ระบบ CAD/CAE เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียมไดแคสติง สำหรับชิ้นงานเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์

นายธนสาร อินทรกำธรชัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-299-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19257375

A CAD/CAE FOR DESIGN AND ANALYSIS OF AN ALUMINUM DIE CASTING DIE FOR AN AUTOMOBILE OIL-PUMP

Mr. Thanasan Intarakumthornchai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-299-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบ CAD/CAE เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียมไดแคสติง สำหรับชิ้นงานเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์
โดย	นายธนสาร อินทรกำธรชัย
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... **คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์**

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชัย สุมิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... **ประธานกรรมการ**

(รองศาสตราจารย์จรูญ มหิทธาฟองกุล)

..... **อาจารย์ที่ปรึกษา**

(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

..... **อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

..... **กรรมการ**

(รองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกศึก)

ธนสาร อินทรกำธรชัย : ระบบ CAD/CAE เพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียมไดแคