการกระจายของเจ็ทโดยวิธีเชิงทัศน์เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของเจ็ทกรณีใช้แผ่นบิตที่มีจำนวนพิตช์ต่อความยาวต่างๆ โดยการทดลองจะใช้น้ำเป็นของไหลในการศึกษาแทนอากาศ ชุดทดลองประกอบไปด้วยตู้กระจกสำหรับศึกษาการกระจายของเจ็ทน้ำที่ปล่อยออกจากท่อเจ็ท ถังเก็บเจ็ทน้ำ บั๊มน้ำขนาดเล็ก เครื่องวัดอัตราการไหลแบบลูกลอย วาล์วปรับอัตราการไหล และท่อเจ็ทที่สามารถสอดแผ่นบิตแบบต่างๆ

ในส่วนของเจ็ทน้ำจะใช้สารละลาย Phenolphthalein (ซึ่งเป็นสาร pH indicator ในช่วง pH มากกว่า 8 จะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีบานเย็นเข้ม และเมื่อ pH น้อยกว่า 8 จะเปลี่ยนเป็นสารละลายไม่มีสี) มาผสมกับสารละลาย NaOH เพื่อให้เปลี่ยนเป็นสีบานเย็นเข้ม และใช้เป็นตัวบอกเส้นทางการไหลของเจ็ท หลังจากฉีดเจ็ทลงไปในถังน้ำแล้ว เจ็ทของสารละลายจะผสมกับน้ำรอบๆ ทำให้ pH ของสารละลายต่ำลงจน pH น้อยกว่า 8 แล้วสีบานเย็นของเจ็ทจะเจือจางลงจนเปลี่ยนเป็นไม่มีสีอีกครั้ง

2.4 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm เป็นผนังสำหรับเจ็ทพุ่งชน แผ่นสเตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะรูเป็นหน้าต่างขนาด 220 mm x 220 mm ไว้กลางแผ่น และใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง ซึ่งแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q_{input} = \frac{I^2 R}{A} \quad (6)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีสเหลือง สีเขียว สีนํ้าเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 35°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC

ในการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่ร้อนเพื่อระบายความร้อน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q_{input}}{T_{LC} - T_j} \quad (7)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้วงกักอากาศ และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวนั้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (8)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้ เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC จะหมายถึงเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิที่คงที่ และเนื่องจากค่าพลักร์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (7) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากันด้วย

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า

หรืออัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแดงเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงบันทึกภาพแผ่น TLC โดยกล้องดิจิทัล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีก จนกระทั่งเส้นแถบสีแดงเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแดงแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้

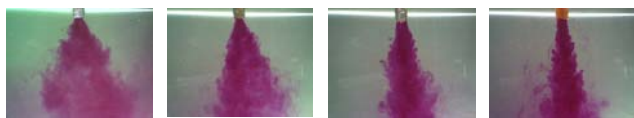
2.5 วิธีการศึกษาการไหลของเจ็บบนผนังโดยใช้วิธีฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique)

ในการทดลองนี้จะศึกษาพฤติกรรมของการไหลบนพื้นผิวที่เจ็พพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) และจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นผนังที่เจ็พพุ่งชนแทนแผ่นสเตนเลส อีกทั้งบนพื้นผิวด้านที่เจ็พพุ่งชนจะทาสีน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของ Paraffin แบบเหลว ผง Titanium dioxide และกรด Oleic บางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจะให้เจ็พพุ่งชนผิวน้ำมัน และบันทึกการไหลของชั้นน้ำมันบนพื้นผิวจากทางด้านหลังของผนังใส โดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ

3. ผลการทดลอง

3.1 การกระจายตัวของเจ็พหมุนควงแบบอิสระ

รูปที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของ Swirl number ที่มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็พอิสระกรณีที่ไม่มีผนังเจ็พติดตั้งอยู่ จากรูปเห็นได้ชัดว่าการกระจายตัวของเจ็พจะเพิ่มขึ้นตามค่า Swirl number ที่เพิ่มขึ้น และในกรณีที่เจ็พหมุนควงมีค่า Swirl number สูงจะเกิดปรากฏการณ์ Vortex breakdown ขึ้นในลำเจ็พ ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าระหว่างการทดลอง



(a) Sw=0.78 (b) Sw=0.62 (c) Sw=0.4 (d) Sw=0.0

รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของ Swirl number ที่มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็พ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็พ: 16.5 mm, อัตราการไหลของเจ็พน้ำ: 1.13 l/min, Re=1500)

3.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

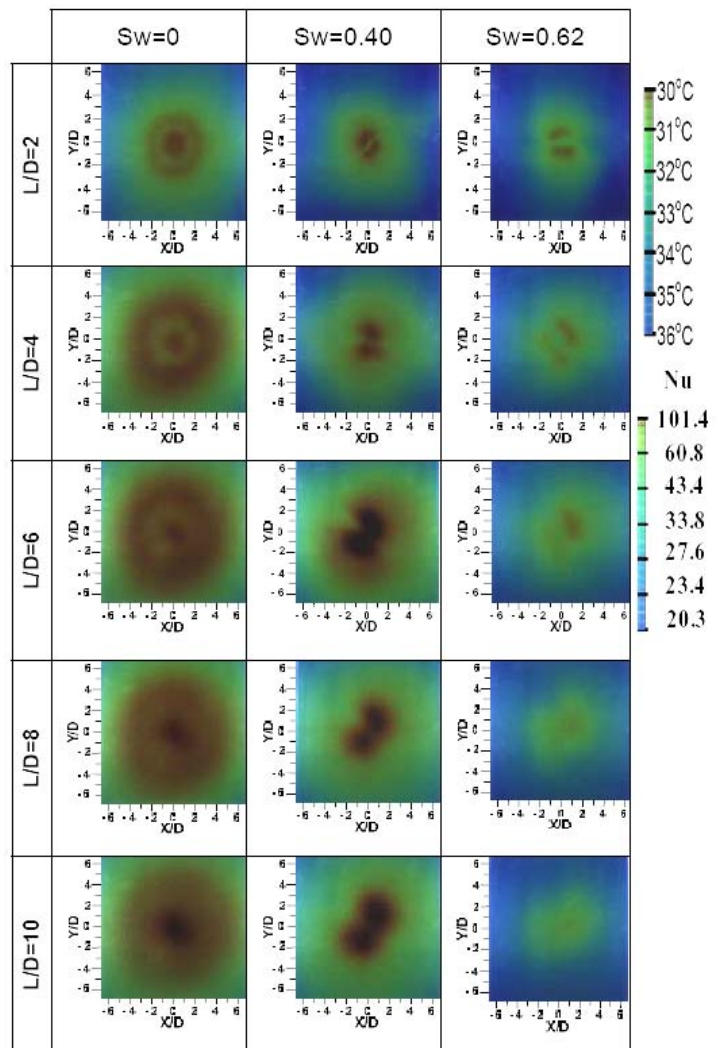
รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองกรณีเปลี่ยนแปลงระยะพุงชน L/D=2-10 ที่ค่า Sw=0, 0.4 และ 0.62 ในรูปแสดงภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่เงื่อนไข $q = 242 \text{ W/m}^2$, $T_j = 28.5^\circ\text{C}$ และ $Re = 30,000$ สำหรับสปีนแผ่น TLC จะแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็พพุ่งชน โดยบริเวณที่เจ็พพุ่งชนจะมีอุณหภูมิต่ำและมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็พพุ่งชน อุณหภูมิจะสูงขึ้นและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามลำดับ

สำหรับกรณีของเจ็พแบบไม่หมุนควง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็พพุ่งชน ($X/D=0$, $Y/D=0$) หลังจากนั้นค่าจะลดลงตามระยะที่ห่างจากจุดเจ็พ แต่ในกรณีที่ระยะพุงชน L/D=2, 4, 6 จะเกิดบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอันดับที่สองรอบจุดเจ็พพุ่งชน โดยเกิดขึ้นที่ตำแหน่งห่างจากจุด

เจ็พพุ่งชนประมาณ 2D ถึง 3D และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดที่จุดเจ็พพุ่งชนจะสูงขึ้นตามระยะพุงชนที่เพิ่มขึ้น

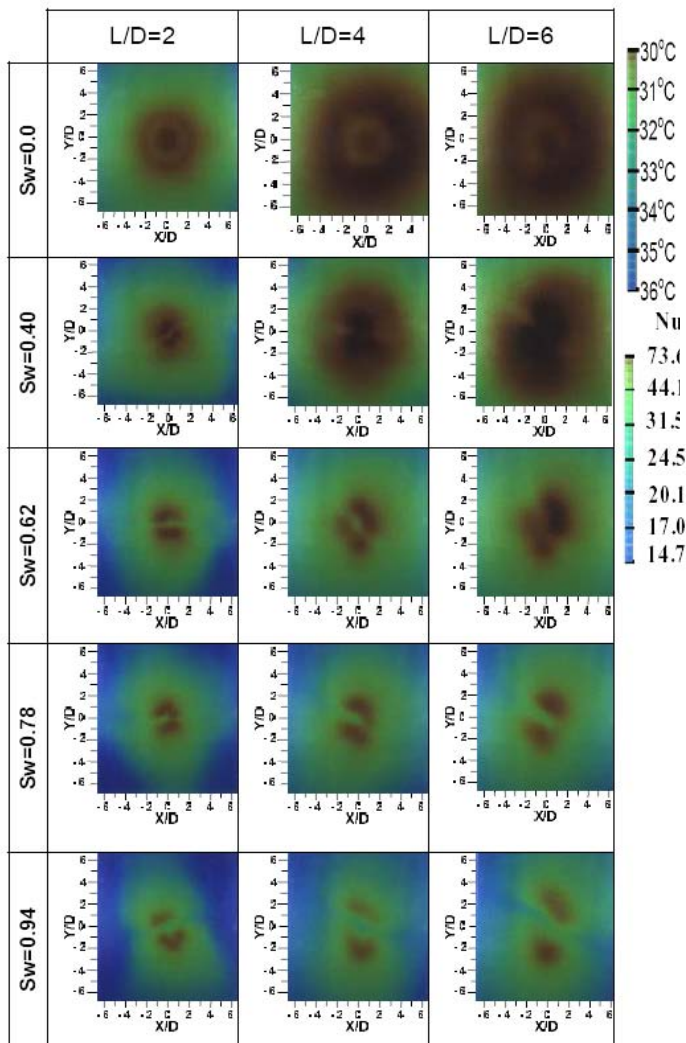
สำหรับกรณีของเจ็พหมุนควงที่ Sw=0.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งรอบๆ จุดเจ็พพุ่งชน จากภาพสามารถเห็นเป็น 2 บริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงรอบจุดเจ็พพุ่งชน ($X/D=0$, $Y/D=0$) เนื่องจากเจ็พออกจากท่อที่สอด้แผ่นปิดอยู่ ทำให้การไหลในท่อเจ็พแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและเมื่อพุงชนผนังจึงเกิดบริเวณทั้งสองนี้ขึ้น และบริเวณที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะพุงชนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามรอบๆ บริเวณนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็พแบบไม่หมุนควง

ในกรณีที่ระดับการหมุนควงของเจ็พสูงขึ้นเป็น Sw=0.62 จะพบว่าบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงทั้งสองนี้ มีระยะห่างจากจุดเจ็พพุ่งชน ($X/D=0$, $Y/D=0$) มากขึ้น ซึ่งเกิดจากระดับการหมุนควงของเจ็พเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของ Sw=0.40 แต่เมื่อระยะพุงชนเพิ่มขึ้นจาก L/D=2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของทั้งสองบริเวณนี้จะลดลงและหายไปที่ระยะพุงชน L/D=10



รูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะพุงชน L/D ต่างๆ ($q = 242 \text{ W/m}^2$, $T_j = 28.5^\circ\text{C}$, $Re = 30,000$)

รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ค่า $Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 สำหรับระยะฟุ้งชน $L/D=2, 4, 6$ ในรูปแสดงภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่เงื่อนไข $q=176 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$ และ $Re=30,000$ จากรูปพบว่า ในกรณีของเจ็ทหมุนตรงจะเกิดบริเวณที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงขึ้น 2 บริเวณรอบจุดที่เจ็ทฟุ้งชน และระยะห่างระหว่าง 2 บริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะฟุ้งชน L/D เพิ่มขึ้นหรือกรณีที่ Swirl number เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังในบริเวณรอบๆ ได้รับอิทธิพลจากการหมุนตรงของเจ็ทด้วย ทำให้การถ่ายเทความร้อนแตกต่างจากกรณีของเจ็ทแบบไม่หมุนตรง



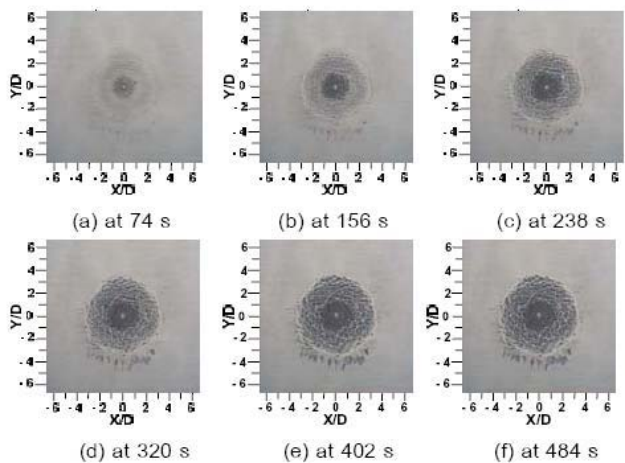
รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ค่า Swirl number ต่างๆ ($q=176 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=30,000$)

หากเปรียบเทียบกันกับกรณีเจ็ทไม่หมุนตรงแล้ว กรณีเจ็ทหมุนตรงมีค่า $Sw=0.40$ การถ่ายเทความร้อนรอบจุดเจ็ทฟุ้งชนจะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชน L/D บริเวณที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงจะขยายกว้างขึ้น แต่กรณีที่เพิ่มค่า Swirl number เป็น $Sw=0.62, 0.78$ และ 0.94 การถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชน

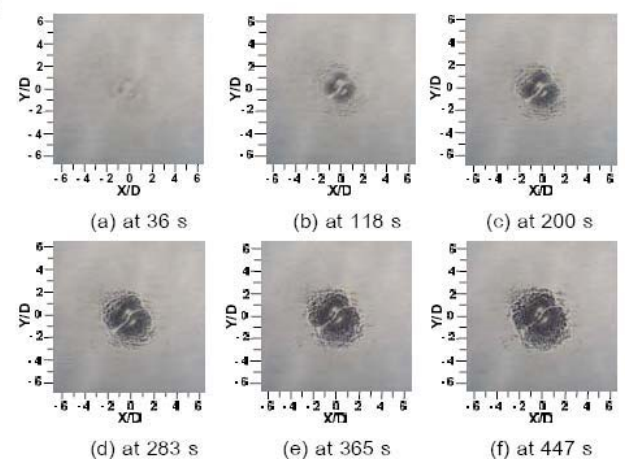
กลับต่ำกว่าเจ็ทแบบไม่หมุนตรง $Sw=0.0$ มาก เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทในแนวแกนที่ฟุ้งชนมีลดลง และโมเมนตัมของเจ็ทในทิศทางการหมุนตรงเพิ่มขึ้น เมื่อ Swirl number เพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังลดลง

3.3 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนบนพื้นผิว

รูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทเริ่มฟุ้งชนผนังที่ระยะฟุ้งชน $L/D=2$ สำหรับกรณี $Sw=0.0, 0.40, 0.62$ และ 0.78 ในแต่ละภาพบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมัน และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปหมด



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทฟุ้งชนพื้นผิวของกรณีที่ $Sw=0.0$, ระยะฟุ้งชน $L/D=2$

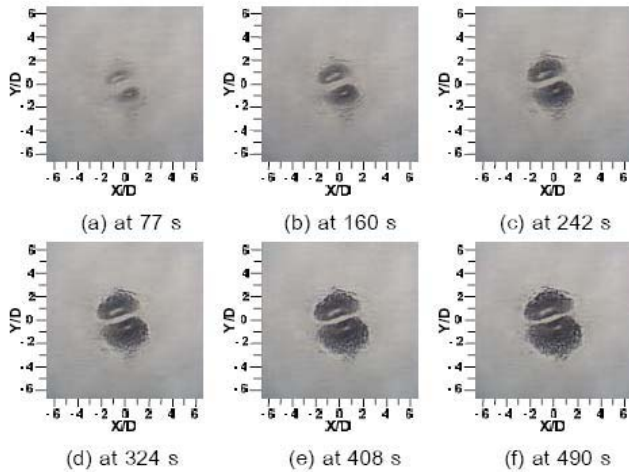


รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ

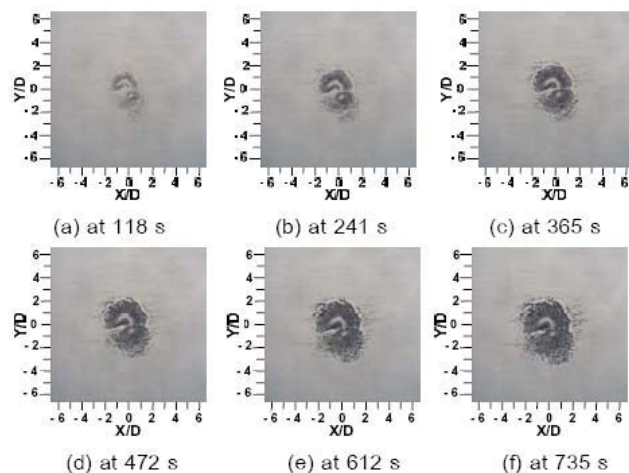
หลังเจ็ทฟุ้งชนพื้นผิวของกรณีที่ $Sw=0.40$, ระยะฟุ้งชน $L/D=2$

จากภาพถ่ายของฟิล์มน้ำมันจะสามารถสังเกตการไหลบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ ได้ ซึ่งจุดที่เจ็ทฟุ้งชน (Stagnation point) จะสังเกตได้ว่ามีฟิล์มน้ำมันเกาะติดอยู่ (บริเวณสีขาวกลางภาพ) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วเจ็ทบนผนังเท่ากับศูนย์ ส่วนบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชน (Stagnation region) จะเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปรอบๆ จากจุดที่เจ็ทฟุ้งชน (บริเวณที่เห็นเป็นผนังสีดำไม่

มีน้ำมันเกาะติด) เนื่องจากการไหลบนผนังมีความเร่งเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนผนังที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนผนัง ในบริเวณนี้ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลบสีดำ)



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของกรณีที่ $Sw = 0.62$, ระยะพุ่งชน $L/D=2$



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของกรณีที่ $Sw = 0.78$, ระยะพุ่งชน $L/D=2$

รูปที่ 6 แสดงภาพฟิล์มน้ำมันของกรณี $Sw=0.0$ ที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ จากรูปที่เวลา 74 s สามารถสังเกตเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นจุดสีขาวของน้ำมันที่สะสมอยู่ได้ หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปเจ็ทจะไหลออกในแนวรัศมีบนผนัง และจะสังเกตเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งและบริเวณของเจ็ทผนังได้ชัดเจน สำหรับกรณีของเจ็ทหมุนควง $Sw=0.40$, 0.62 และ 0.78 จากรูปที่เวลาเจ็ทเริ่มพุ่งชนพื้นผิวจะพบว่าเจ็ทที่ออกมาจากท่อเจ็ทจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แล้วพุ่งชนบนผนังปรากฏเป็นรอยน้ำมัน บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 2 บริเวณ เมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มน้ำมันจะขยายตัวออกไปในแนวรัศมีจากจุดพุ่งชน ($X/D=0$, $Y/D=0$) สามารถสังเกตเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณสีดำที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกจากผิว) และบริเวณที่น้ำมันสะสมอยู่ในทั้ง 2 บริเวณ

และเมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นบริเวณของเจ็ทผนังที่น้ำมันถูกพัดออกไปบางส่วน (บริเวณสีขาวสลบสีดำ) จากผลการทดลองนี้พบว่าลักษณะของฟิล์มน้ำมันสอดคล้องกับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง กรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ คือบริเวณที่น้ำมันสะสมอยู่ระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน 2 บริเวณ (บริเวณสีดำ) จะสอดคล้องกับบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง 2 บริเวณ

4. สรุปผลการทดลอง

- (1) การกระจายของเจ็ทหมุนควงอิสระจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่ม Swirl number ของเจ็ท เป็นผลจากความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการผสมกันกับของไหลที่อยู่รอบๆ มากขึ้น
- (2) ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวจะปรากฏบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดสองบริเวณ ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนและระยะห่างระหว่างสองบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพุ่งชน L/D หรือ Swirl number ของเจ็ทเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกรณีของเจ็ทธรรมดาแบบไม่หมุนควงซึ่งจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดที่จุดเจ็ทพุ่งชนเท่านั้น
- (3) การใช้เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ พุ่งชนพื้นผิวจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่พุ่งชนได้มากกว่าการใช้เจ็ทธรรมดาแบบไม่หมุนควงเฉพาะในช่วงระยะพุ่งชน $L/D=4-10$ แต่หากเพิ่ม Swirl number ของเจ็ทหมุนควงเป็น $Sw=0.62$, 0.78 และ 0.94 อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงกว่ากรณีของเจ็ทธรรมดาแบบไม่หมุนควง เนื่องจากเมื่อเพิ่ม Swirl number มากขึ้นความเร็วหรือโมเมนตัมที่พุ่งชนผนังลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังลดลงตามไปด้วย
- (4) พฤติกรรมของการไหลบนผนังที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชนสอดคล้องกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนัง โดยเจ็ทหมุนควงจากท่อเจ็ทที่สอดแผ่นปิดจะไหลแยกเป็นสองส่วนแล้วไหลแบบหมุนควงพุ่งชนบนผนัง ทำให้เกิดบริเวณเจ็ทหมุนควงพุ่งชนสองบริเวณห่างจากกัน หลังจากนั้นเจ็ทผนังจะไหลออกในแนวรัศมีจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Huang, M.S. El-Genk, Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets., 1998, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, pp. 583-600
- [2] S.V. Alekseev, A.V. Bilsky, V.M. Dulin, D.M. Markovich, Experimental study of an impinging jet with different swirl rates, 2007, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp.1340-1359
- [3] K. Bakirci, K. Bilen, Visualization of heat transfer for impinging swirl flow, 2007, Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, pp. 182-191

ภาคผนวก ฅ4

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551
กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, หน้า 384-389.

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชน

Heat Transfer Enhancement on Surface Using Array of Impinging Swirl Jets

มักตาร์ แวะหะยี¹ ชยุต นันทดูลิต^{1*} และอติ บุญจิตราดุลย์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทร 0-7428-7035 โทรสาร 0-7421-2893 *อีเมลล์ E-mail: chayut@me.psu.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของกลุ่มเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิว ในการทดลองนี้ได้ใช้เจ็ทที่เป็นหัวฉีดแบบท่อ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ ที่เรียงกันเป็น 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว และใช้แผ่นบิตที่มีระยะพิชิตต่าง ๆ สอดในท่อเจ็ทเพื่อกำหนดกระแสหมุนควงของเจ็ท สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=2D$, $4D$, $6D$, และ $8D$ ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=2D$, $4D$, $6D$, และ $8D$ ระดับของการหมุนควง (Swirl number) $Sw=0.40$, 0.62 , 0.78 , 0.94 และเจ็ทท่อเปล่า (ไม่ใส่แผ่นบิต) โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ในแต่ละการทดลองเท่ากับ 25,000 (อัตราการไหลของอากาศเท่ากันทุกกรณี) สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ นอกจากนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน จากการที่ได้ศึกษาพบว่าการใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่พุ่งชนได้ โดยเฉพาะกรณีที่ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=2D$ และกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=2D$, $4D$ แต่ในกรณีที่ $L>2D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวจะลดลงและมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบเมื่อเทียบกับกรณีของกลุ่มเจ็ทจากท่อเปล่า

Abstract

The flow and heat transfer characteristics of array of swirling impinging jets on a surface were investigated. The jet flows were produced by in-line arrangement of 3×3 pipe nozzles which have 16.5 mm in diameter and impinged normally to the surface. Some twisted tapes with different length of twisted pitch were inserted in the pipe nozzle to generate swirling jet flow with different swirl number. The experimental parameters were the distance from nozzle exit to impinging surface $L=2D$, $4D$, $6D$ and $8D$, jet-to-jet distance $S=2D$, $4D$, $6D$ and $8D$, swirl number $Sw=0.40$, 0.62 ,

0.78 , 0.94 and conventional pipe nozzle at constant jet Reynolds number of 25,000 (mass flow rate was constant). The distributions of temperature and convective heat transfer coefficient on impinging surface were measured using temperature sensitive liquid crystal (TLC) sheet with image processing technique. Flow patterns on an impinging surface were visualized using Oil film technique. The experimental results show that swirling impinging jets can increase heat transfer rate on impinging surface in cases of distance from nozzle exit to impinging surface $L=2D$ and jet-to-jet distance $S=2D$, $4D$. However, for case of $L>2D$, the local heat transfer rate on impinging surface decreases and heat transfer patterns were complex when compare with conventional impinging jets case.

1. คำนำ

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเจ็ทของไหลและพื้นผิวที่นิยมใช้ในการระบายความร้อนใบพัด แก๊สเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง โดยเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่กล่าวมาจะมีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่กว้าง จำเป็นต้องใช้เจ็ทหลายลำหรือกลุ่มเจ็ท เพื่อให้เพียงพอต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นในเจ็ทกลุ่มคือ จะเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน เมื่อเจ็ทพุ่งชนผนังก็จะเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทบนผนังจากนั้นเจ็ทก็จะระบายออกนอกบริเวณที่พุ่งชน ซึ่งจะมีผลที่ตามมาคือ บริเวณที่เจ็ทผสมกันบนผนังและระบายออกนอกบริเวณที่พุ่งชนนั้นจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่ต่ำมาก ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังไม่สม่ำเสมอ ซึ่งหลาย ๆ งานวิจัยพยายามที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยศึกษาตัวแปรระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ท เพื่อที่จะ

กำหนดตัวแปรที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่สูงและมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่สม่ำเสมอมากที่สุด

San และ Lai [1] ได้ทำการทดลองใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิว 5 ลำ โดยการจัดเรียงหัวฉีดให้ 1 ลำอยู่ตรงกลางและอีก 4 ลำที่เหลือล้อมรอบเป็นสี่เหลี่ยมโดยที่ด้านกว้าง ลำเจ็ทจะทำมุมต่อกัน 60° และด้านยาว ลำเจ็ทจะทำมุม 120° โดยที่ค่าเรย์โนลด์ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง $Re=10,000 - 20,000$ พบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน (ระยะพุ่งชน) และระยะห่างระหว่างเจ็ท โดยที่ระยะพุ่งชน $L=8D$ พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=2D$ จะเหมาะสมที่สุด และในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=3D$ จะเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ San และคณะ [2] ได้ใช้ชุดทดลองรูปแบบเดียวกัน ทำการทดลองในกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททั้งหมดให้เท่ากัน และอีกกรณีปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบให้แตกต่างกัน โดยทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ $Re=5,000 - 15,000$ จากผลการทดลองพบว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทให้เท่ากันทั้งหมด อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะต่ำกว่าเจ็ทที่อยู่รอบๆ และกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบๆ ให้แตกต่างกัน โดยให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางคงที่และปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่รอบๆ ให้สูงขึ้น พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะสูงขึ้นตามการเพิ่มค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่รอบ

Barata [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน 3 ลำ กรณีที่เรียงเป็นแถว ผลการทดลองได้เสนอเกี่ยวกับที่มาของการเกิดกระแสไหลวนขึ้น (Upwash flow) เกิดจากเจ็ท 2 ลำที่อยู่ติดกัน หลังจากเจ็ทพุ่งชนผนังแล้วเจ็ทที่ไหลบนผนังที่สวนทางกันจะเกิดการปะทะกันและไหลจากผนังขึ้นด้านบน

Brevet และคณะ [4] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนที่เรียงกันแบบ 1 แถว และ 3 แถว ในแต่ละแถวจะมีเจ็ทเรียงกัน 3 ลำ โดยจำลองชุดทดลองให้เหมือนลักษณะการระบายความร้อนในไบพัดแก๊สเทอร์โบ คือ ปรับให้กระแสลมทิ้ง (Spent air) หลังจากเจ็ทพุ่งชนแล้วไหลไปยังทางออกทางเดียว จากผลการทดลองปรากฏว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการจะนำไปใช้จะอยู่ในช่วงระยะพุ่งชน $L=2D-5D$ และในช่วงระหว่างนี้ระยะพุ่งชน $L=3D$ จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และหากมีการเพิ่มค่าเรย์โนลด์พร้อมกับลดระยะห่างระหว่างเจ็ทแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น

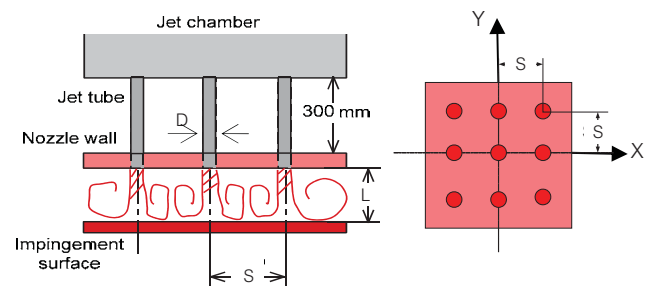
ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยเฉพาะบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง โดยใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวแทนเจ็ทจากท่อเปล่า ในเบื้องต้นจะศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทกลุ่มแบบหมุนควง ในกรณีที่เจ็ทอากาศพ่นออกมาจากหัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle) จำนวน 9 ท่อที่วางเรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว สำหรับการสร้างเจ็ทหมุนควงจะสอดแผ่นบิด (Twisted tape) ในท่อเจ็ท ซึ่งระยะพิตช์ของเกลียวแผ่นบิดหรือจำนวนรอบที่บิดต่อความยาวแผ่นบิดจะมีผลต่อระดับความหมุนควงของเจ็ท ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยระยะพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D$, และ $8D$ ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=2D, 4D$,

$6D$, และ $8D$ ระดับของการหมุนควง (Swirl number) $Sw=0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 และได้ศึกษากรณีของเจ็ทท่อเปล่า (ไม่ใส่แผ่นบิด) เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทแบบหมุนควง ในแต่ละการทดลองจะกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่เท่ากับ $25,000$ สำหรับวิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคเชิงทัศนฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลกับการถ่ายเทความร้อน

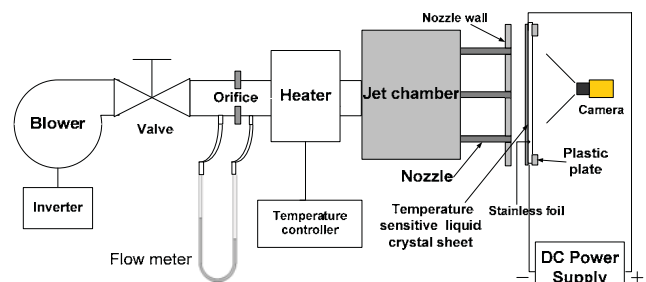
2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของโมเดลการทดลอง ในการทดลองจะใช้เจ็ทจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ เรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทและระยะระหว่างแถวของเจ็ทเท่ากัน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D$, และ $8D$ ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=2D, 4D, 6D$, และ $8D$ โดยที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททุกการทดลองคงที่ $Re=25,000$ (ใช้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทและความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ทในการคำนวณ)



รูปที่ 1 แสดงโมเดลการทดลองและลักษณะการเรียงของท่อเจ็ท



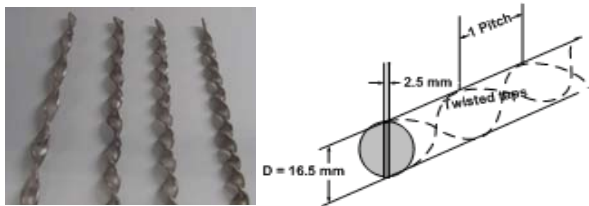
รูปที่ 2 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบเวอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ ก่อนที่จะเข้าห้องกักอากาศและผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่

ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากท่อเจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่ท่อเจ็ทพุ่งชน ชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทได้

2.2 ตัวกำเนิดกระแสหมุนควง

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิตที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิตที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิตนี้ทำจากแผ่นสแตนเลสแบบมีความหนา 2.5 mm ขนาดความกว้างประมาณ 16.5 mm มีขนาดความยาว 300 mm บิตในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิตสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ท และสันของแผ่นบิตที่ตำแหน่งปลายท่อเจ็ทจะอยู่ในตำแหน่งแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3 ทุกการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงแผ่นบิตที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิตในท่อเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ระดับความแรงของการหมุนควงของเจ็ทจะนิยามโดยใช้ค่า Swirl Number (Sw) ซึ่งมีนิยามคือ

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \quad (1)$$

ในที่นี้ G_θ คือฟลักซ์โมเมนตัมเชิงมุมตามแนวแกนเจ็ท, G_n คือ ฟลักซ์โมเมนตัมเชิงเส้นตามแนวแกนเจ็ทและ R คือรัศมีท่อเจ็ท โดยที่ค่าฟลักซ์ในแต่ละเทอมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทได้ดังนี้ คือ

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \quad (2)$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \quad (3)$$

เมื่อ V_n คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, V_θ คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, ρ คือความหนาแน่นของเจ็ท ในที่นี้จะสมมติให้ V_n มีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี และให้ $V_\theta = \omega r$ โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี

ในกรณีที่ใช้แผ่นบิตสอดในท่อเจ็ท ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทจะคำนวณได้จากจำนวนพิตช์ (n) และความยาวแผ่นบิต (l) ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (4)$$

จากสมการทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ของค่า Swirl number ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi n R}{l} \quad (5)$$

ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์นี้พบว่า ค่า Swirl number นี้ไม่ขึ้นกับความเร็วของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้ ได้มาจากสมมุติฐานของกรณีที่เหมาะสมทำให้ความเร็วในแกนของเจ็ท และ

ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทคงที่ตลอดทางออกของท่อเจ็ท ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว จะเกิดขึ้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อเจ็ท ทำให้ความเร็วในแกนของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งรัศมีของท่อเจ็ท ดังนั้นค่า Swirl number ที่ได้จากสมการข้างต้นเป็นค่าประมาณทางทฤษฎีเท่านั้น สำหรับค่า Swirl number จริงนั้นจำเป็นต้องหาจากการวัดการกระจายความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ ที่ปากทางออกของท่อเจ็ท ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแผ่นบิตทั้งหมดที่สร้างขึ้นและค่าประมาณทางทฤษฎีของ Swirl number ของแผ่นบิตแต่ละแบบ

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนพิตช์ต่อความยาวและค่า Swirl number

Number of pitch ($l=300\text{mm}$)	Swirl number
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

2.3 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC)

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบาง (Stainless foil) ที่มีความหนา 0.03 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสแตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบติดกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 mm x 220 mm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q = \frac{I^2 R}{A} \quad (6)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30°C ถึง 35°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และได้ใช้เทคนิคการประมวลผลในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิทัลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ แดง (R) เขียว (G) น้ำเงิน (B) และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q}{T_{LC} - T_j} \quad (7)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวฟุ้งชนที่วัดจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้องกักอากาศ และ Nusselt number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (8)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC จะเป็นเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิหรือเส้น Isotherm และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (7) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากันด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ (ประมาณ 5°C) เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม (ระยะฟุ้งชน ระยะห่างระหว่างเจ็ท อัตราการไหลของเจ็ท และอุณหภูมิของเจ็ท) แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าหรืออัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงบันทึกภาพแผ่น TLC โดยกล้องดิจิทัล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

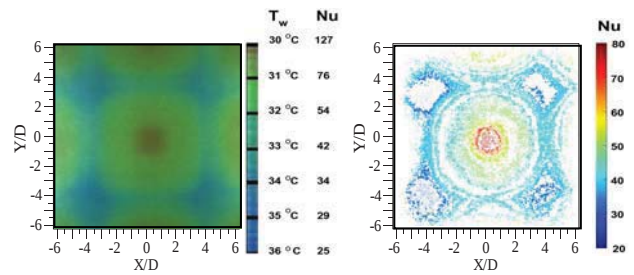
2.4 วิธีการศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique)

ในการทดลองนี้จะศึกษาพฤติกรรมของการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน โดยใช้เทคนิคเชิซท์ฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) การทดลองจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นผนังที่เจ็ทฟุ้งชนแทนแผ่นสเตนเลส และบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทฟุ้งชนจะทาน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์ และกรดโอเลอิกบางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจะให้เจ็ทฟุ้งชนผิวน้ำมัน แล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ จากด้านหลังของผนังใสโดยใช้กล้องดิจิทัล

3. ผลการทดลอง

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการกระจายของ Nusselt number ที่ได้จากการประมวลผลภาพ โดยรูปที่ 4(a) เป็นภาพถ่ายของแผ่น TLC แสดงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิว และค่า Nusselt number สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิของแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC โดยบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนโดยตรงจะมีอุณหภูมิต่ำและมีค่า Nusselt number ที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทฟุ้งชนอุณหภูมิจะสูงขึ้นและค่า Nusselt number จะลดลงตามลำดับ ในรูปที่ 4(b) แสดงการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิว โดยวิธีเลือกเส้นสีเหลืองจากแผ่น TLC ที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนต่างๆ มาซ้อนกันโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์

ภาพในคอมพิวเตอร์ ในรูปเส้นแต่ละสีจะแสดงค่า Nusselt number ที่ระดับต่างๆ

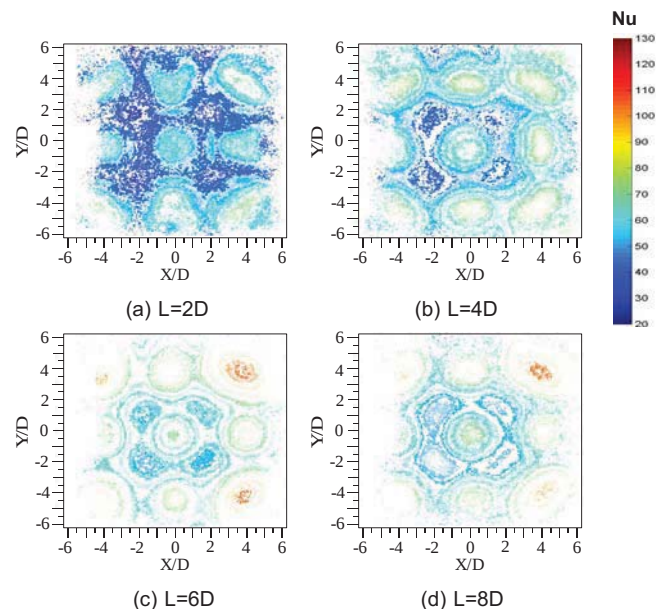


(a) ภาพถ่ายของแผ่น TLC

(b) การกระจายของค่า Nu

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิตามแผ่น TLC และการกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข $q = 300 \text{ W/m}^2$ และ $T_j = 28.5^\circ\text{C}$ (เจ็ทท่อเปล่า, $L=4D$, $S=8D$)

3.1 ผลของระยะฟุ้งชนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



(a) L=2D

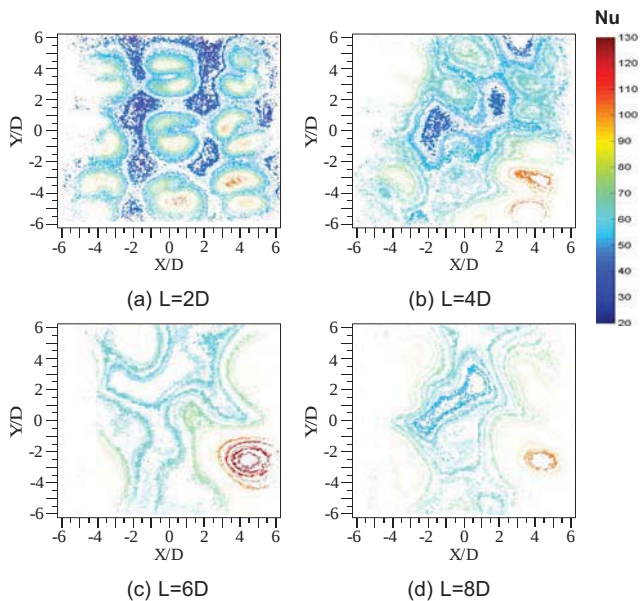
(b) L=4D

(c) L=6D

(d) L=8D

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทจากท่อเปล่าฟุ้งชนที่เงื่อนไข $S=4D$

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวของเจ็ทท่อเปล่าที่เงื่อนไข $S=4D$ และระยะฟุ้งชนต่างๆ จากรูปพบว่าที่ระยะฟุ้งชน $L=2D$ (รูปที่ 5 (a)) อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนโดยตรงเท่านั้น และเกิดบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำขึ้นเป็นบริเวณกว้างระหว่างบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนโดยตรงเนื่องจากเจ็ทที่ออกจากท่อเจ็ทจะฟุ้งชนผนังทันที แต่เมื่อระยะฟุ้งชน L เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5 (b) - 5 (d)) พบว่าพื้นที่ของบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำนั้นจะลดลงตามลำดับ เนื่องจากเจ็ทแต่ละลำจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นก่อนฟุ้งชนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้นเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ยังพบว่าการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนโดยตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะฟุ้งชนเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควง $Sw=0.78$ พุ่งชนที่เงื่อนไข $S=4D$

รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิว ในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงที่ $Sw=0.78$ แทนเจ็ทจากท่อเปล่าที่เงื่อนไข $S=4D$ จากรูปนี้พบว่าที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ (รูปที่ 6 (a)) จะสามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทหมุนควงแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิวได้ชัดเจน และหากเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ทั้งในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงและบริเวณรอบๆ ที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำจะมีพื้นที่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มระยะพุ่งชน L (รูปที่ 6 (b) – 6 (d)) พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงที่อยู่ติดกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง

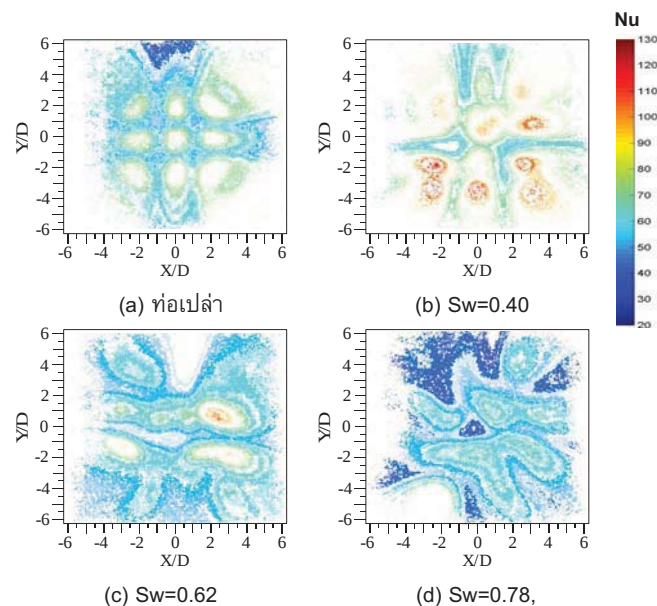
3.2 ผลของระดับความหมุนควงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทต่างๆ

รูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลของระดับความหมุนควง (Swirl number, Sw) ที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน $L=4D$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=2D$, $4D$ และ $8D$

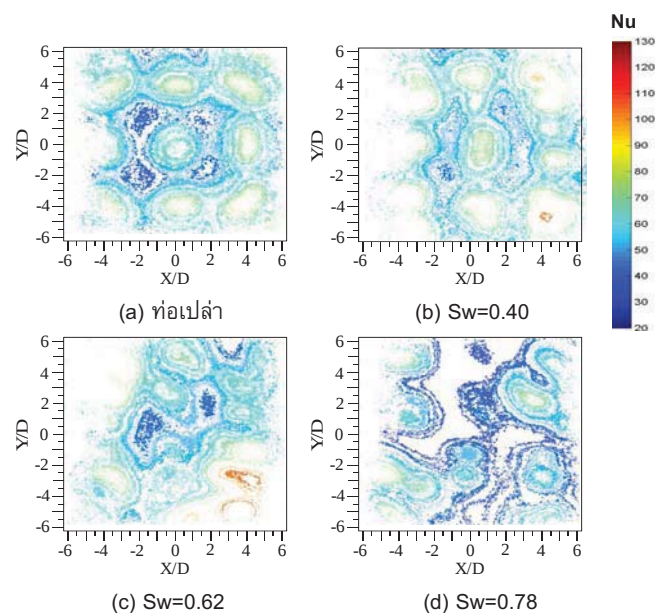
กรณีที่เงื่อนไข $S=2D$, $L=4D$ (รูปที่ 7) อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทท่อเปล่า โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (เปรียบเทียบกับรูปที่ 7 (a) และ 7(b)) แต่ในกรณีที่เพิ่มค่า $Sw>0.40$ (รูปที่ 7 (c) และ 7(d)) อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวจะลดลงและมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากเกิดจากการผสมกันระหว่างเจ็ทก่อนพุ่งชนซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงเมื่อ Sw เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S น้อย

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=4D$ (รูปที่ 8) การใช้เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ แทนเจ็ทจากท่อเปล่าสามารถช่วยเพิ่มอัตรา

การถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงได้ แต่ไม่สามารถลดบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อเพิ่มค่า Sw พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่เป็นระเบียบ

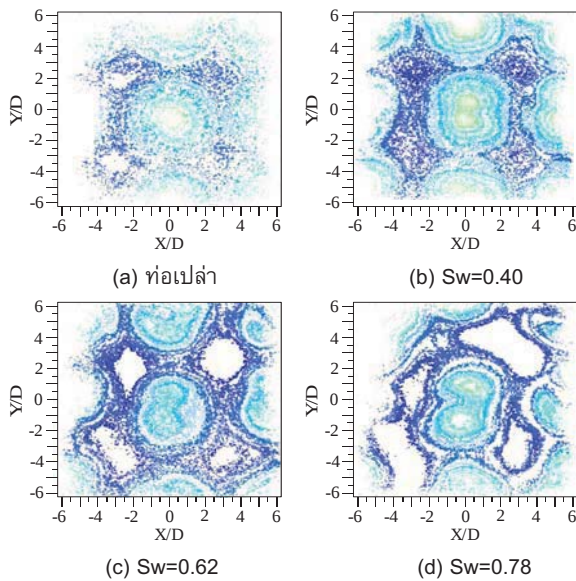


รูปที่ 7 แสดงผลของระดับความหมุนควงที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข $S=2D$, $L=4D$



รูปที่ 8 แสดงผลของระดับความหมุนควงที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข $S=4D$, $L=4D$

สำหรับในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทเพิ่มขึ้นเป็น $S=6D$ (รูปที่ 9) สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนได้ชัดเจนทุกเงื่อนไขระดับความหมุนควง และอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความหมุนควงของเจ็ท แต่ในบริเวณรอบๆ จะพบบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งระดับความหมุนควงของเจ็ทจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้



รูปที่ 9 แสดงผลของระดับความหมุนควงที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข $S=6D$, $L=4D$

3.3 ลักษณะการไหลของเจ็บบนพื้นผิว

รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็บบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมันเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีของเจ็บบนพื้นผิวและเจ็บบนพื้นผิวหมุนควง จากรูปบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นบริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันเคลือบอยู่ และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็บบัดพาออกไปหมด จากภาพถ่ายของฟิล์มน้ำมันจะสามารถสังเกตการไหลของบริเวณต่างๆ บนพื้นผิวได้ ตำแหน่งที่เจ็บบนพื้นผิว (หรือ Stagnation point) จะสังเกตได้ว่ามีฟิล์มน้ำมันเป็นบริเวณสีขาวเกาะติดอยู่ ส่วนบริเวณที่เจ็บบนพื้นผิว (Stagnation region) จะเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปรอบๆ จากจุดที่เจ็บบนพื้นผิว จะเห็นเป็นบริเวณของผนังสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติดเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง และบริเวณของเจ็บบนผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็บบนพื้นผิวเปลี่ยนเป็นการไหลบนผนัง ในบริเวณนี้ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว สามารถเห็นเป็นบริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำ และบริเวณที่มีน้ำมันสีขาวสะสมอยู่ระหว่างบริเวณที่เจ็บบนพื้นผิวจะเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ

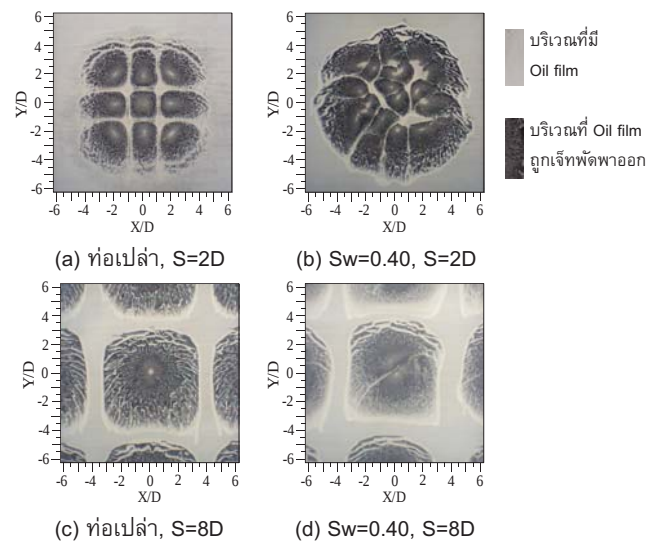
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลของเจ็บบนพื้นผิวที่มีต่อการไหลในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างเจ็บบนพื้นผิว $S=2D$ และ $S=8D$ ที่เงื่อนไข $L=2D$ จากรูปพบว่าในกรณีที่เงื่อนไข $S=2D$ บริเวณที่น้ำมันถูกพัดพาออกจากผิวที่เจ็บบนพื้นผิวจะกว้างกรณีของเจ็บบนพื้นผิว และผลของการหมุนควงของเจ็บบนพื้นผิวจะช่วยลดบริเวณที่น้ำมันสะสมหรือบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็บบนพื้นผิว $S=8D$ พบว่าผลของการหมุนควงของเจ็บบนพื้นผิวจะมีผลต่อการไหลในบริเวณที่เจ็บบนพื้นผิวเท่านั้น แต่มีผลต่อบริเวณที่มีน้ำมันสะสมอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งผลเหล่านี้สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็บบนพื้นผิว

3.4 สรุปผลการทดลอง

(1) ที่ระยะห่างระหว่างเจ็บบนพื้นผิว $L=2D$ การใช้กลุ่มเจ็บบนพื้นผิวแทนเจ็บบนพื้นผิวหมุนควงจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่

เจ็บบนพื้นผิวแต่ละลำพุ่งชนได้ แต่หากเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็บบนพื้นผิว L จะทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากเกิดการผสมกันระหว่างเจ็บบนพื้นผิวหมุนควงที่อยู่ติดกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว

(2) ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็บบนพื้นผิวมีค่าน้อย $S=2D$, $4D$ การใช้เจ็บบนพื้นผิวหมุนควงแทนเจ็บบนพื้นผิวจะสามารถช่วยลดพื้นที่บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำระหว่างบริเวณที่เจ็บบนพื้นผิวพุ่งชนได้ แต่ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็บบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น $S=6D$, $8D$ เจ็บบนพื้นผิวหมุนควง จะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้เพียงเล็กน้อย และไม่สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณระหว่างที่เจ็บบนพื้นผิวพุ่งชนได้



รูปที่ 10 แสดงผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็บบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน ($L=2D$)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Jung-Yang San, Mao De Lai, 2001. Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp.3997-4007.
2. Jung-Yang San, Yi-Ming Tsou, Zheng-Chieh Chen, 2007. Impingement heat transfer of staggered arrays of air jets confined a channel. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.50, pp.3718-3727.
3. Barata, J. M. M., 1996. Fountain flows produced by multiple impinging jets in cross flow. AIAA Journal, Vol.34, pp.2523-2530.
4. P. Brevet, C. Dejeu, E. Dorignac, M. Jolly, J.J. Vullierme, 2002. Heat transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp. 4191-4200.

ภาคผนวก ฅ5

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 7, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2552
จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 590-595.

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนผนังด้วยวิธีเชิงทัศน

Study of flow behaviors of swirling jet impinging on a wall using visualization method

มักตาร์ แวะหะยี ชยุต นันทดูลิต*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

Makatar Wae-hayee Chayut Nuntadusit*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสแวลล์นัมเบอร์และระยะห่างจากปากจากออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิว ในการทดลองได้ศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำโดยใช้วิธีเชิงทัศน คือวิธีผสมสีกับเจ็ทน้ำเพื่อดูลักษณะการกระจายของลำเจ็ท และวิธีใช้เข็มฉีดยาที่ตำแหน่งปากทางออกเจ็ทเพื่อดูโครงสร้างการไหลภายในเจ็ท สำหรับการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควงได้ใช้แผ่นบิดที่มีความยาวพิชต์ต่าง ๆ สอดในท่อเจ็ท ผลการทดลองพบว่าเจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากปากท่อจะแบ่งการไหลออกเป็นสองลำแล้วไหลพุ่งชนพื้นผิวและเกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่ง เมื่อสแวลล์นัมเบอร์ของเจ็ทเพิ่มขึ้น มุมระหว่างกระแสการไหลที่ออกจากหัวฉีดจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบ ๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวได้น้อยลงและมีโครงสร้างการไหลที่ซับซ้อน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนตามไปด้วย

คำหลัก การถ่ายเทความร้อน, พฤติกรรมการไหล, เจ็ทพุ่งชน, เจ็ทหมุนควง

Abstract

In this study, the effects of Swirl number and distance from nozzle to impinging surface on flow behavior of swirling jet when impinging normally to surface were investigated for understanding heat transfer mechanism on

impinging surface. In experiment, the flow behavior of a water swirling jet was studied in a water tank using visualization techniques. The jet spreading behavior was visualized by mixing jet with dye water and the flow structure in swirling jet was visualized by injecting dye with needles setting at the outlet of jet nozzle. A twisted plate with different twisted pitch length was inserted in nozzle pipe to generate swirling jet flow. The results show that the swirling jet from nozzle outlet is divided into two of streams and then impinge on the surface and two regions of high heat transfer rate appear on impinging wall. When the Swirl number of jet increases, the angle between two streams from nozzle outlet becomes larger and the mixing between jet and ambient water increases. When the distance from nozzle to impinging surface increases, the impingement of swirling jet on surface becomes weaker and the flow structure of jet becomes more complex, so the heat transfer on impinging surface decreases and heat transfer distribution is more complex.

Keywords: Heat transfer, Flow behavior, Impinging jet, Swirling jet

1. บทนำ

วิธีการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว (Impinging jet) ถูกนำมาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนและระบายความร้อนในงานอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น การอบให้ความร้อนแก้ว แผ่นโลหะ หรือสิ่งทอ การระบายความร้อนในกังหันใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ การระบายความร้อนของ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากวิธีนี้ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงในบริเวณที่ห่างออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน โดยปกติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งหากสามารถควบคุมการไหลของเจ็ทได้แล้วจะสามารถควบคุมการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวได้ด้วย เช่น การให้หรือระบายความร้อนเฉพาะจุดหรือเป็นบริเวณกว้าง ที่ผ่านมาจากคณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้เจ็ทหมุนควงเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากเจ็ทหมุนควงจะมีการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆมากกว่าเจ็ทแบบไม่หมุนควง ทำให้ระดับความปั่นป่วนภายในเจ็ทสูงขึ้นและเจ็ทหมุนควงมีอัตราการขยายตัวที่สูงทำให้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นบริเวณกว้างขึ้น [1,2,3] สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณรอบๆได้ จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงที่สร้างโดยสอดแผ่นบิตในท่อเจ็ทเบื้องต้น [4] พบว่า บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะเกิดบริเวณที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง 2 บริเวณอยู่ห่างกัน และเมื่อสเปิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทและระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างทั้งสองบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้างโดยเฉพาะกรณีที่อยู่ห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L < 8D$ แต่อย่างไรก็ตาม ยังขาดข้อมูลเกี่ยวกับการไหลของเจ็ท ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและสเปิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ท

2. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

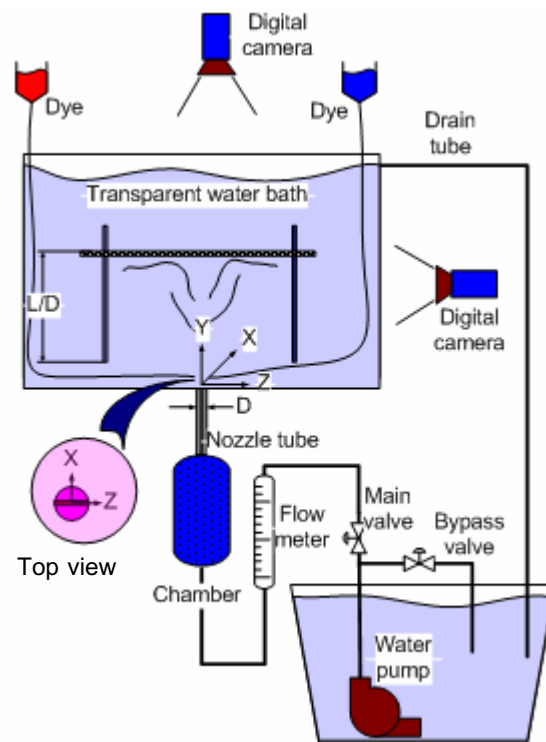
ในการทดลองจะศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำในตู้ด้วยวิธีเชิงทัศน เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของเจ็ทหมุนควงอิสระและโครงสร้างการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิว นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษารายการไหลของเจ็ท

2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง โดยตู้ที่ใช้ในการศึกษาจะทำจากแผ่นพลาสติกใสมีขนาดกว้าง 60 cm ยาว 62 cm และสูง 50 cm เพื่อให้สามารถดูการไหลของเจ็ทได้ ในการทดลองเจ็ทน้ำจะถูกส่งจากถังเก็บน้ำด้านล่างโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 250 วัตต์ ผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบลูกลอยไปยังถังพักน้ำและท่อเจ็ท โดยเจ็ทน้ำจะออกจากท่อเจ็ทที่ต่อกับบริเวณตรงกลางของผนังด้านล่างของตู้ ในการศึกษาการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจะติดตั้งแผ่นเรียบที่ทำจากแผ่นพลาสติกใสหนา 10 mm เหนือปากทางออกของท่อเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 1 ในการทดลองสามารถปรับระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ท

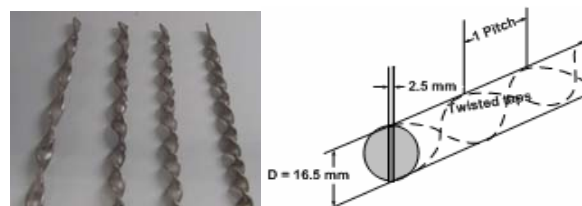
พุ่งชนได้ และเมื่อต้องการศึกษาการไหลของเจ็ทอิสระจะนำแผ่นที่เจ็ทพุ่งชนน้ออกจากตู้

จากรูปที่ 1 กำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด และให้แกน X อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันของแผ่นบิต แกน Y อยู่ในแนวที่เจ็ทไหลออกจากท่อ และแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับสันของแผ่นบิต



รูปที่ 1 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง

2.2 ตัวกำเนิดกระแสน้ำหมุนควง



รูปที่ 2 แผ่นบิตที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิตในท่อเจ็ท

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิตที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิตที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิตนี้ทำจากแผ่นสแตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ขนาดความกว้าง 16.5 mm มีขนาดความยาว 300 mm บิตในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และสอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิตสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ทเนื่องจากแผ่นบิตเป็นตัวแยกการไหลในท่อเจ็ทและเกลียวของแผ่น

ปิดจะบังคับให้เกิดการไหลแบบหมุนควงภายในท่อ ดังนั้นการไหลที่ออกมาจากท่อเจ็ทจะแยกการไหลออกเป็นสองลำ

สำหรับระดับความแรงของการหมุนควงของเจ็ทจะนิยามโดยใช้ค่าสเวิร์ลน์มเบอร์ (Swirl Number) ซึ่งมีนิยาม คือ

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \quad (1)$$

ในที่นี้ G_θ คือฟลักซ์โมเมนตัมเชิงมุมตามแนวแกนเจ็ท, G_n คือฟลักซ์โมเมนตัมเชิงเส้นตามแนวแกนเจ็ทและ R คือรัศมีท่อเจ็ท โดยค่าฟลักซ์ในแต่ละเทอมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทได้ดังนี้ คือ

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \quad (2)$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \quad (3)$$

เมื่อ V_n คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, V_θ คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, ρ คือความหนาแน่นของเจ็ท ในที่นี้จะสมมติให้ V_n มีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี และให้ $V_\theta = \omega r$ โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี ในกรณีที่ใช้แผ่นบิตสอดในท่อเจ็ท ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทจะคำนวณได้จากจำนวนพิตช์ (n) และความยาวแผ่นบิต (l) ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (4)$$

จากสมการทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ของค่าสเวิร์ลน์มเบอร์ ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi n R}{l} \quad (5)$$

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแผ่นบิตทั้งหมดที่สร้างขึ้นและค่าประมาณทางทฤษฎีของสเวิร์ลน์มเบอร์ของแผ่นบิตแต่ละแบบ

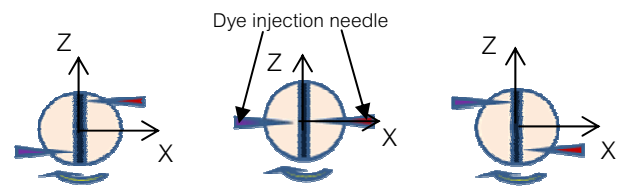
ตารางที่ 1 แสดงจำนวนพิตช์ต่อความยาวและค่าสเวิร์ลน์มเบอร์

Number of pitch ($l=300\text{mm}$)	Swirl number
0	0.00
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

2.3 การศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน จะใช้วิธีผสมสีบานเย็นในถังน้ำของเจ็ทแล้วดูลักษณะการกระจายของเจ็ทสีที่ไหลออกจากท่อเจ็ท อีกวิธีหนึ่งจะใช้เข็มฉีดยาที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ทเข้าไปในกระแสการไหลของเจ็ทน้ำ แล้วดูเส้นทางการไหลของสีในเจ็ท วิธีนี้สามารถดูโครงสร้างการไหลภายในเจ็ทได้ ในการทดลองได้วางเข็มฉีดยา 3 ลักษณะที่ปากทางออกของท่อเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อติดตามดูเส้นทางการ

ไหลจากเข็มฉีดยาแต่ละตำแหน่งจะใช้สีที่แตกต่างกัน คือ สีบานเย็น และสีน้ำเงินฉีดออกจากแต่ละเข็ม



(ก) ตำแหน่ง A (ข) ตำแหน่ง B (ค) ตำแหน่ง C
รูปที่ 3 ลักษณะการวางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกของเจ็ท

นอกจากนี้ได้ติดตั้งกล้องบันทึกภาพแบบดิจิทัลและหลอดไฟให้แสงสว่างโดยตำแหน่งการติดตั้งกล้องบันทึกภาพมีอยู่สองตำแหน่ง คือด้านข้างและด้านบนของตู้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ตำแหน่งของกล้องที่อยู่ด้านข้างจะจับภาพการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนผนัง และกล้องที่อยู่ด้านบนจะจับภาพการไหลของเจ็ทบนผนัง

2.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ในการทดลองใช้เจ็ทน้ำอุณหภูมิ 30°C พุ่งชนบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ $q=447 \text{ W/m}^2$ เพื่อระบายความร้อน ในการทดลองได้ใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางเป็นแผ่นที่เจ็ทพุ่งชน โดยซึ่งแผ่นสแตนเลสให้ตั้งและยึดด้วยแผ่นทองแดงทั้งสองข้างกับแผ่นพลาสติกใส และจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟไหลผ่านเพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนขึ้นตลอดทั้งผิว สำหรับการวัดการกระจายอุณหภูมิและศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลที่เปลี่ยนสีจากดำ น้ำตาล เหลือง เขียว น้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ $30-36^\circ\text{C}$ ติดบนแผ่นสแตนเลสที่ผิวด้านตรงข้ามกับผิวด้านที่เจ็ทน้ำพุ่งชน

3. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

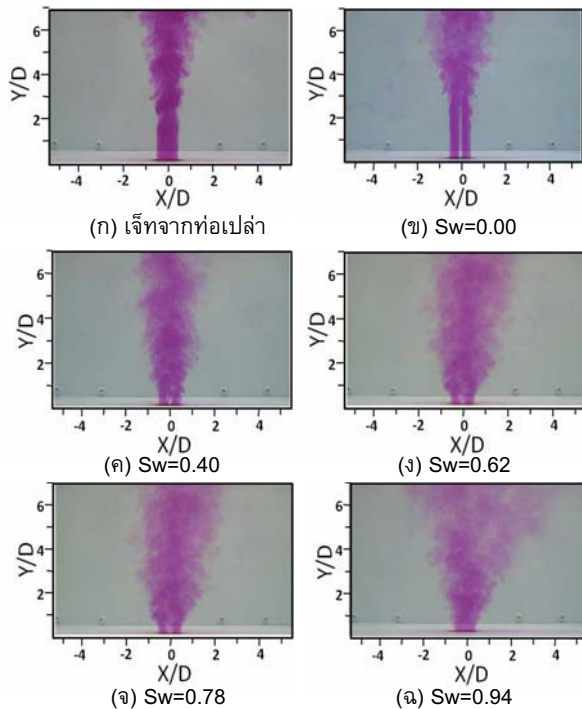
ในแต่ละการทดลองจะกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทน้ำคงที่ โดยมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่คิดจากอัตราการไหลเท่ากับ $Re=760$ สำหรับตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ (โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเจ็ท) และค่าสเวิร์ลน์มเบอร์ของเจ็ทหมุนควง $Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีของเจ็ททอเปล่า (ไม่ใช่แผ่นบิต) เพื่อเปรียบเทียบการไหลกับกรณีของเจ็ทแบบหมุนควงด้วย

4. ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะการกระจายของเจ็ทอิสระ

รูปที่ 4 แสดงลักษณะการกระจายของเจ็ทอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลน์มเบอร์ต่างๆ จากรูปพบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ทในช่วง $Y/D=0-2$ จะมีลักษณะเป็นลำออกจากปากทางออก หลังจากนั้นเจ็ทจะเริ่ม

กระจายตัวออกทางด้านข้าง และเจ็ทที่เจือไน $Sw=0.00$ จะเกิดบริเวณที่ไม่มีสีในลำเจ็ทซึ่งเป็นผลจากสันของแผ่นปิด สำหรับเจ็ทหมุนควง การกระจายของเจ็ทออกทางด้านข้างเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปากทางออก ($Y/D=0$) และการขยายตัวของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นตามสแควร์ลัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองนี้สามารถดูได้เพียงการกระจายของเจ็ทเท่านั้น ไม่สามารถเห็นโครงสร้างการไหลที่เกิดขึ้นภายในเจ็ทได้



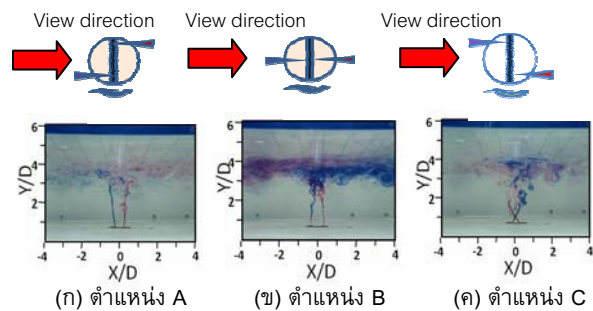
รูปที่ 4 ลักษณะการกระจายของเจ็ทอิสระที่เจือไนสแควร์ลัมเบอร์ต่างๆ ($Re=760$)

4.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนผนัง

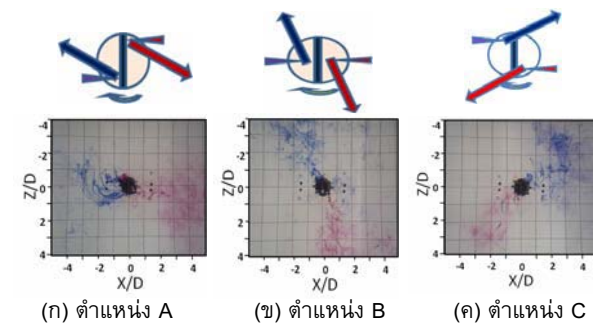
การศึกษาโครงสร้างการไหลภายในเจ็ทวิธีหนึ่งจะใช้เข็มฉีดยาที่ปากทางออกของท่อเจ็ทเข้าไปในกระแสการไหลของเจ็ทน้ำ แล้วดูเส้นทางการไหลของสี รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างของลักษณะการไหลกรณีที่เราวางเข็มฉีดยา 3 ลักษณะที่ปากทางออกของท่อเจ็ท จากรูปพบว่าเส้นทางการไหลของเจ็ทจากแต่ละตำแหน่งที่ปากทางออกจะต่างกัน โดยที่เจ็ทที่ตำแหน่ง A ไกลกับสันแผ่นปิดตรงขอบท่อจะไหลแยกห่างจากกันก่อนที่จะพุ่งชนผนัง เจ็ทที่ตำแหน่ง B ตรงกลางช่องทั้งสองของท่อจะไหลเข้าหากันและเกิดการผสมกันก่อนที่จะพุ่งชนผนัง และเจ็ทที่ตำแหน่ง C ไกลกับสันแผ่นปิดตรงขอบท่อจะไหลออกในแนวเฉียงทำมุมกับแกนการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนผนัง

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างลักษณะการไหลของเจ็ทบนผนังในกรณีที่ถ่ายภาพจากด้านบนของผนัง ในรูปแสดงเส้นทางการไหลของสีหรือเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังจากเข็มฉีดยาที่วางในแต่ละตำแหน่งที่ปากทางออก โดยเส้นทางการไหลของเจ็ทจากเข็มฉีดยาบนผนังสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน

พื้นผิวแล้วเจ็ทจะไหลออกในแนวรัศมี โดยที่ทิศทางการไหลของเจ็ทบนผนังจะได้รับอิทธิพลจากการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนผนัง ซึ่งจะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนควงของแผ่นปิด



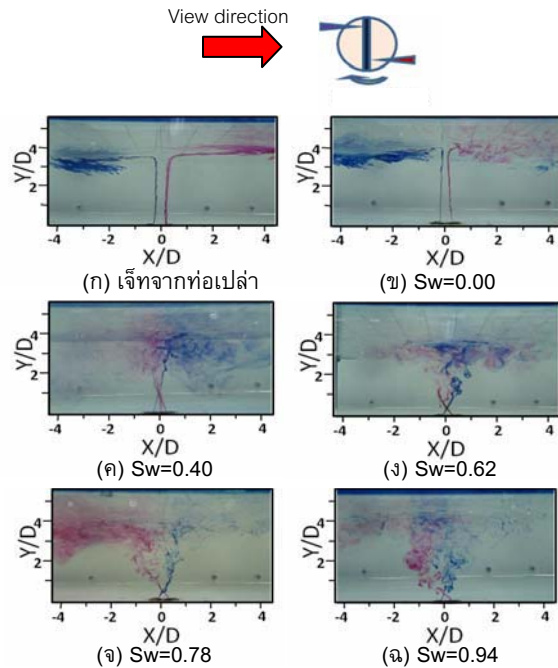
รูปที่ 5 เส้นทางการไหลของสีตามการวางเข็มฉีดยาทั้งสามแบบในกรณีเจ็ทพุ่งชนผนัง $Sw=0.62$, $L=4D$, $Re=760$ (ถ่ายภาพจากด้านบน)



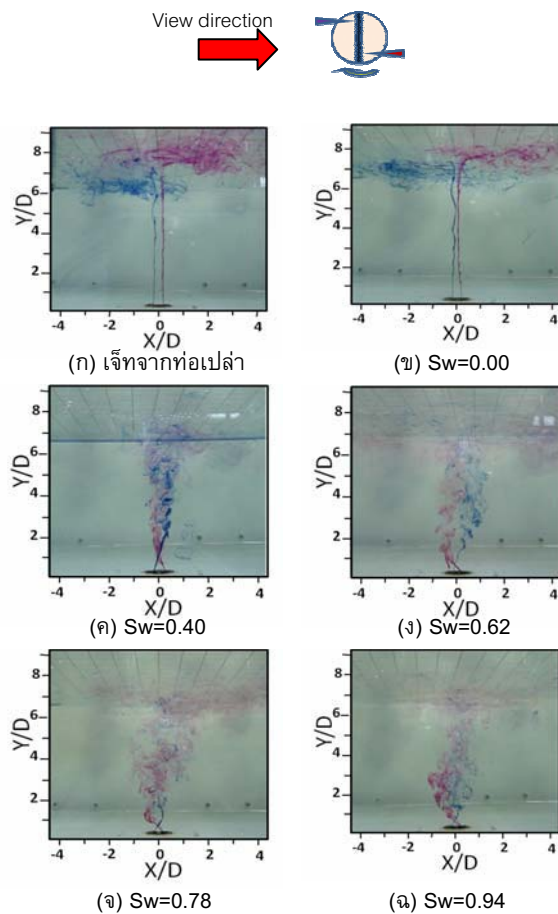
รูปที่ 6 เส้นทางการไหลของสีตามการวางเข็มฉีดยาทั้งสามแบบในกรณีเจ็ทพุ่งชนผนัง $Sw=0.40$, $L=4D$, $Re=760$ (ถ่ายภาพจากด้านบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน)

รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลของสแควร์ลัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนผนังที่ระยะ $L=4D$ และ $8D$ ตามลำดับ ในแต่ละรูปจะวางเข็มฉีดยาในตำแหน่ง C ซึ่งเจ็ทที่อยู่ด้านขวามือของสันแผ่นปิดจะแทนด้วยสีบานเย็นและเจ็ทที่อยู่ด้านซ้ายมือจะแทนด้วยสีน้ำเงิน จากรูปพบว่าที่ระยะพุ่งชน $L=4D$ และ $8D$ เส้นทางการไหลของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่ $Sw=0.00$ จะอยู่ในแนวแกน Y เท่านั้น

ในขณะที่เจ็ทที่มีค่าสแควร์ลัมเบอร์มากกว่าศูนย์ สแควร์ลัมเบอร์จะมีผลต่อมุมของเส้นทางการไหลของเจ็ทหมุนควงที่ตำแหน่งปากทางออก เมื่อค่าสแควร์ลัมเบอร์เพิ่มขึ้น มุมของเจ็ทที่ทำกับแนวแกนการไหล (แกน Y) จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ มีผลทำให้การกระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้นและเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่ในบริเวณรอบๆ มากขึ้น หลังจากที่เจ็ทมีความเร็วลดลงที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกจะสามารถสังเกตเห็นบริเวณที่เกิดการผสมกันระหว่างสีน้ำเงินและสีบานเย็นขึ้น ซึ่งในบริเวณนี้จะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อน

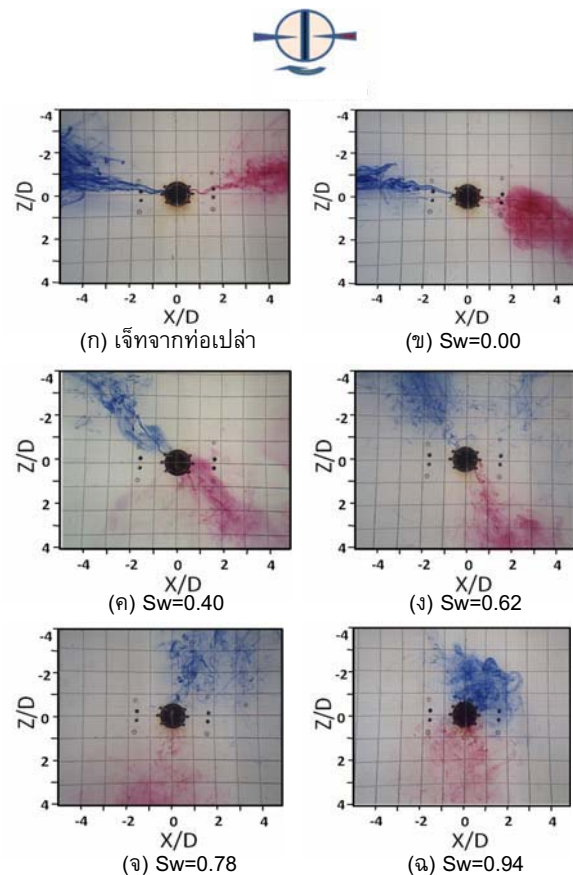


รูปที่ 7 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ้ง
ชนผนังที่ระยะ $L=4D$ (วางเข็มตำแหน่ง C, $Re=760$)



รูปที่ 8 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ้ง
ชนผนังที่ระยะ $L=8D$ (วางเข็มตำแหน่ง C, $Re=760$)

จากผลการทดลองในกรณีนี้ที่ระยะ $L=4D$ (รูปที่ 7) พบว่าเมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มขึ้น ก่อนที่เจ็ทจะพุ้งชนพื้นผิวเจ็ทจะขยายตัวและพุ้งชนพื้นผิวเป็นบริเวณกว้างขึ้น และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเส้นที่แต่ละเส้นที่พุ้งชนผนังจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง คือในบริเวณที่เจ็ทพุ้งชนจะเกิดตำแหน่งที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ และระยะห่างระหว่างบริเวณทั้งสองนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทหมุนควงเพิ่มขึ้น [4] และในกรณีนี้ที่ระยะเพิ่มขึ้นเป็น $L=8D$ (รูปที่ 8) พบว่าเมื่อเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทหมุนควงจะทำให้เจ็ทเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่รอบๆมากขึ้น และการพุ้งชนของเจ็ทบนผนังจะลดลงโดยเฉพาะที่เงื่อนไข $Sw>0.40$

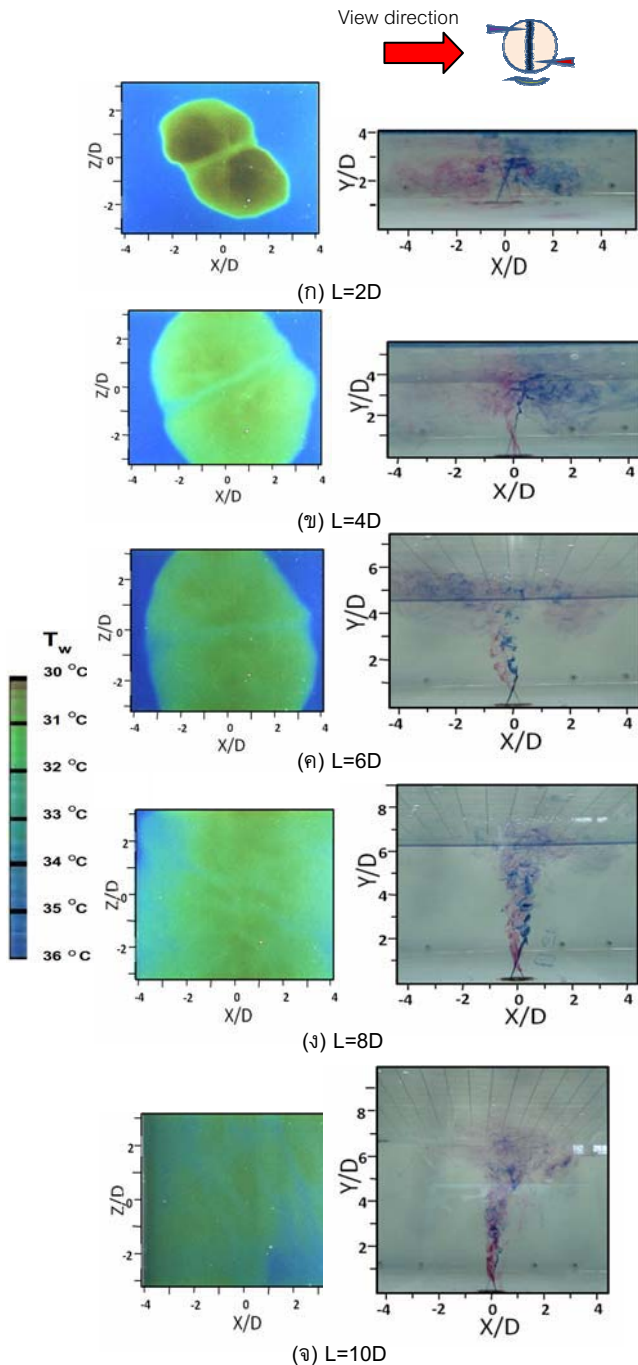


รูปที่ 9 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบน
ผนังที่เงื่อนไข $L=2D$, $Re=760$ (วางเข็มตำแหน่ง B,
ถ่ายรูปจากด้านบนของผนัง)

รูปที่ 9 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังที่เงื่อนไข $L=2D$ ในรูปเข็มฉีดสีขาวอยู่ในตำแหน่ง B และถ่ายภาพจากด้านบนของผนัง จากรูปพบว่าสเวิร์ลนัมเบอร์จะมีผลต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังดังนี้ กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทกรณี $Sw=0.00$ เจ็ทจะไหลบนผนังตามแนวแกน X ไปทางด้านซ้ายและขวาในแนวรัศมี กรณีเจ็ทหมุนควง $Sw=0.40$ เจ็ทที่ไหลบนผนังจะไหลออกในแนวรัศมีทำมุมบิดกับแนวแกน X ตามเข็มนาฬิกาประมาณ 45° และเมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ท

เพิ่มมากขึ้นมุมบิดของเจ็ทที่ไหลบนผนังก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.3 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 10 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (เข้มนิดสีขาวที่ตำแหน่ง C) และการไหลของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ($q=447 \text{ W/m}^2$, $T_j=30^\circ\text{C}$)

รูปที่ 10 แสดงผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อเส้นทางการไหลในกรณีเจ็ทหมุนควง $Sw=0.40$ พุ่งชนผนัง จากรูปพบว่าที่ระยะ $L=2D$ เจ็ทจะไหลออกจากหัวฉีดและพุ่งชนผนังทันที และเมื่อระยะ L เพิ่มขึ้นจะเกิดการผสมกัน

ระหว่างเส้นสีก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนผนัง ทำให้โมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนผนังลดลง เนื่องจากการผสมระหว่างเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบๆ สำหรับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พบว่าที่ระยะ $L=2D$ จะเกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงแยกออกเป็นสองบริเวณที่ห่างจากกันเนื่องทำมุมกับแกน X ดังแสดงในรูป ที่ระยะ $L=4D$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะขยายเป็นบริเวณกว้างขึ้นแต่การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี $L=2D$ เนื่องจากโมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนผนังลดลง เช่นเดียวกับที่ระยะ $L=6D$ และ $8D$ พบว่าพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นแต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง และที่ระยะ $L=10D$ การถ่ายเทความร้อนจะมีลักษณะที่ซับซ้อนตามการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว

5. สรุป

เจ็ทหมุนควงจากท่อที่สอดผ่านผนังจะแบ่งออกเป็นการไหลสองลำแล้วไหลพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างกัน เมื่อสแควร์ลัมเบอร์ของเจ็ทเพิ่มขึ้น มุมของกระแสเจ็ทที่ไหลออกจากท่อเจ็ทจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การผสมกันของเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวได้น้อยลงและมีโครงสร้างการไหลที่ซับซ้อน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนตามไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.V. Alekseenko, A.V.Bilsky, V.M.Dulin, D.M.Markovich, Experimental study of an impinging jet with different swirl rates, 2007, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp.1340-1359
- [2] L. Huang, M.S. El-Genk, Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets, 1998, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, pp. 583-600
- [3] M.Y. Wen, K.J. Jang, An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips, 2003, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.46, pp. 4657-4667
- [4] มักรัตน์ แวหะยี่, ชยุต นันทดูลิต และ อติ บุญจิตราดุลย์. 2551. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ. การประชุมการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 7, 13-14 มีนาคม 2551 จังหวัดเชียงใหม่ หน้าที่ 158-163

ภาคผนวก ฅ6

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 – 7 พฤศจิกายน 2552
จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060

เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล**Wall Heat Transfer Measurement Technique Using****Thermochromic Liquid Crystal Sheet**

มักตาร์ แวหะยี¹ และ ชยุต นันทดุสิต^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคลองหอยโข่ง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

*ผู้ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th, โทร 0-7428-7035, โทรสาร 0-7421-2893

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดอุณหภูมิและการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวและของไหลโดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล ในบทความจะอธิบายถึงคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล วิธีการใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีเชิงทัศนและเชิงปริมาณ วิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวและจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในงานวิจัย เช่น การถ่ายเทความร้อนของเจ็ตที่พุ่งชนบนพื้นผิว

คำหลัก: เทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล, วิธีเชิงทัศน, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

The objective of this article is to introduce measurement method of temperature and convective heat transfer coefficient using temperature dependent characteristic of Thermochromic Liquid Crystal (TLC) Sheet. This article describes the property of Thermochromic Liquid Crystal, temperature calibration method, qualitative and quantitative temperature measurement method and convective heat transfer coefficient measurement on a surface. This article also describes example in applying this method to study heat transfer phenomena such as jet impingement on flat surface.

Keywords: Thermochromic Liquid Crystal, Visualization technique, Heat transfer coefficient

1. บทนำ

การวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหนึ่งๆ เทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นการวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสโดยตรงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล หรือใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Gauge) ติดบนผิววัสดุโดยตรงเพื่อวัดอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่ต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนแบบเฉพาะตำแหน่งโดยละเอียดนั้น จำเป็นต้องติดหัววัด (Probe) เป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและทำการวัดค่าพร้อมๆ กัน ในกรณีที่บนพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณแคบๆ จะไม่สามารถทำการวัดได้โดยละเอียด อีกทั้งวิธีนี้มีการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัด ทำให้การวัดค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวคลาดเคลื่อนไป และมีผลทำให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนคลาดเคลื่อนไปด้วย

การวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermometry) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวก เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยการวัดการแผ่รังสีจากผิววัตถุ แต่การใช้งานจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แม่นยำและเชื่อถือได้ และในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีบนพื้นผิวมีค่าต่ำๆ จะทำให้การวัดคลาดเคลื่อนได้สูง ซึ่งการวัดโดยวิธีนี้จะขึ้นกับสิ่งแวดล้อมในการวัดมาก และในบางกรณีไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ เช่น การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่จมในของเหลว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดจากพื้นผิวไม่สามารถผ่านของเหลวได้หมด เหตุผลอีกอย่างคืออุปกรณ์วัดมีราคาค่อนข้างสูง

เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกคริสตัล (Thermochromic liquid crystals,

TLCs) เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกคริสตัลซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่า 30 ปี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัด และสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวดูด้วยตาเปล่าได้ และในปัจจุบันมีการพัฒนาของอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิทัลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น สามารถใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กังหันแก๊สเทอร์ไบน์ หรือการวัดการให้ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ ในอุตสาหกรรม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุเทอร์โมโครมิกคริสตัลในการวัดอุณหภูมินั้น จำเป็นต้องเลือกชนิดของเทอร์โมโครมิกคริสตัลให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และต้องทำการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมโครมิกคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ ในบทความนี้จะแนะนำเกี่ยวกับวิธีการใช้เทอร์โมโครมิกคริสตัลสำหรับการวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว และตัวอย่างการนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน

2. เทอร์โมโครมิกคริสตัล

สารเทอร์โมโครมิกคริสตัลเป็นสารประกอบจำพวกออกแซนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิควิดคริสตัลมีสถานะเป็นของแข็งเมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความ

ยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้

สำหรับการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ ($T_{bs}-T_{rs}$) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm อยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็ก หรือของเหลวสำหรับทาบนผิวหรือโพลิเมอร์แบบแผ่นแบนอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติดสามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ

3. วิธีการวัดอุณหภูมิ

ในการนำไปประยุกต์ใช้วัดอุณหภูมิ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามช่วงความกว้างอุณหภูมิที่เปลี่ยนสี คือ ประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบ (Narrow-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 1°C - 2°C และประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง (Wide-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิมะหว่าง 5°C - 20°C การเลือกใช้

ประเภทของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานและช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด ในการวัดอุณหภูมิที่ต้องการความละเอียดจะใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลแบบช่วงแคบ ในกรณีต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวสามารถใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลแบบช่วงแคบหลายชนิดผสมกัน (Multi-event narrow-band TLC) หรือใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลแบบช่วงกว้างแทน ซึ่งสามารถแสดงการกระจายของเส้นอุณหภูมิกว้างหรือเส้นของสีต่างๆ บนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียว

สำหรับสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบมีข้อดีคือ มีความถูกต้องและความละเอียดในการวัดอุณหภูมิสูง และสะดวกในการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ ใช้ระบบประมวลผลภาพที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้ในการวัดการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้างได้ ในขณะที่สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถดูการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวทั้งหมดแต่ต้องใช้ระบบประมวลผลภาพที่ซับซ้อนเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิแบบเชิงปริมาณที่แม่นยำ

3.2 การสอบเทียบอุณหภูมิ

การสอบเทียบสกับอุณหภูมิเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดมีผลต่อความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ โดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสอบเทียบสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ (Isotherm) และวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมบนผนัง (Temperature gradient) ที่ทราบอุณหภูมิ

สำหรับวิธีสอบเทียบอุณหภูมิมบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ วิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิมบนผิวที่เคลือบสารหรือติดแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลให้คงที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นและใช้กล้องดิจิทัลในการบันทึกสี เพื่อสร้างข้อมูลสอบเทียบระหว่างสีกับอุณหภูมิ การ

สอบเทียบทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิบนผนังจนสารเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอลเริ่มเปลี่ยนสี หลังจากนั้นจะทำการบันทึกอุณหภูมิบนผนังในขณะนั้นและบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอล กระบวนการนี้จะทำซ้ำที่อุณหภูมิผนังสูงขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่เทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอลเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ถึงแม้ขั้นตอนของการสอบเทียบและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อนแต่ต้องใช้เวลาในการสอบเทียบมาก เนื่องจากต้องทำการสอบเทียบข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้ข้อมูลของสีสำหรับใช้วัดอุณหภูมิเพียงพอ

สำหรับวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการกระจายอุณหภูมิ (Gradient method) วิธีนี้จะทำการติดแผ่นหรือเคลือบสารเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอล บนผนังที่มีการกระจายบนอุณหภูมิ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเชิงเส้นและทราบอุณหภูมิแต่ละจุด วิธีนี้สามารถสอบเทียบอุณหภูมิและสีบนเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอลได้อย่างต่อเนื่อง เพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสีบนผนังและของสารเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอลเป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้ได้ข้อมูลของการสอบเทียบมากกว่าวิธีแรก และเวลาในการสอบเทียบน้อยกว่า สามารถได้ข้อมูลระหว่างสีกับอุณหภูมิจากการบันทึกภาพเพียงครั้งเดียว

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะใช้การสอบเทียบโดยวิธีใดก็ตาม ระบบบันทึกภาพ เงื่อนไขการให้แสงสว่าง และการถ่ายภาพ เช่น มุมการให้แสงและมุมบันทึกภาพ ที่ใช้ในการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ ควรจะใช้เหมือนกับเงื่อนไขที่ใช้งานจริง

3.3 การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว

ในการวัดอุณหภูมิบางครั้งต้องการเพียงแค่อุณหภูมิโดยประมาณเท่านั้น การวัดอุณหภูมิจากสีของแผ่น เทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอล สามารถทำได้ด้วยการใช้สายตาเปล่าของมนุษย์ โดยไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดอื่นๆ สามารถดูการกระจายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอลได้ แต่การใช้สายตาผู้

สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวจะขึ้นกับผู้สังเกตแต่ละคน ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง

Hoogendoorn [1] ใช้วิธีวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยเทียบสเกลของสีที่ทราบอุณหภูมิกับสี เทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอลที่ปรากฏบนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ ต่อมาได้มีการบันทึกภาพด้วยกล้องและใช้พีวเดอร์ในการเลือกสีแทนสายตามนุษย์ ต่อมา Goldstein และ Timmers [2] ทำการบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอล โดยใช้กล้องขาวดำและพีวเดอร์ หลังจากนั้นหาเส้นที่สว่างที่สุดจากภาพที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถระบุเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) จากภาพที่ได้ แต่วิธีที่กล่าวมานี้สามารถใช้ในการหาเส้นอุณหภูมิคงที่ เท่านั้น ยังไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทุกจุดได้ ต่อมาได้มีการใช้กล้องบันทึกสีแบบดิจิทัลและเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ มาช่วยในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏเป็นข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกต Akino และคณะ [3] ได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลค่าสีหลักทั้ง 3 ค่าที่ได้จากการสอบเทียบในการสร้างสมการโพลิโนเมียมอันดับที่ 2 เพื่อใช้ในการทำนายการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามวิธีการนิยามนี้ ไม่เหมาะที่จะใช้ในการวัดอุณหภูมิเนื่องจากต้องใช้ค่าสีหลักทั้ง 3 ค่าคือ R-, G-, B- ในการแปลงเป็นอุณหภูมิที่แต่ละจุด (Pixel) บนภาพของเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอล ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้งานจริง ต่อมา Camci [4] ได้พัฒนาวิธีการวัดโดยใช้ค่าของสีเพียงค่าเดียวในการวัดอุณหภูมิ โดยสีที่บันทึกในระบบ RGB จะถูกแปลงให้อยู่ในระบบ HSV และใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสเกลค่าสีหลัก (Hue, H) ในระบบ HSV และอุณหภูมิ ($H = H(T)$) และใช้ความสัมพันธ์นี้ในการทำนายอุณหภูมิบนพื้นผิว แต่ก็มีข้อควรระวังในการวัดด้วยวิธีนี้คือ คุณภาพของแสงที่ส่องสว่างบนเทอร์โมโครมิกคลิควิตคริสตอล หรือแสงที่ส่องสว่างควรจะเหมือนกันระหว่างที่ใช้ในช่วงสอบเทียบสีและในการทดลองจริง มิฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสีกับ

อุณหภูมิจะเปลี่ยนได้และทำให้อุณหภูมิที่วัดได้คลาดเคลื่อน แต่ในการใช้งานวัดจริงนั้น เงื่อนไขของแสงสว่างจะควบคุมให้เหมือนกันได้ยาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการส่องสว่างจำเป็นต้องนำไปพิจารณาด้วย ซึ่ง Farina และคณะ [5] ได้เสนอวิธีการใช้ภาพสีอ้างอิงก่อนการสอบเทียบกับอุณหภูมิ และก่อนการนำไปใช้วัดจริง เพื่อที่จะแก้ไขปัญหานี้โดยการเทียบระหว่างสองภาพอ้างอิง

อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดที่พัฒนาโดย Camci [4] และ Farina และคณะ [5] ยังคงมีข้อจำกัด คือ อุณหภูมิในช่วงที่มากกว่า T_{bs} ค่าของสีหลัก (H) จะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เป็นผลให้ความละเอียดในการวัดอุณหภูมิน้อยลง แม้ว่าสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลเองยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า T_{rs} ความผิดพลาดของการวัดค่า R, G, B เพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีหลัก จากเหตุผลเหล่านี้ การใช้สีหลัก (Hue) จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นปริมาณในการระบุปริมาณสี เพื่อแก้ไขปัญหานี้ Nakabe และคณะ [6] ได้ใช้วิธีการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ โดยใช้ 3 สีหลักทั้งหมด R-, G-, B- ที่ได้จากการบันทึกภาพและใช้ Neural Network Algorithm ในการแปลงข้อมูลสีเป็นข้อมูลอุณหภูมิ วิธีนี้สามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการวัดได้ โดยเฉพาะในช่วงสีน้ำเงิน แต่ค่อนข้างจะซับซ้อนเมื่อเทียบกับการใช้สีหลักเพียงตัวเดียวในการพิจารณา

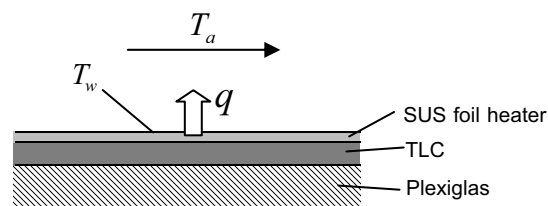
4. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการใช้วิธีแบบสภาวะคงตัวในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิ T_a ไหลผ่าน ในรูปจะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางเป็นพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิ และให้ความร้อนแก่พื้นผิวโดยผ่านกระแสไฟฟ้า I ผ่านแผ่นสแตนเลสที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้า R ค่าฟลักซ์ความร้อน $\dot{q}$ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสามารถคำนวณจากสมการ (1) และอุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิว T_w จะวัดจากสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลที่เคลือบบนด้านหลังของแผ่นสแตนเลส

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวแต่ละจุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \quad (1)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_a} \quad (2)$$



รูปที่ 1 ตัวอย่างการใช้วิธีแบบสภาวะคงตัว

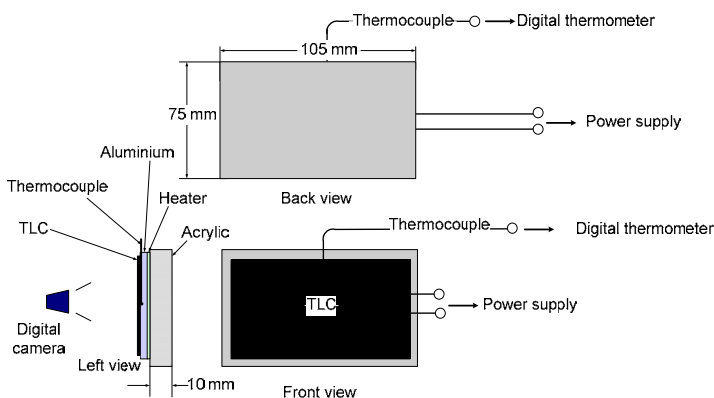
นอกจากนี้วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลเป็นแบบเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบหรือกว้างอีกด้วย สำหรับวิธีการใช้วัดอุณหภูมิมบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว ในกรณีใช้สารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลที่มีการเปลี่ยนสีในอุณหภูมิแคบจะไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิมหรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ ดังนั้นในการวัดจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง เนื่องจากเทคนิคนี้ต้องการเพียงหนึ่งสีหรือหนึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบเท่านั้น โดยปกติจะใช้เส้นสีเหลือง เพราะมีความสว่างค่อนข้างสูง ในการสร้างการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งพื้นผิวจำเป็นที่จะต้องถ่ายภาพเป็นจำนวนมาก ความละเอียดและความถูกต้องของวิธีการวัดนี้จะขึ้นกับช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลที่ใช้และความละเอียดของการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว การใช้สารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลที่เปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้างแทนจะสามารถลดข้อจำกัดนี้ได้ สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียวในกรณีที่ช่วงการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลกว้างพอที่จะแสดงสีทั้งหมดบนพื้นผิววัด

อุณหภูมิ แต่เพื่อความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิ วิธีนี้ต้องการจำนวนจุดที่สอบเทียบจำนวนมาก

5. ตัวอย่างการนำไปใช้งาน

5.1 การสอบเทียบอุณหภูมิ

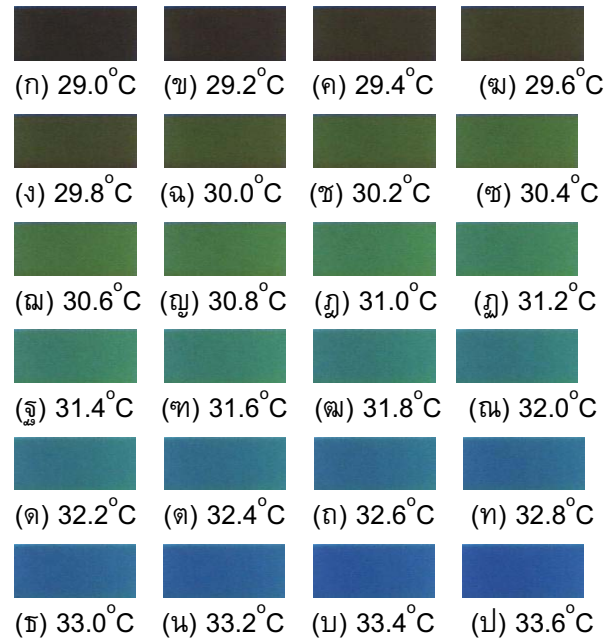
รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีตเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใส ขั้วของฮีตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีตเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีตเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลเพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมได้เจาะรูสำหรับติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28°C – 37°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม



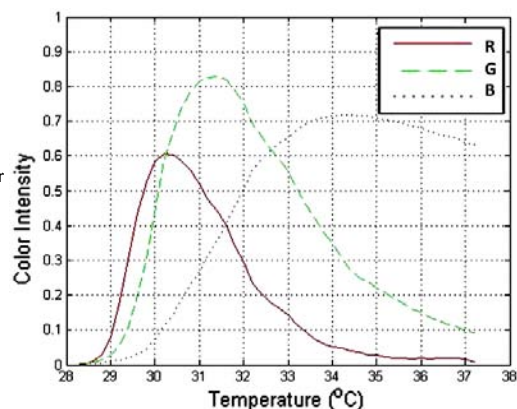
รูปที่ 2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างผลการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แยกตัวประกอบสี RGB แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวประกอบสีที่อุณหภูมิต่างๆ ตามที่ได้แสดงในรูป

ที่ 4 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟ R และ G ตัดกันที่อุณหภูมิ $30.2 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลมีสีเหลืองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3 (ข) จากนั้นจะได้เงื่อนไขเส้นสีเหลืองที่มีส่วนประกอบของสี R ที่มีค่าเท่ากับสี G ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลการสอบเทียบ

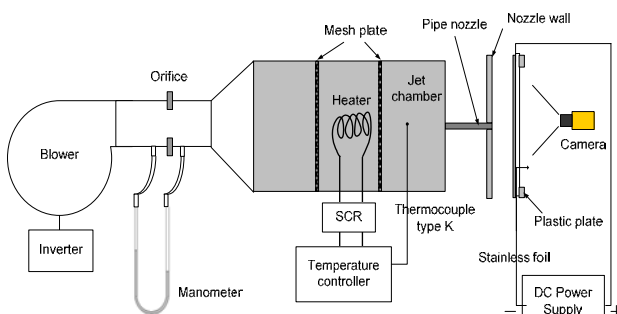


รูปที่ 4 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสีจากแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน

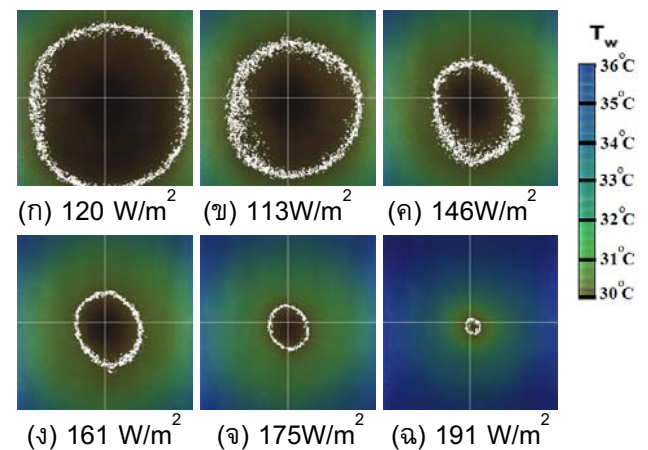
โดยใช้แผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตอล ในการทดลองจะใช้ เจ็ทอากาศจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อยุ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=16.5$ mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ และค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ $Re=20,000$ เจ็ทอากาศจะถูกส่งจากโบรเวอร์ผ่านชุดของออร์ริฟิส ชุดฮีตเตอร์ถึงกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท สำหรับผนังที่เจ็ทพุ่งชนจะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm ซึ่งให้เรียบดั่งกับแผ่นพลาสติก ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ซึ่งที่ปลายของแผ่นสแตนเลสจะยึดด้วยแท่งทองแดงไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส จากนั้นเจ็ทอากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลชนแผ่นสแตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อนบนพื้นผิว จากนั้นสามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตอลที่ติดด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) ลักษณะที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตอลจะบันทึกโดยใช้กล้องดิจิทัล



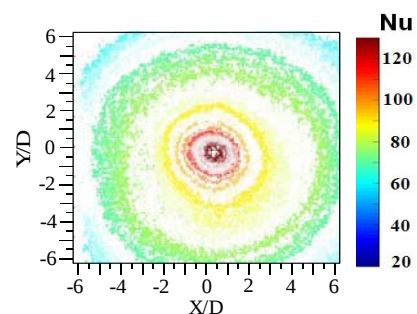
รูปที่ 5 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

สำหรับการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตอลนั้นเมื่ออุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีเหลือง (เส้นสีที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C) เปลี่ยนตำแหน่งจึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมโครมิลิวิดคริสตอล

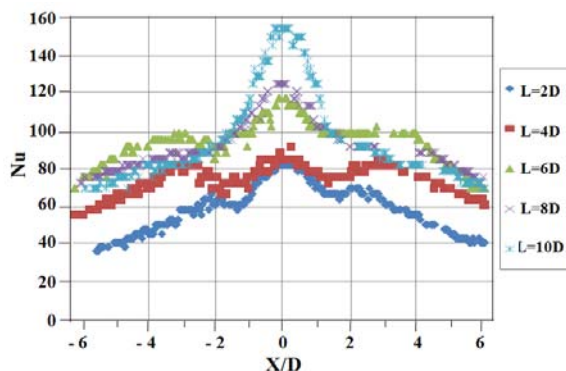
อีกครั้ง และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเหลืองเคลื่อนที่ทั่วทั้งพื้นผิว รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ทำการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ความร้อนที่ค่าต่างๆ ซึ่งเส้นแถบสีเหลือง(จุดที่แทนด้วยสีขาว) สามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าแฮเซลด์นัมเบอร์ หากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของค่าแฮเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 และในรูปที่ 8 แสดงการกระจายของค่าแฮเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามแนวศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะจากปากออกของเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่ระยะ $L=10D$ (สีขาวแสดงเส้นที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C หรือเส้นสีเหลือง)



รูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่าแฮเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ $L=10D$



รูปที่ 8 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บน
พื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลในการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสมสำหรับใช้ศึกษา ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้ หากทำการบันทึกภาพและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว จะสามารถหา การกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้นี้เป็นแบบวิธี สภาวะคงตัว อาศัยการเลื่อนตำแหน่งของแถบสีเมื่อ เปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่ทำการวัดอุณหภูมิ ต้องใช้เวลาในการทดลองและต้องถ่ายภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์จำนวนมาก และมีข้อจำกัดคือไม่สามารถ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว ได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีวัดแบบสภาวะไม่คงตัวที่ ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่มีความซับซ้อนมาก ในการวิเคราะห์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hoogendoorn, C. J. (1977). The effect of turbulence on heat transfer at a stagnation point, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 20, pp. 1333 – 1338.
- [2] Goldstein, R. J., Timmers, J. F. (1982). Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 25, pp. 1857 – 1868.
- [3] Akino, N., Kunugi, T., Ueda, M. and Kurosawa, A. (1988). A study on thermo-camera using liquid crystal (method of multiple regression between color and temperature), *Transactions of JSME, Ser.(B)*, Vol. 54-506, pp.2661-2668.
- [4] Camci, C. (1996). Color Recognition for Temperature Measurements on Liquid Crystal Coated Surfaces, *von Karman Institute Lecture series on Temperature Measurements*, VKI-LS-1996-09
- [5] Farina, D. J., Hacker, J. M., Moffat, R. J., Eaton, J. K. (1994). Illuminant invariant calibration of thermochromic liquid crystals. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 9, pp.1 – 12
- [6] Nakabe, K., Higashio, A., Chen, W., Suzuki, K. (1998) An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of longitudinal vortices induced by an inclined impinging jet into a crossflow (Measurement of heat transfer coefficient using thermochromic liquid crystals), paper presented in *11th International Heat Transfer conference*, Kyongju, Korea

ภาคผนวก ฅ7

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 9) 11 – 12 มีนาคม 2553
ณ อำเภอปรางค์บุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้ เทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล

Heat Transfer Coefficient Measurement on a Surface of Jet Impingement Using Thermochromic Liquid Crystal

มักตาร์ แวหะยี

ชยุต นันทกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยทางด้านการศึกษารากฐานการถ่ายเทความร้อนนิยมใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) เพื่อใช้ในการดูลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัดและสามารถดูการกระจายอุณหภูมิจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่า บทความนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล และการใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะคงตัว (Steady-state) ในการทดลองได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากการศึกษาพบว่า สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลสามารถแสดงลักษณะปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามการปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่าง ๆ นอกจากนี้ในการทดลองได้ทำการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองวิธีพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่หาจากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นบริเวณตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่วัดได้จากสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลมีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล

1. บทนำ

การวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหนึ่งๆ เทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นการวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสโดยตรงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล หรือใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Gauge) ติดบนผิววัสดุโดยตรงเพื่อวัดอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่ต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนแบบเฉพาะตำแหน่งโดยละเอียด จำเป็นต้องติดหัววัด (Probe) เป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและทำการวัดค่าพร้อมๆ กัน ในกรณีที่บนพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณแคบๆ จะไม่สามารถทำการวัดได้โดยละเอียด อีกทั้งวิธีนี้มีการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัด ทำให้การวัดค่าอุณหภูมิมบนพื้นผิวคลาดเคลื่อนไป และมีผลทำให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนคลาดเคลื่อนไปด้วย สำหรับวิธีการวัดการกระจายอุณหภูมิมบน

พื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermometry) เป็นอีกวิธีที่สามารถแสดงการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวได้อย่างละเอียด แต่อุปกรณ์วัดมีราคาค่อนข้างสูง

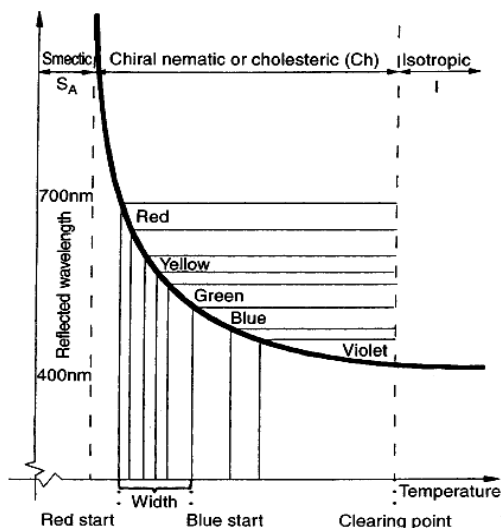
เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่า 30 ปี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัด และสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่าได้ และในปัจจุบันมีการพัฒนาของอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิทัลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น สามารถใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การระบายความร้อนใน

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กังหันแก๊สเทอร์ไบน์ หรือการวัดการให้ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆในอุตสาหกรรม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมิ จำเป็นต้องเลือกชนิดของเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และต้องทำการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ [1]

ในบทความนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลสำหรับการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว ด้วยวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแบบสภาวะคงตัว และตัวอย่างการนำสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลไปใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน โดยแสดงวิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบกับวิธีการใช้เทอร์โมคัปเปิลในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

2. เทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลเป็นสารประกอบจำพวกออกแกนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิควิดคริสตอลมีสถานะเป็นของแข็ง เมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสาร



รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น (การสะท้อนสี) ของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด [2]

รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้

สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ ($T_{bs}-T_{rs}$) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm อยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็กหรือของเหลวสำหรับทาบนผิว สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ หรือเป็นแบบโพลีเมอร์แผ่นแบนอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด [1-4]

3. การวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล

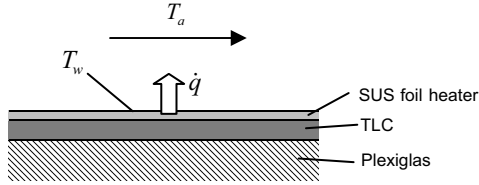
ในการวัดอุณหภูมิบางครั้งต้องการเพียงแค่อุณหภูมิโดยประมาณเท่านั้น สำหรับการวัดอุณหภูมิจากการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ด้วยการใช้สายตาเปล่าของมนุษย์ โดยไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดอื่นๆ สามารถดูการกระจายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลได้ แต่การใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวจะขึ้นกับผู้สังเกตแต่ละคน ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง

Hoogendoorn [5] ใช้วิธีวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยเทียบสเกลของสีที่ทราบอุณหภูมิกับสีเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลที่ปรากฏบนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ ต่อมาได้มีการบันทึกภาพด้วยกล้องและใช้พีซีในการเลือกสีแทนสายตามนุษย์ Goldstein และ Timmers [6] ทำการบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล โดยใช้กล้องขาวดำและฟิลเตอร์ หลังจากนั้นหาเส้นที่สว่างที่สุดจากภาพที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถระบุเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) จากภาพที่ได้ แต่วิธีที่กล่าวมานี้ สามารถใช้ในการหาเส้นอุณหภูมิคงที่เท่านั้น ยังไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทุกจุดได้

ปัจจุบันเทคโนโลยีของการบันทึกภาพสีแบบดิจิทัลและเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนา ทำให้สามารถนำมาช่วยในการบันทึกและเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏบนสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลเป็นข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกต ในการแสดงภาพสีจะมีอยู่สองระบบหลักๆ คือ RGB และ HSV สำหรับการแสดงภาพสีของระบบ RGB จะเป็นการรวมกันของความเข้มของแสงสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ที่จุดภาพ แต่ในกรณีของระบบ HSV จะแสดงค่าสีหลัก (Hue) ค่าความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) และความสว่างของสี (Value) ที่จุดภาพ โดยสามารถแปลงจากระบบการแสดงผลภาพแบบ RGB สู่อุปกรณ์ HSV และในทางกลับกันสามารถแปลงจากระบบ HSV สู่อุปกรณ์ RGB สำหรับระบบ RGB จะใช้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงสีเทียบกับระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ส่วนระบบ HSV จะใช้เฉพาะความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าสีหลักกับอุณหภูมิเท่านั้น สำหรับในบทความนี้ได้วิเคราะห์ภาพสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิด

คริสตอลด้วยระบบการแสดงผลแบบ RGB เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความเสถียรมากกว่าระบบ HSV [2]

4. วิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน



รูปที่ 2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีแบบสภาวะคงตัว

รูปที่ 2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีแบบสภาวะคงตัว ในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิ T_o ไหลผ่าน ในรูปจะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางเป็นพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิ ในการหาค่าฟลักซ์ความร้อนจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสแตนเลสซึ่งสามารถหาค่าฟลักซ์ความร้อน $\dot{q}$ ได้จากสมการ

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \quad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นสแตนเลส A และ R คือขนาดของพื้นผิวและค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลสตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวแต่ละจุดได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_a} \quad (2)$$

ในที่นี้ T_w คืออุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิวที่วัดได้จากสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอลที่เคลือบด้านหลังของแผ่นสแตนเลส และ T_o คืออุณหภูมิของของไหล จากโมเดลการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวข้างต้น สามารถแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติหรือค่านัสเซลต์นัมเบอร์ (Nu)

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3)$$

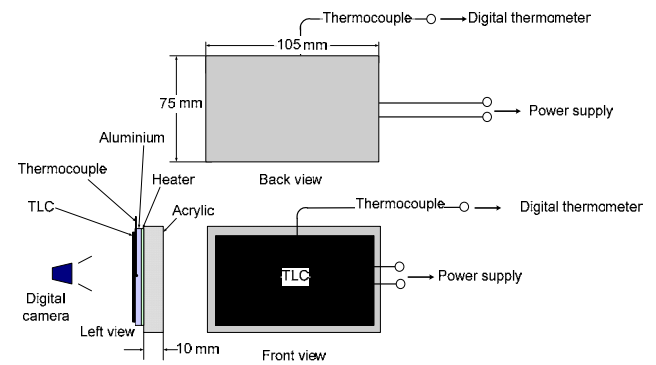
โดยที่ D คือ Characteristic length ซึ่งในกรณีที่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท และ k คือค่าการนำความร้อนของอากาศ ซึ่งในการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิบนพื้นผิวแต่ละครั้ง จะทำการบันทึกหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

5. การวัดหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

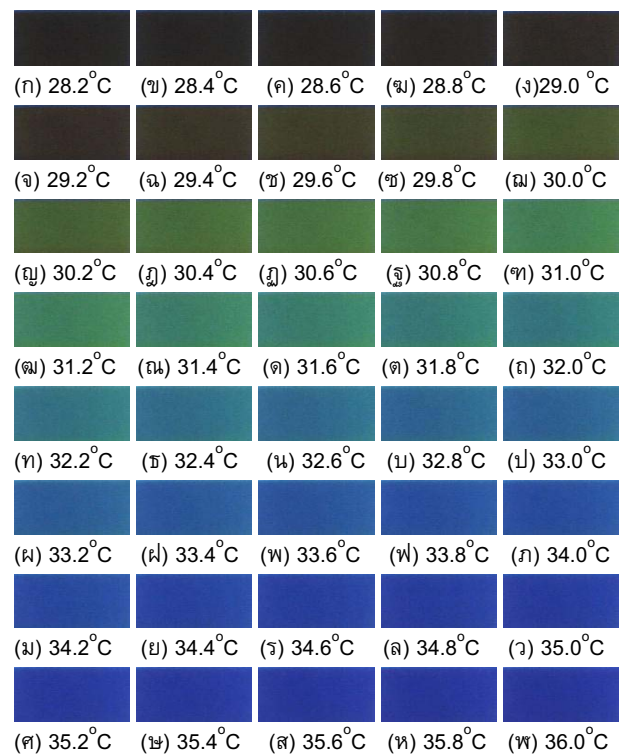
5.1 การสอบเทียบอุณหภูมิ

ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลก่อนใช้งาน รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีตเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใส ขั้วของฮีตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและ

กระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีตเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมบาง ซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีตเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลเพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงผลของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอล ด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมได้เจาะรูสำหรับติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $28^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม



รูปที่ 3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการสอบเทียบ

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแยกตัวประกอบสี RGB ของแต่ละรูปให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิตินี้

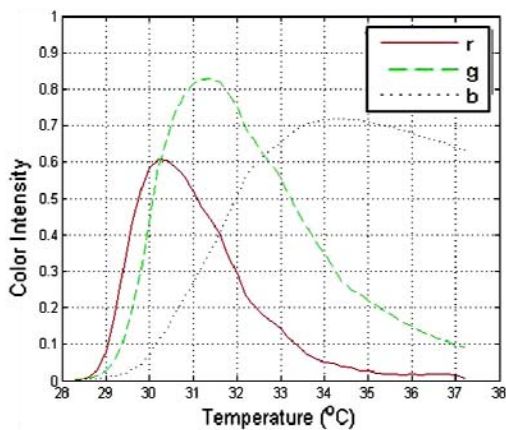
$$r = \frac{R - RB}{R_{\max} - RB} \quad (4)$$

$$g = \frac{G - GB}{G_{\max} - GB} \quad (5)$$

$$b = \frac{B - BB}{B_{\max} - BB} \quad (6)$$

ในที่นี้ R G และ B คือ ความเข้มของสีแดง เขียวและน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล RB GB และ BB คือ ความเข้มของสีแดง เขียวและน้ำเงิน ของรูปเริ่มต้นขณะที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี $R_{\max}$ $G_{\max}$ และ $B_{\max}$ คือ ความเข้มสูงสุดของสีแดง เขียวและน้ำเงิน ที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวประกอบสีที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปจะได้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟ r และ g ตัดกันที่อุณหภูมิ 30.2 ± 0.2 °C และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลมีสีเขียวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 (ญ) จากนั้นจะได้เงื่อนไขเส้นสีเขียวที่มีส่วนประกอบของสี r ที่มีค่าเท่ากับสี g ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C เพื่อใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป

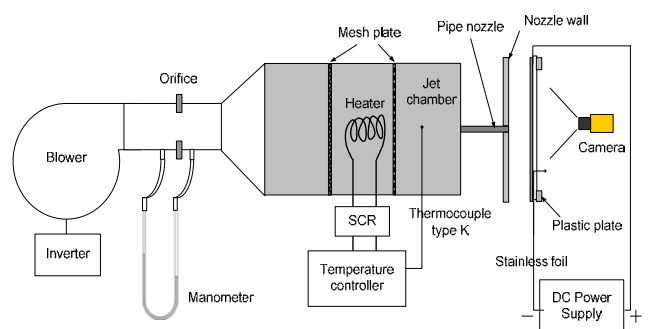


รูปที่ 5 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสีจากแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

รูปที่ 6 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อยู่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=16.5$ mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ และค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทคงที่ $Re=20,000$ เจ็ทอากาศจะถูกส่งจากโบเวอร์ผ่านชุดของออร์ฟิส ชุดฮีตเตอร์ ถึงกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท สำหรับผนังที่เจ็ทพุ่งชนจะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm ซึ่งให้เรียบดั่งกับแผ่นพลาสติกที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ซึ่งที่ปลายของแผ่นสแตนเลสจะยึดด้วยแท่งทองแดงไว้ทั้งสองข้าง โดยต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถ

คำนวณอัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสได้จากสมการที่ (1) โดยที่ค่า R หาได้จากความต้านทานทางไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส จากนั้นเจ็ทอากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลชนแผ่นสแตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อนบนพื้นผิว โดยสามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่ติดด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) ลักษณะสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลจะบันทึกโดยใช้กล้องดิจิทัล จากนั้นสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้จากสมการที่ (2) โดยที่ T_w วัดจากการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล และ T_∞ คืออุณหภูมิคงที่ของเจ็ท



รูปที่ 6 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

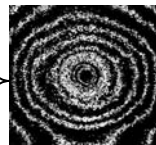
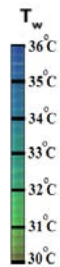
5.3 การหาสัมพันธ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

ในการทดลองได้ทำการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลเมื่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเข้าสู่ภาวะคงตัว จากนั้นได้ทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีเขียว (เส้นสีที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C และสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ r , g และ b) เปลี่ยนตำแหน่งจึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลอีกครั้ง และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเขียวเคลื่อนที่ทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งผลการทดลองอยู่ในรูปของการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ จากนั้นสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการหาสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ จากตารางค่าที่แสดงในคอลัมน์ที่ 2 เป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณจากสมการ (1) ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่ 3 เป็นค่าสัมพันธ์การพาความร้อนคำนวณจากสมการ (2) และค่าจากตารางในคอลัมน์ที่ 4 เป็นนัมเบอร์นัมเบอร์คำนวณจากสมการ (3) ของกรณีที่ใช้เส้นสีเขียว $T_w=30.2$ °C และอุณหภูมิของเจ็ท $T_\infty=27.5$ °C ในการคำนวณ จากลำดับที่ 1-12 ในตารางแสดงถึงผลการทดลองและการคำนวณค่านัมเบอร์นัมเบอร์ที่ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ โดยกำหนดให้เส้นสีเขียวเลื่อนทั่วทั้งพื้นผิว

ตารางที่ 1 แสดงการหาค่านัสเซลล์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว

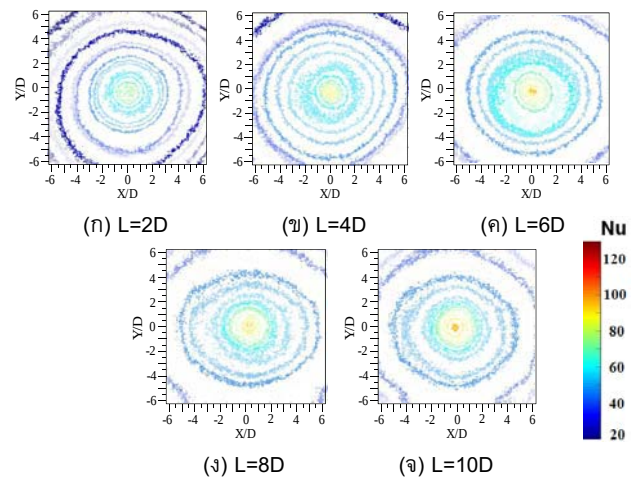
ลำดับ ที่	$\dot{q}$ ($\frac{W}{m^2}$)	h ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)	Nu	รูปหลังผ่านการ ประมวลภาพ
1	160	60	38	
2	175	65	41	
3	191	71	45	
4	207	77	48	
5	224	83	52	
6	242	90	57	
7	260	96	61	
8	280	103	65	
9	298	110	70	
10	318	118	75	
11	340	126	80	
12	360	134	85	



แสดงรูปที่นำ
ค่าสเซลล์นัม
เบอร์มาซ้อนกัน

สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 1 ลำดับแรกจะทำการตัดรูปที่ปรากฏเป็นแผ่นเทอร์โมลิตวิคริสตัลให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ (400 x 400 pixels) จากนั้นสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) โดยใช้เงื่อนไขค่า r มีค่าใกล้เคียงกับค่า g ($|r-g| \leq 0.01$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเส้นสีเขียวที่มีอุณหภูมิ $T_w = 30.2^\circ C$ และกำหนดให้คอมพิวเตอร์เลือกจุดสีที่มีเงื่อนไขข้างต้นแล้วแทนด้วยค่าสเซลล์นัมเบอร์ตามที่แสดงในคอลัมน์ที่ 4 (ตารางที่ 1) สำหรับบริเวณที่แสดงเป็นจุดสีขาวคือส่วนที่ถูกแทนด้วยค่าสเซลล์นัมเบอร์ จากนั้นจะทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจากลำดับที่ 1-12 ตามที่ได้แสดงผลในตารางที่ 1 จากนั้นทุกเฟรมรูปจะแทนด้วยเมทริกซ์ของตัวเลขที่มีค่าสเซลล์นัมเบอร์กระจายอยู่ในพิกัดต่างๆ ครอบคลุมพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าการกระจายของสเซลล์นัมเบอร์ทั้งหมดมาซ้อนกันจากลำดับที่ 1-12 ตามที่ได้แสดงในรูปที่อยู่ด้านข้างของตารางที่ 1 (ที่อยู่นอกวงเล็บปีกกา)

สำหรับรูปสุดท้ายที่แสดงในคอลัมน์ที่ 5 บริเวณที่เป็นสีดำคือบริเวณที่จุดสีไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด โดยจะไม่แทนด้วยค่าใดๆ และถือว่าค่าสเซลล์นัมเบอร์อยู่ระหว่างขอบเขตของเส้นสีขาวที่ล้อมรอบทั้งสองเส้น จากขั้นตอนข้างต้นก็จะได้นัสเซลล์นัมเบอร์ที่กระจายเกือบทั่วทั้งพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนๆ ซึ่งผลการทดลองอาจจะแสดงให้อยู่ในรูปความเข้มของสี (Contour) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 หรืออาจจะแสดงที่พิกัดต่างๆตามแกน X หรือ Y ที่อยู่ในรูปกราฟความสูงของสเซลล์นัมเบอร์ตามที่แสดงในรูปที่ 8

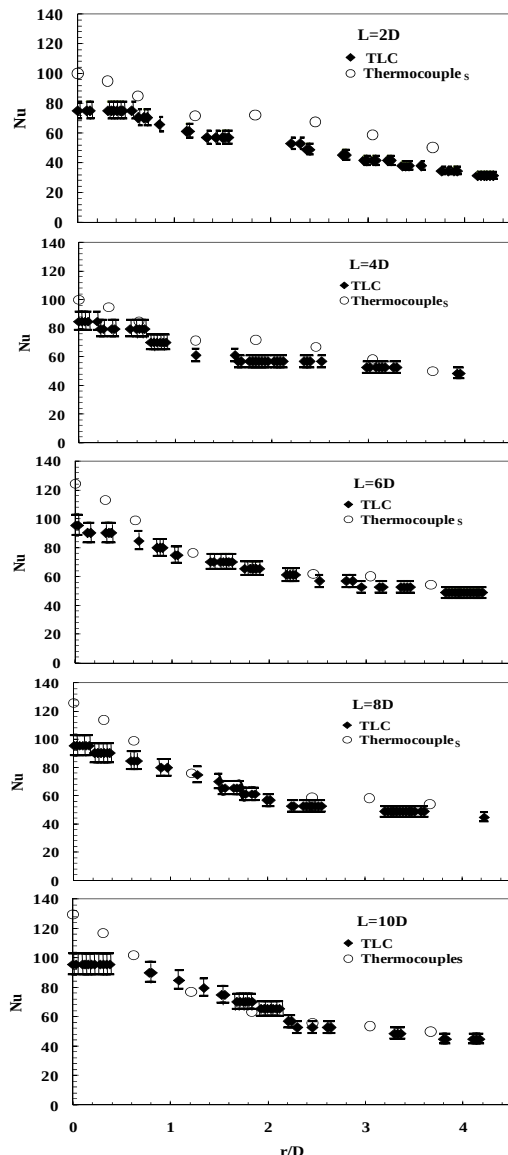


รูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่าสเซลล์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ

5.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยเทอร์โมคัปเปิล

ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้หัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลได้ใช้ชุดทดลองชุดเดิม โดยทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 8 หัว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละเส้น 0.1 mm) บนพื้นผิวด้านหลังแผ่นสแตนเลส และปิดทับด้วยแผ่นเทอร์โมโครมิกลิตวิคริสตัลบนหัววัดเทอร์โมคัปเปิลเพื่อให้อยู่ในสภาพที่ใกล้เคียงกับการใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิตวิค

คริสตอลวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว สำหรับค่า Nu เซลล์ดัมเบอร์หาได้จากสมการที่ (1), (2) และ (3) ซึ่งในที่นี้ T_w คืออุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลในสภาวะคงตัว



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Nu เซลล์ดัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลและเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Nu เซลล์ดัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลและเทอร์โมคัปเปิล จากการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยภาพรวมของทั้งสองวิธีพบว่าค่า Nu เซลล์ดัมเบอร์ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่างๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สำหรับที่ระยะ $L = 2D$ สมบัติการพาความร้อนที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าค่อนข้างสูงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบอย่างละเอียดจะพบว่าบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่อยู่ในช่วง $X/D = 0-0.4$ ค่า Nu เซลล์ดัมเบอร์ที่วัดได้จากเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลทุกกรณี ซึ่งการใช้เทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลมีข้อจำกัดในการหาสมบัติ

การพาความร้อนบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีพื้นที่แคบและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่อนข้างสูง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระบบการจับภาพที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลในการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัด เหมาะสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และในบทความได้นำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้สารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลในการหาสมบัติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยวิธีสภาวะคงตัว โดยแสดงวิธีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ภาพของการแสดงสีของสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอล จากผลการศึกษาพบว่าสารเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอลสามารถแสดงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามการปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ นอกจากนี้ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบค่าสมบัติการพาความร้อนที่ได้จากการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล จากการเปรียบเทียบสมบัติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่วัดได้จากทั้งสองวิธีพบว่าค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] มักตาร์ และ ชยุต, “เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตอล” 2552, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060.
- [2] Stasiek, J., 1997, Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research, J. Heat and Mass Transfer, Springer-Verlag, Vol.33, pp. 27-39
- [3] Ireland, P. T. and Jones, T. V., 2000, Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress, J. Measurement Science and Technology, Vol. 11. pp. 969-986.
- [4] Baughn, J. W., 1995, Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 16, pp. 365-375.
- [5] Hoogendoorn, C. J., 1977. The effect of turbulence on heat transfer at a stagnation point, Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 20, pp. 1333 – 1338.
- [6] Goldstein, R. J., Timmers, J. F., 1982, Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 25, pp. 1857 – 1868.

ภาคผนวก ฅ8

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8 22-23 เมษายน 2553
จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 732-737.

การใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน บนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว

Measurement of Heat Transfer Coefficient on a Surface Using Thermochromic Liquid Crystal with Transient Technique

มักตาร์ แวหะยี ชยุด นันทดูลิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

Makatar Wae-hayee Chayut Nuntadusit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการทบทวนเอกสารการทำวิจัยเกี่ยวกับการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว สำหรับวิธีดังกล่าวได้ใช้หลักการการพาความร้อนบนพื้นผิวและเกิดการนำความร้อนในวัสดุที่เป็นแบบ Semi-infinite ใน 1 มิติ สำหรับอุณหภูมิบนพื้นผิวได้จากการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลตามระยะเวลา แล้วใช้วิธีการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้ได้นำเสนอตัวอย่างงานวิจัยที่นำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตัวขวางการไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีฟิล์มเจ็ทไหลผ่าน เป็นต้น

คำหลัก เทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล, สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, วิธีสภาวะไม่คงตัว

Abstract

The objective of this article is to review of the measurement of heat transfer coefficient using Thermochromic Liquid Crystal with transient technique. The principle of this technique is to consider the convection on a surface and 1-D conduction in a semi-infinite medium. The temperature distribution on a surface was measured from capturing the color change of Thermochromic Liquid Crystal with time. Then, the results were analyzed by image processing for

evaluation of heat transfer coefficient. This article also describes the examples in applying this technique for studying heat transfer phenomena, such as heat transfer on jet impingement surface, heat transfer on surface with some turbulators and heat transfer on surface with film jets.

Keywords: Thermochromic liquid crystal, Heat Transfer Coefficient, Transient Technique

1. บทนำ

วิธีการวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวในปัจจุบันนิยมใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัดและสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูลักษณะการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่า และในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิทัลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเชิงปริมาณได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น [1, 2]

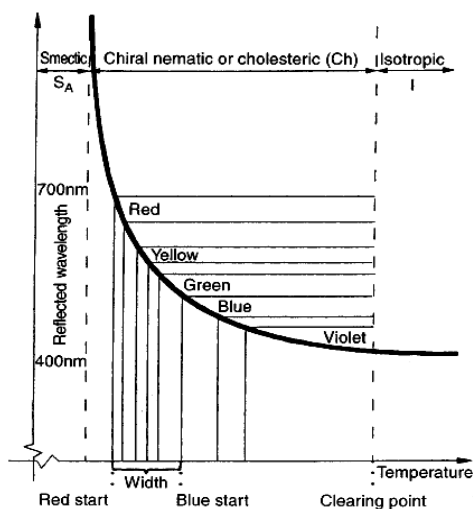
สำหรับวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ตามเงื่อนไขของกระบวนการวัดคือ วิธีแบบสภาวะคงตัว (Steady state) ที่ใช้หลักการการแสดงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวในสภาวะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแบบคงตัว และวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state หรือ Transient technique) เป็นวิธีที่ใช้หลักการวัดการ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลในสภาวะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [3, 4]

สำหรับบทความนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับหลักการการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลด้วยวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว และแนะนำตัวอย่างการนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

2. หลักการการวัดอุณหภูมิด้วยสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลและการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเป็นสารประกอบจำพวกออกแกนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิควิดคริสตัลมีสถานะเป็นของแข็งเมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้ [1, 2] ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดอุณหภูมิได้



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น (สี) ของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง [2]

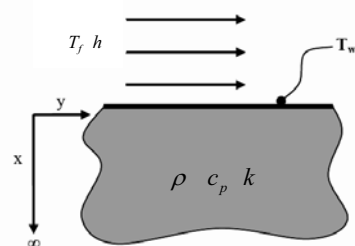
รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเปลี่ยนเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ ($T_{bs}-T_{rs}$) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นอยู่

กับส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมัน และคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm หรืออยู่ในรูปของของเหลวหรือโพลิเมอร์สำหรับทาบนผิว สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ หรืออยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด [1, 2]

ในการวิเคราะห์ภาพในคอมพิวเตอร์จะใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพแบบขาว-ดำ แต่ในปัจจุบันขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพได้มีการพัฒนา ทำให้สามารถวิเคราะห์ภาพสีได้ง่ายขึ้น สำหรับการเก็บข้อมูลภาพสีของคอมพิวเตอร์จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ ในหนึ่งเฟรมของรูปจะประกอบไปด้วย 3 เมทริกซ์ ตามจำนวนแม่สี (Red, Green, Blue) ซึ่งจะแทนด้วยจุดภาพ (Pixel) ของรูปเป็นตำแหน่งภายในเมทริกซ์ และความเข้มของแม่สีจะแสดงเป็นระดับของตัวเลขในตำแหน่งของเมทริกซ์นั้นๆ [2]

ในการแสดงภาพสีของแต่ละเฟรมจะมีด้วยกันหลายระบบ แต่สำหรับระบบที่แสดงภาพสีทางจอคอมพิวเตอร์จะมีอยู่สองระบบหลัก คือ RGB และ HSV (หรือ HLS, HSI) ในการแสดงภาพสีของระบบ RGB จะเป็นการรวมกันของความเข้มของสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ที่จุดภาพเดียวกัน แต่ในกรณีของระบบ HSV จะแสดงค่าสีหลัก (Hue) ค่าความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) และความสว่างของสี (Value) ที่จุดภาพเดียวกัน อย่างไรก็ตามทั้งสองระบบสามารถแปลงจากระบบ RGB สู่ระบบ HSV และในทางกลับกันสามารถแปลงจากระบบ HSV สู่ระบบ RGB สำหรับการพัฒนานำมาใช้ในการวิเคราะห์การแสดงผลของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล ระบบ RGB จะใช้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแม่สีเทียบกับระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ส่วนระบบ HSV จะใช้เฉพาะความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าสีหลักที่อุณหภูมิต่างๆเท่านั้น [5, 6]

3. หลักการการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 2 แสดงโมเดลของพื้นผิวที่ใช้วัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว [4]

สำหรับหลักการการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลด้วยวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว จะต้องทำการสร้างโมเดลของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่

ทำให้เกิดการนำความร้อนในตัวกลางที่เป็นแบบ Semi-infinite ใน 1 มิติ ในทิศทางตามความลึกจากผิววัสดุ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุต้องมีความหนาเพียงพอและมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ จากคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้เกิดการนำความร้อนออกทางด้านข้างในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยมาก

รูปที่ 2 แสดงโมเดลของพื้นผิวที่ใช้วัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ทำให้เกิดการนำความร้อนใน 1 มิติ ในทิศทางแกน x (ทิศทางที่ลึกลงไปเนื้อวัสดุ) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูป

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

โดยเงื่อนไขของค่าขอบเขต คือ

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_w - T_f) \quad \text{ที่ตำแหน่งผิว } x=0, t>0$$

$$T = T_i \quad \text{ที่ตำแหน่ง } x \rightarrow \infty$$

และเงื่อนไขของค่าเริ่มต้น คือ

$$T = T_i \quad \text{สำหรับ } t>0 \text{ ในช่วง } 0 \leq x \leq \infty$$

ในที่นี้ ρ , c_p และ k คือค่าความหนาแน่น, ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนของโมเดลตามลำดับ, สำหรับค่า T_w , T_i และ T_f คือ อุณหภูมิบนผนังที่ระยะเวลาต่างๆ อุณหภูมิผนังเริ่มต้นและอุณหภูมิของของไหล โดยที่ t คือเวลาจากการเริ่มต้นพิจารณาการไหล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ จากอุณหภูมิเริ่มต้นบนพื้นผิวที่ทราบค่า จะถูกบันทึกโดยการถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลตลอดช่วงระยะเวลาที่กำหนดของการทดลอง [7]

จากสมการที่ (1) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบนพื้นผิว T_w ที่เวลา t ใดๆ จะอยู่ในรูปของสมการ [4, 7]

$$\frac{T_w - T_i}{T_f - T_i} = 1 - e^{\beta^2} \operatorname{erfc}(\beta) \quad (2)$$

โดยที่ $\beta = h(t / \rho c_p k)^{0.5}$

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h จากสมการที่ (2) ในทางปฏิบัติค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะขึ้นอยู่กัเวลาและลักษณะโมเดลของงานวิจัย เช่น การถ่ายเทความร้อนแบบภายใน (Internal heat transfer) หรือการถ่ายเทความร้อนแบบภายนอก (External heat transfer) เป็นต้น

งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการทดลองแต่ละครั้งอยู่ในช่วง 10-90 วินาที ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิของของไหลที่ไหลเข้าสู่ Test section ทำให้อุณหภูมิของของไหล T_f เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการที่ (2) สามารถใช้ทฤษฎีของ Duhamel's superposition ทำการแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ที่กระจายบนพื้นผิว คำตอบของสมการที่ (2) จะอยู่ในรูปของ [7]

$$T_w - T_i = \sum_{j=1}^N \left\{ 1 - e^{\beta^{*2}} \operatorname{erfc}(\beta^*) \right\} [\Delta T_{f(j,j-1)}] \quad (3)$$

โดยที่ $\beta^* = h((t - \tau_j) / \rho c_p k)^{0.5}$

สำหรับค่า $\Delta T_{f(j,j-1)}$ คือผลต่างอุณหภูมิของของไหลในช่วงเวลาต่างๆ และ τ_j คือระยะห่างของช่วงเวลา (Time step) โดยที่อุณหภูมิบนพื้นผิว T_w สามารถหาได้จากการแสดงสี (แทนด้วยค่าอุณหภูมิ) ที่เวลาต่างๆของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล จากนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ทุกจุดบนพื้นผิวที่ทำการทดลอง ซึ่งวิธีการแก้สมการดังกล่าวนี้สามารถใช้กับโมเดลของการถ่ายเทความร้อนทั้งแบบภายในและภายนอก

Baughn และ Yan [8] ได้ทำการแก้สมการที่ (2) ซึ่งสามารถใช้ได้เฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบภายนอก (ตัวอย่างในหัวข้อ 5.1) โดยใช้วิธีการให้ความร้อนพื้นผิวก่อนที่จะให้ของไหลไหลผ่านพื้นผิว (Preheated-wall transient method) ซึ่งสามารถจัดสมการที่ (2) อยู่ในรูปของ

$$T^* = \frac{T_w - T_f}{T_i - T_f} = e^{\beta^{*2}} \operatorname{erfc}(\beta^*) \quad (4)$$

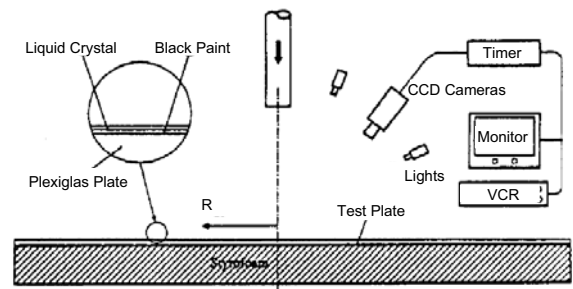
โดยที่ $\beta^* = h_i(t / \rho c_p k)^{0.5}$

สำหรับ h_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

5. ตัวอย่างงานวิจัย

จากนี้จะเป็นการนำเสนอตัวอย่างงานวิจัยที่หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว โดยแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของชุดทดลองสำหรับติดตั้งกลไกที่ใช้ในการบังคับกระแสการไหลของของไหล เพื่อไม่ให้สัมผัสกับพื้นผิวที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก่อนที่จะทำการบันทึกภาพการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลตามระยะเวลาต่างๆ

5.1 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (jet impingement)



รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองของ Baughn และ Yan [3]

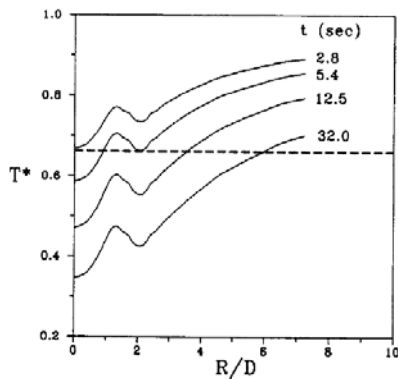
Baughn และ Yan [3] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชนด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว ในการทดลองได้ใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวตามระยะเวลาต่างๆ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3 ก่อนการทดลองได้ใช้แผ่นก้ำบังกันกระแสการไหลของเจ็ทไม่ให้สัมผัสกับพื้นผิว และให้ความร้อนบนพื้นผิวจนอุณหภูมิคงที่ จากนั้นเมื่อควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของเจ็ทได้แล้วจึงนำ

แผ่นกำบังออกให้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว เริ่มจับเวลาและบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

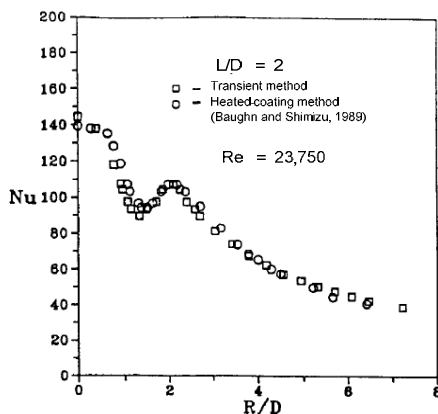
รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองค่า T^* จากสมการที่ (4) มีค่าลดลงทุกๆตำแหน่งรัศมี R/D เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการที่ (4) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แล้วนำไปหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์โดยใช้สมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (5)$$

ในที่นี้ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ท และ k คือค่าการนำความร้อนของอากาศ



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (T^*) จากสมการที่ (4) บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะเวลาระยะต่าง ๆ [3]



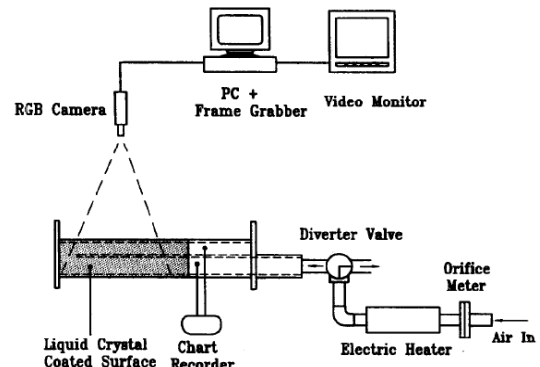
รูปที่ 5 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแกนรัศมี R/D และระยะพุ่งชน $L/D=2$ [3]

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแกนรัศมี R/D ที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองแบบสภาวะคงตัวของ Baughn และ Shimizu [9] จากการเปรียบเทียบทั้งสองวิธี (วิธีสภาวะคงตัวและสภาวะไม่คงตัว) พบว่าผลการทดลองทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

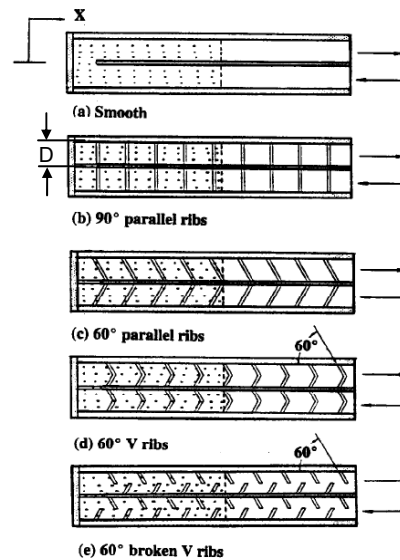
5.2 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งขบวนการไหล

Ekkad และ Han [11] ได้ใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิวที่ติดตั้งขบวนการไหล (Ribs) เพื่อวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวดังวิธีสภาวะไม่คงตัว สำหรับกลไกที่

ใช้ในการบังคับกระแสการไหลของอากาศได้ใช้วาล์วปรับทิศทางการไหล (Diverter valve) ติดตั้งระหว่าง Test section และต้นกำเนิดกระแสการไหลของอากาศตามที่ได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงชุดทดลองของ Ekkad และ Han [10]



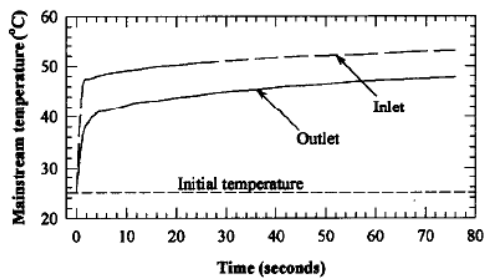
รูปที่ 7 แสดง Test section และตัวขบวนการไหลในแต่ละแบบที่ใช้ในการทดลองของ Ekkad และ Han [10]

สำหรับตัวขบวนการไหลและผนังด้านล่างของชุดทดลองทำจากแผ่นพลาสติกติดบนพื้นผิวผนังเคลือบสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล ในการทดลองได้ศึกษาลักษณะตัวขบวนการไหล 4 แบบ (1) แบบขวางทำมุม 90° กับทิศทางการไหลของอากาศ (2) แบบขวางทำมุม 60° กับทิศทางการไหลของอากาศ (3) แบบตัว V ทำมุม 60° (3) แบบตัว V แยกทำมุม 60° และทดลองกรณีที่มีผนังเรียบที่ไม่ติดตั้งขบวนการไหลตามที่แสดงในรูปที่ 7 โดยที่แกน +X แสดงทิศทางการไหลของทางออกอุโมงค์ลม และแกน -X แสดงทิศทางการไหลของทางเข้าอุโมงค์ลม สำหรับความสูงและระยะห่างระหว่างตัวขบวนการไหลมีค่า $e/D=0.125$ และ $P/e=10$ ตามลำดับ โดยที่ D คือความกว้างของอุโมงค์ลมมีขนาด 5.08 cm

ในการทดลองได้ควบคุมอากาศให้มีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวที่เคลือบสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล โดยที่วาล์วปรับทิศทางการไหลของอากาศอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้อากาศไหลออกนอกชุด Test section จากนั้นจึงควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศให้

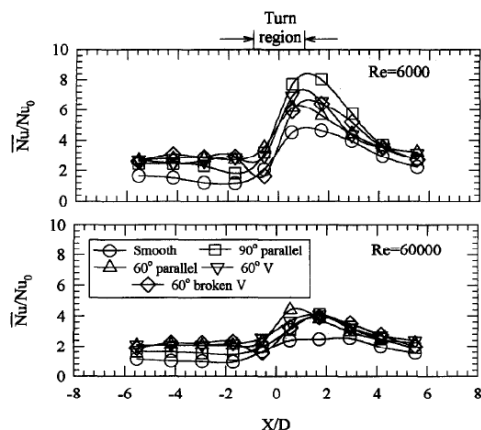
คงที่ แล้วจึงทำการเลื่อนตำแหน่งวาล์วปรับทิศทางทางไหลของอากาศให้อากาศไหลเข้าสู่ Test section แล้วจึงเริ่มทำการจับเวลา บันทึกอุณหภูมิของอากาศและบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่เวลาต่างๆ โดยให้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงสีที่อุณหภูมิ (สีเขียว) เลื่อนให้ทั่วทั้งพื้นผิว จึงหยุดทำการทดลอง

สำหรับอุณหภูมิของอากาศจะทำการวัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของทางเข้าและทางออกอุโมงค์ลม แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย Ekkad และ Han [10] ได้แนะนำวิธีดังกล่าวจะได้ค่าอุณหภูมิของอากาศที่แม่นยำกว่าการวัดอุณหภูมิของอากาศเพียงแค่จุดเดียว รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของอากาศบริเวณศูนย์กลางของทางเข้าและทางออกอุโมงค์ลมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [10]



รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของอากาศบริเวณศูนย์กลางของทางเข้าและทางออกอุโมงค์ลมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [10]

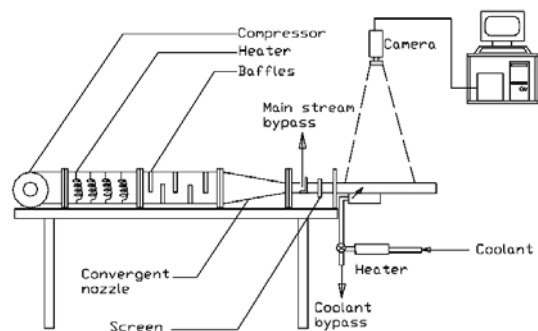
รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของนัสเชิลต์นัมเบอร์ตามแนวแกน X โดย Nu คือนัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย และ Nu_0 คือค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของอุโมงค์ลมที่ไม่ติดตัวขวางการไหล โดยที่จุดของข้อมูลที่ได้แสดงในรูปคือตำแหน่งของตัวขวางการไหลตามแนวแกน X/D บริเวณที่เป็นจุดกลับของอุโมงค์ลม (U-Turn) อยู่ในช่วง $-1 < X < 1$



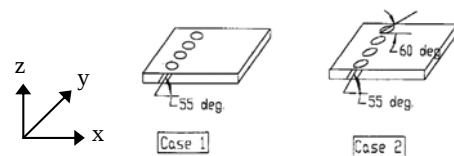
รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของนัสเชิลต์นัมเบอร์ตามแนวแกน X/D [10]

5.3 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่มีฟิล์มเจ็ทไหลผ่าน

Nasir และคณะ [11] ได้ศึกษาผลของรูปแบบการฉีดฟิล์มเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณปากทางออกเจ็ท ในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิว โดยทดลองด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว สำหรับกลไกที่ใช้ในการควบคุมให้อากาศไหลเข้าสู่ Test section ได้ติดตั้งวาล์ว 2 ชุด คือ วาล์วสำหรับปรับทิศทางทางไหลของอากาศที่ไหลออกจากแถวของรูเจ็ท และวาล์วสำหรับปรับกระแสไหลหลักที่ไหลในช่องตามที่ได้แสดงในรูปที่ 9 สำหรับปากทางออกของเจ็ทที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบตามที่ได้แสดงในรูปที่ 10 แบบแรกรูของเจ็ทเอียงทำมุมกับแกน x ในแนวตั้ง 55° และแบบที่สองรูของเจ็ทเอียงทำมุมกับแกน x ในแนวตั้ง 55° และแนวนอน 60° สำหรับอัตราส่วนโมเมนต์ของเจ็ทเทียบกับกระแสหลักได้ทดลองที่เงื่อนไข $M=0.5, 1.0$, และ 1.5



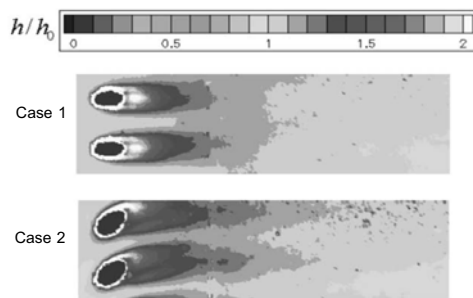
รูปที่ 9 แสดงชุดทดลองของ Nasir และคณะ [11]



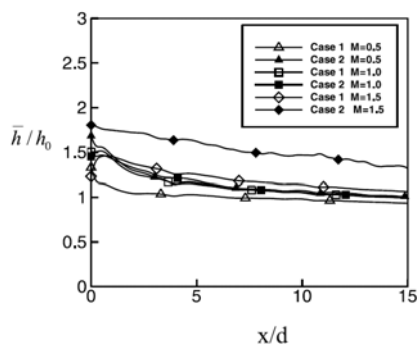
รูปที่ 10 แสดงรูปแบบปากทางออกเจ็ท [11]

ในการทดลองได้กำหนดให้วาล์วปรับทิศทางทางไหลทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้อากาศที่ไหลบนพื้นผิวและอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ทไหลออกนอกชุด Test section จากนั้นกำหนดให้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศทั้งสองคงที่ โดยอากาศที่ไหลบนพื้นผิวมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ท จากนั้นจึงปรับวาล์วให้อากาศทั้งสองไหลเข้าสู่ Test section แล้วเริ่มทำการจับเวลา และบันทึกการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล โดยกำหนดให้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงสีเขียว (35.4°C) ทั่วทั้งแผ่นแล้วจึงหยุดทำการทดลอง จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่กระจายบนพื้นผิว โดยรูปที่ 11 แสดงตัวอย่างการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว และรูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกรณีไม่มีฟิล์มเจ็ทตามแนวแกน x

Ekkad และคณะ [12] ได้แนะนำวิธีการแก้สมการที่ (2) ของกรณีดังกล่าวนี้ ซึ่งจะแตกต่างกับตัวอย่างงานวิจัยของสองกรณีแรก เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีอยู่สามตัวแปร คืออุณหภูมิของอากาศที่เริ่มต้นไหลบนพื้นผิว อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ทและอุณหภูมิของอากาศบนพื้นผิว แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการในการแก้สมการจะเหมือนกัน



รูปที่ 11 แสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ปากทางออกเจ็ท [11]



รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ปากทางออกเจ็ทตามแนวแกน x [11]

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสถานะไม่คงตัว (Unsteady state หรือ Transient technique) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวตามระยะเวลา โดยสร้างโมเดลของการทดลองให้ใกล้เคียงกับเงื่อนไขการนำความร้อนในวัสดุที่เป็นแบบ Semi-infinite ใน 1 มิติ สำหรับชุดทดลองได้ออกแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของของไหลให้คงที่ก่อนเข้าสู่ Test section หลังจากนั้นก็ของไหลไหลตามพื้นผิวจึงทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของสี (อุณหภูมิ) ของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล จากนั้นจึงใช้เทคนิคการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] มักตาร์ และ ชยุต, "เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล" 2552, การ

ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060.

- [2] Stasiek, J., Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research, 1997, J. Heat and Mass Transfer, Springer-Verlag, Vol.33, pp. 27-39.
- [3] Baughn, J. W., Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer, 1995, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 16, pp.365-375.
- [4] Esposito, E. I., Jet Impingement cooling configurations for gas turbine combustion, 2006, Thesis of Louisiana State University.
- [5] Wang, Z., Ireland, P. T., Jones, T. V. and Davenport, R., A color image processing system for transient liquid crystal heat transfer experiments, 1996, J. Turbomachinery, Vol. 118, pp. 421-427.
- [6] Ireland, P. T. and Jones, T. V., Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress, 2000, J. Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. 969-986.
- [7] Ekkad, S. V. and Han, J.-C., A transient liquid crystal thermography technique for gas turbine heat transfer measurements 2000, J. Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. 957-968.
- [8] Baughn, J. W. and Yah, X. 1991. A preheated-wall transient method for measurements of the heat transfer to an impinging jet. Eurotherm Seminar No. 25, pp. 1-7
- [9] Baughn, J. W. and Shimizu, S. S., Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and a fully developed impinging jet, 1989, J. Heat Transfer, Vol.111, pp. 1096-1098.
- [10] Ekkad, S. V. and Han, J.-C., Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators, 1997, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.40, No 11, pp. 2525-2537.
- [11] Nasir, H., Ekkad, S. V. and Acharya, S., Effect of compound on flat surface film cooling with large streamwise injection angle, 2001, J. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 25, pp. 23-29.
- [12] Ekkad, S. V., Zapata, D. and Han, J. C., Heat transfer coefficients over a flat surface with air CO₂ injection through compound angle holes using a transient liquid crystal method, 1997, J. Turbomachinery, Vol. 119, pp. 508-586.

ภาคผนวก ฅ9
การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

14th International Symposium on Flow Visualization June 21-24, 2010, EXCO Daegu, Korea.



HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

Chayut Nuntadusit*, Makatar Waehahyee*, Asi Bunyajitradulya**, Toshihiko Shakouchi***

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

*** Graduate School of Engineering, Mie University, Tsu, Japan

KEYWORDS:

Main subject(s): *Swirling jet, Jet impingement*

Fluid: *Air*

Visualization method(s): *Thermal liquid crystal, Oil film, Schlieren*

Other keywords: *Heat transfer enhancement*

ABSTRACT : *Heat transfer and flow characteristics of a swirl impinging jet were experimentally examined by using some visualization techniques. Swirl jet flow was generated by inserting twisted tape in pipe nozzle. The twisted pitch of twisted tape was changed to investigate swirl effects on heat transfer on the impinged surface and the effect of nozzle-to-plate was also investigated. The free jet flow was visualized by Schlieren technique. Thermochromic liquid crystal sheet was used for heat transfer visualization. The Oil film technique was used to reveal flow patterns on impinged surface. It was found that there appears two peaks of heat transfer rate in jet impingement region for jet from pipe inserted with twisted tape. The heat transfer enhancement can be achieved in jet impingement region for case of swirl number $Sw^*=0.40$ at all nozzle-to-plate distances.*

1 Introduction

Impinging jets have been widely used method for the heat transfer enhancement in a variety of industrial application such as cooling of turbine blades and electronic components, heating steel plates, tempering of glass and drying of papers and films [1]. It was also often used in rapid heating and cooling applications such as drying or freezing of food products. In this method, the jet flow impinges directly on the heat transfer surface and the high heat transfer rate is obtained in jet impingement region. However, the heat transfer rate decays in wall jet region due to the development of boundary layer on impinged surface [2]. To improve the uniformity of heat transfer on impinged surface, swirling jet flow has been used instead of non-swirling jet. Huang and El-Genk [3] used a swirl generator made of a cylindrical plug with four narrow channels inserted in pipe nozzle to provide swirl to air impinging jet. They found that the radial heat transfer distributions become more uniform than conventional impinging jet. Lee et al. [4] used some vane-type swirl generators to generate swirl impinging jet. To study the effect of swirling jet flow, the local heat transfer distribution was measured using thermochromic liquid crystal coated on the impinged surface. They found that the average Nusselt numbers are larger than non-swirling flow at small nozzle-to-plate distance for all swirl number, but the effect of swirling jet is rarely seen at large nozzle-to-plate distance. Wen and Jang [5] studied impinging jet cooling on a flat surface by using jet issuing through longitudinal swirling strips. The heat transfer and flow structure of impinging jet were investigated for two different inserts: longitudinal swirling-strip and crossed swirling-strip at different

nozzle-to-plate distances. The correlations of Nusselt numbers were provided for all nozzle types. However, there are a few studies for heat transfer characteristics with a swirling impinging jet. To understand the heat transfer enhancement mechanism, the heat transfer and flow visualization experiments are needed.

In this study, we used thermochromic liquid crystal sheet to investigate the effect of swirl number and nozzle-to-plate distance on heat transfer characteristics of an impinging jet from twisted tape inserted pipe nozzle. And we used flow visualization techniques to reveal the jet flow from pipe nozzle and flow on impinged surface. The experiments were carried out for the jet Reynolds number ($Re = \rho \bar{V} D / \mu$, where $\bar{V}$ is the average velocity calculated from mass flow rate and D is the pipe nozzle diameter) of $Re=20,000$, nozzle-to-plate distance of $L/D=2, 4, 6, 8, 10$ and swirl number of $Sw=0.40, 0.62, 0.78, 0.94$.

2 Experimental Details

2.1 Experimental apparatus

The schematic of experimental setup is shown in Fig.1. Air jet is supplied by a centrifugal blower. The flow rate of jet flow is controlled by an inverter and is measured with calibrated orifice flow meter. The air from blower passes through a settling chamber before enters to pipe nozzle. The pipe nozzle has inner diameter of 16.5 mm and a length of 300 mm. Twisted tape is inserted in pipe nozzle for generating swirl flow. Electric heaters which controlled with temperature controller are installed in the settling chamber in order to obtain a constant and controllable temperature during experiment. The jet from pipe nozzle impinges normal to the flat wall and then flow between confined wall and jet impinged wall.

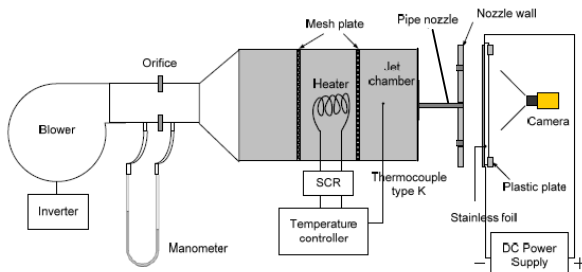


Fig. 1 Schematic of experimental setup



Fig. 2 Swirl generators with different twisted pitch number

The swirl jet flow is generated by inserting a twisted tape in the pipe nozzle. The twisted tapes are made of 2.5 mm thick stainless strips and are twisted in counter-clockwise. Fig. 2 shows the picture of twisted tapes used in this study. The length of twisted tape is 300 mm. The swirl intensity is varied by changing the number of pitches per twisted tape length. The swirl intensity is represented by swirl number which is defined as follow:

$$Sw = \frac{G_{\theta}}{RG_n} \quad (1)$$

where G_{θ} is the axial flux of azimuthal momentum, G_n is the axial flux of axial momentum and R is the radius of pipe nozzle. In this study, we ignore the effect of boundary layer in pipe nozzle and assume that the axial velocity and angular velocity are constant along the cross section of nozzle exit. So, G_{θ} and G_n can be expressed as follows:

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \quad (2)$$

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

$$G_{\theta} = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_{\theta} r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \quad (3)$$

where V_n , V_{θ} and ω are axial velocity, azimuthal velocity and angular velocity respectively. The angular velocity can be calculated from number of twisted pitch (n) and length of twisted tape ($l=300\text{mm}$) as follow

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (4)$$

From Eq.(1)-(4), a modified swirl number is defined as follow

$$Sw^* = \frac{\pi n R}{l} \quad (5)$$

Table 1 shows the detail of the twisted tapes and modified swirl number (Sw^*) for jet when using each twisted tapes. Twisted tape was placed inside the end of pipe nozzle as shown in Fig.3. Fig.3. also shows the coordinate system using in this study.

Table 1 Modified swirl number for each twisted tapes

Number of pitch (n)	Swirl number
0	0.00
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

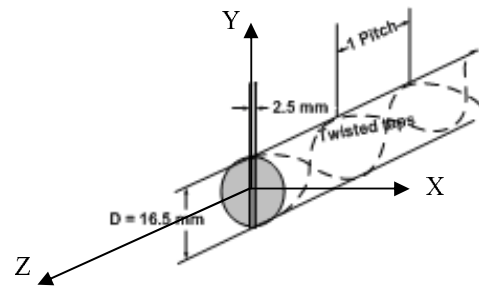


Fig. 3 Twisted tape inserted in pipe nozzle

2.3 Free jet flow visualization

To reveal the effect of swirl number on flow structure of free jet, the flow visualization was carried out using Schlieren technique. In the experiment, the air jet was heated up to 60°C and then issued to ambient at room temperature. The visualized flow pattern was recorded using a high speed digital video camera.

2.4 Heat transfer visualization and measurement

In this experiment, the electrical heated impinged target was cooled by jet issued from pipe nozzle. The target plate was made of stainless steel foil (SUS304) whose sizes were $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ and 0.03 mm thick. A liquid crystal sheet was attached with binder film onto the rear side of the impingement surface of stainless foil. The liquid crystal sheet used in this study changed the color systematically from black, red, yellow, green and blue between $29\text{--}36^\circ\text{C}$. Direct current was supplied to the stainless steel foil from a power supply unit via the copper bus bar electrodes, which were attached with both ends of stainless steel foil and acrylic plate as shown in Fig.3. So the boundary condition of uniform heat flux could be achieved on the target surface. The input power to the stainless steel foil was calculated from the power supply electric current and stainless steel foil resistance. Because, the stainless steel foil used in this study was sufficiently thin, the temperature on the target plate was obtained from the color pattern of the liquid crystal sheet in the rear side. When the temperature distribution on impinged surface (the color pattern of the liquid crystal sheet) reached steady state, the color pattern on liquid crystal sheet was recorded by a digital camera.

Since the lines of constant color on liquid crystal sheet corresponded to isotherms, an isotherm showed a line of constant heat transfer coefficient (Nusselt number) under a constant heat flux boundary condition. By changing the input current (heat flux) on target surface, the position of the isotherm was moved and the distribution of heat transfer coefficient could be measured by recording the position of yellow line (The calibration shows that this isotherm line was 30.2°C.) on the liquid crystal sheet for each change of heat flux. In this study, image processing technique was used to determine the heat transfer distribution from the isothermal line in images for each change of heat flux. All results are presented in the form of Nusselt number. The local convective heat transfer coefficient and local Nusselt number are calculated from

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_j} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (7)$$

where $\dot{q}$ is heat flux obtained by power input from power supply to impinged wall. T_j is jet temperature measured in settling chamber, T_w is wall temperature measured by tracing the yellow line color on liquid crystal sheet.

2.5 Wall flow visualization

In order to visualize the flow pattern on target plate, the oil film visualization technique was used in this experiment. A transparent acrylic plate was used as the target plate instead of stainless foil. The mixture of liquid paraffin, titanium dioxide and oleic acid was prepared and painted uniformly on the impinged surface. When the air jet started to impinge on the painted target plate, the oil film was removed by air jet. The change of oil film pattern was recorded by digital camera during exposed to impinging jet.

3 Results and Discussion

3.1 Free jet flow visualization

Fig.4 shows the effect of swirl number on free jet flow patterns observed by using Schlieren visualization technique. The experiments were conducted at constant $Re=1.85 \times 10^4$ and $T_j=60^\circ\text{C}$. In this figure, the flow patterns visualized from Y-Z plane and Z-X plane are also shown. For all of free jets, there appears no flow region (black region in figures) near pipe exit in Z-X plane due to the edge of twisted tape. And there appears strong twisted flow region between two flow streams from nozzle exit in Y-Z plane. From the results, it is found that the jet spreading rate in jet radial direction tends to increase with increase of swirl number.

3.2 Heat transfer and flow visualization on impinged surface

Fig. 5 shows example of heat transfer patterns on impinged surface visualized by using thermochromic liquid crystal sheet for swirling jet of $Sw^*=0.62$ at $L=2D$. The lower temperature region appeared on liquid crystal sheet means the higher heat transfer region. In the experiment, the jet at room temperature impinged on the heated wall. The heat flux on impinged wall was varied in order to investigate heat transfer patterns on high and low heat transfer rate regions on impinged surface. At small heat flux condition, the heat transfer pattern in wall jet flow region was visualized. And the heat transfer pattern in jet impingement region was visualized when increased the heat flux on impinged wall. For impinging jet with swirl effect, it is found that there have two peaks of heat transfer near the impinging point. This is due to the flow from pipe with twisted tape divided into two stream flows at nozzle exit and then swirl around the jet axis before impinging obliquely on the surface. It can be seen the heat transfer enhancement due to two of stream flows impinging oblique to the surface.

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

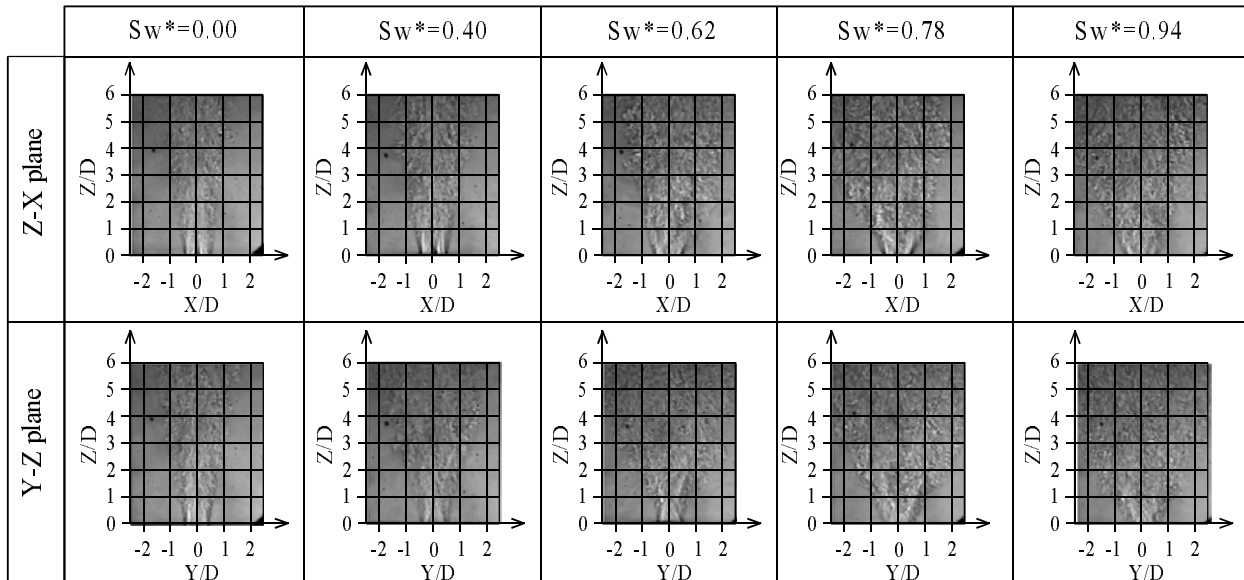


Fig. 4 Effect of swirl number on free jet flow patterns observed by using Schlieren visualization technique ($Re=1.85 \times 10^4$, $T_j=60^\circ\text{C}$)

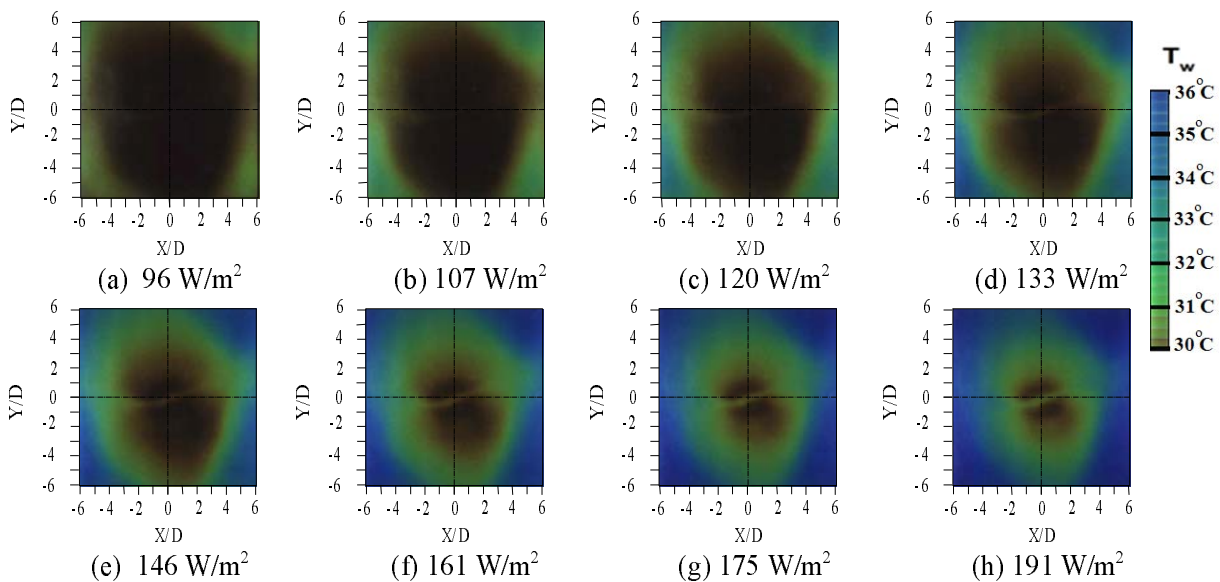


Fig. 5 Visualization of heat transfer on impinging surface for swirling jet of $Sw^*=0.62$ at $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)

Fig.6 shows time sequence of oil film patterns on impinging surface after jet impingement for swirling jet of $Sw^*=0.62$ at $L=2D$. The oil film pattern in Fig.6(a) shows that there are two streams of flow impinging on the wall. After that oil film on surface is removed by strong wall shear flow and there appear two of black regions (no oil film region) apart from center of jet. These regions correspond to jet impingement region. The remains of white oil in each of jet impingement regions correspond to the stagnation region. Around jet impingement

regions, there is wall jet region where the white oil is removed partly and appear black-white region in figure. The wall jet region can be detected only in region behind the jet impingement region.

Fig. 7 and Fig.8 show the effect of swirl number on heat transfer and wall flow patterns on impinged surface for $L=2D$ ($Re=20,000$), respectively. These figures also show the results of conventional impinging jet from pipe nozzle without twisted tape for comparison. The heat transfer patterns in Fig. 7 correspond to the wall flow patterns in Fig.8. It is found that the distance between two peaks of heat transfer increases with increase in swirl number.

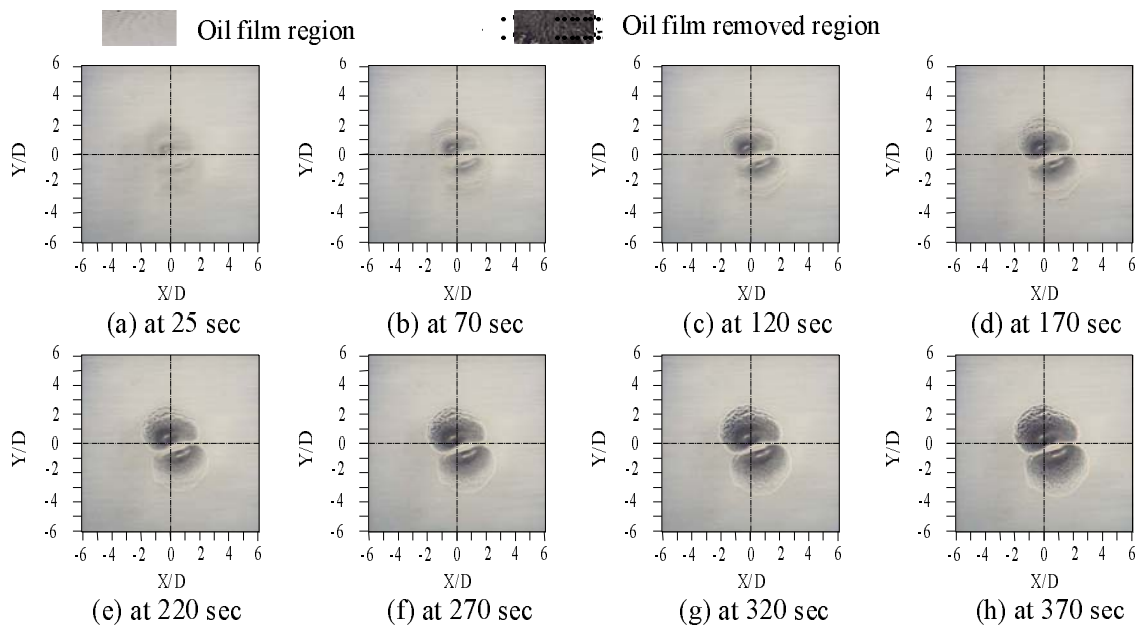


Fig. 6 Time sequence of oil film patterns on impinged surface after jet impingement for swirling jet of $Sw^*=0.62$ at $L=2D$ ($Re=20,000$)

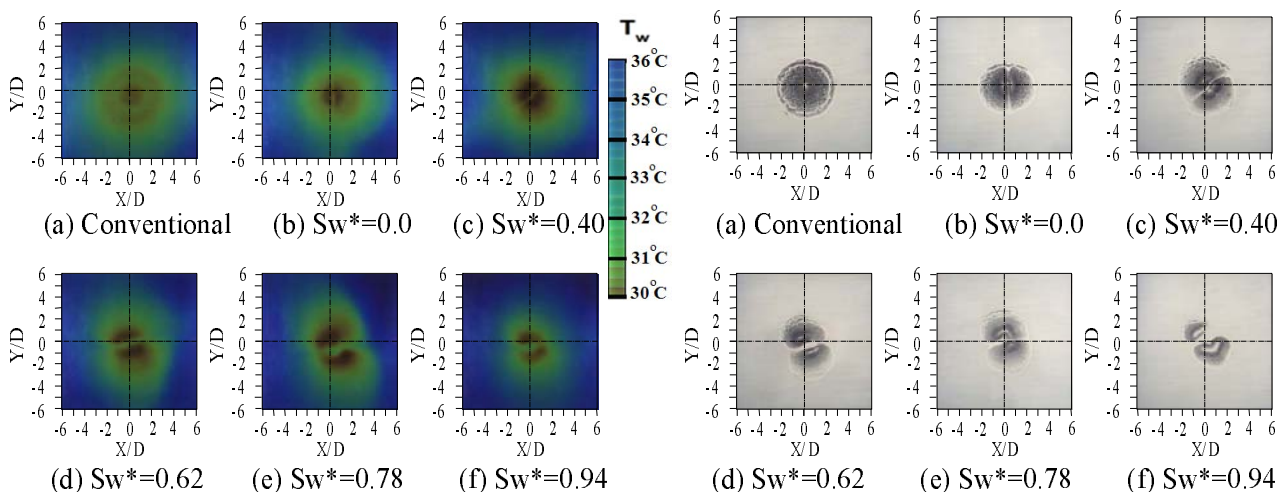


Fig. 7 Effect of swirl number on heat transfer patterns on impinged surface for $L=2D$ ($Re=20,000$)

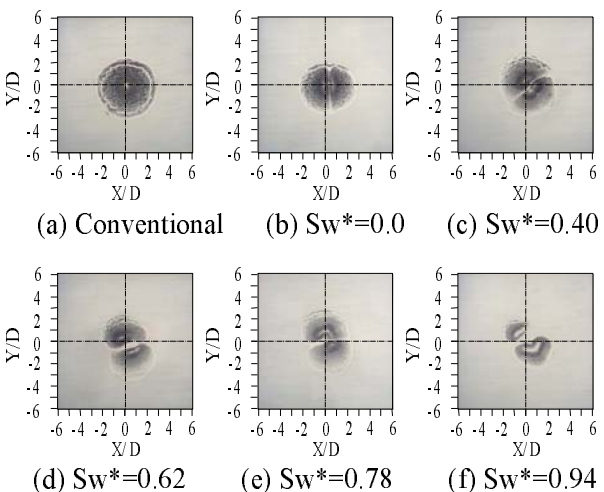


Fig. 8 Effect of swirl number on wall flow patterns on impinged surface for $L=2D$ ($Re=20,000$)

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

3.3 Local Nusselt number on impinging surface

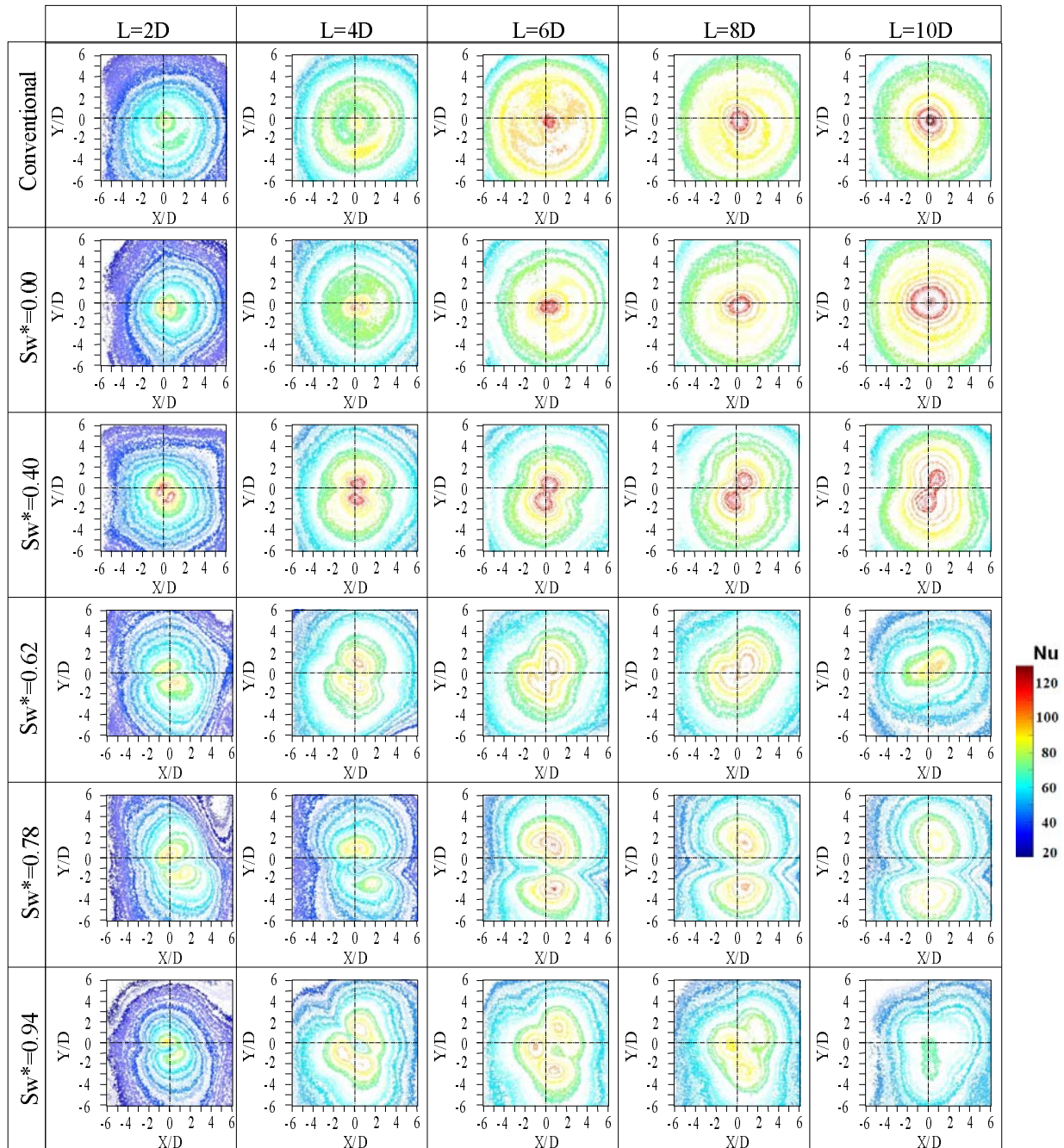


Fig. 9 Effect of Swirl number and nozzle-to-plate distance on contour of Nusselt number ($Re=20,000$)

Fig. 9 shows the effect of swirl number on local Nusselt number at different nozzle-to-plate distances. For conventional impinging jet (no twisted tape inserted in pipe nozzle), the Nusselt number becomes maximum at the center of pipe nozzle location on impinging surface for all L . The patterns of local Nusselt number are

symmetry and the Nusselt number decreases from maximum point as going far from stagnation point. And at $L=4D$, there appears the secondary maximum heat transfer at radial location $R=3D$ from stagnation point. The heat transfer rate increases with the increase of L . It may due to the turbulence intensity of jet at nozzle exit is low, and when the nozzle-to-plate distance increase, the turbulence of jet increases before impinging on the surface.

For swirling jet of $Sw^*=0.0$ case, the flow from pipe is divided to two of jets by tape with no twist inserted in pipe nozzle. At small $L=2D$ and $4D$, it appears two peaks of Nusselt number in stagnation region. But, the two of jets combine before impinging on the surface at larger L , the heat transfer pattern becomes similar to the case of conventional impinging jet.

For swirling jet of $Sw^*=0.40$ case, there appears two peaks of Nusselt number in the impingement region for all L . The heat transfer patterns in jet impingement region and wall jet region are affected by swirl effect. It is clear that the heat transfer is enhanced in jet impingement region, when compared with conventional impinging jet. However, there is no heat transfer enhancement in wall jet region.

For swirling jet of $Sw^*=0.62$, there also appears two peaks of Nusselt number in the impingement region, but the peak of Nusselt number becomes smaller when compared with case of $Sw^*=0.40$ for all case of L . The heat transfer rate on all region decreases when compared with conventional impinging jet. This is due to the swirl effect induced strong mixing between the jet and ambient air before impinging.

For swirling jet of $Sw^*=0.78$, the distance between two peaks of Nusselt number increased and the impingement region is divided into two regions clearly. The heat transfer is enhanced in wall jet region when compare with case of $Sw^*=0.62$ for case of $L=6D$, $8D$ and $10D$.

For swirling jet of $Sw^*=0.94$, the heat transfer patterns become more complex in jet impingement region. However, the heat transfer enhancement can be seen in jet impingement region when compared with conventional impinging jet for case of $L=2D$ and $4D$.

4 Conclusions

In this work, the effect of swirl number on free jet flow and heat transfer characteristics of an impinging jet was investigated at different nozzle-to-plate distances. The main results obtained in these experiments are as follows:

- (1) The jet from pipe nozzle with twisted tape is divided into two streams of flow and then flow across with an angle depends on the flow out angle from twisted tape. The number of twisted pitch affects to the swirl number of jet and flow out angle from twisted tape. The increase of swirl number of free jet promotes the jet spreading in radial direction.
- (2) The heat transfer patterns appear two peaks of heat transfer in jet impingement region due to two of stream flows from pipe nozzle impinged obliquely to the impinged surface. The heat transfer enhancement can be obtained in jet impingement region for case of $Sw^*=0.40$ at all L .
- (3) When the swirl number is increased larger than $Sw^*=0.40$, the heat transfer rate in jet impingement region decreased, but the heat transfer distributions on impinged surface become more uniform than in the case of conventional impinging jet.

Acknowledgements

The authors are grateful for the support of this research by Thailand Research Fund (TRF) through Grant No. MRG4980085.

References

1. H. Martin. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, Academic Press, New York, pp 1-60, 1977

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

2. R. Viskanta. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 6, pp 111-134, 1993
3. L. Huang, M.S. El-Genk. Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp 583-600, 1997.
4. D. H. Lee, S.Y. Won, Y.T. Kim, Y.S. Chung. Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp 223-227, 2002.
5. M.-Y. Wen, K.-J. Jang. An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp 4657-4667, 2003.
6. K. Bakirci, K. Bilen. Visualization of heat transfer for impinging swirl flow. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 32, pp 182-191, 2007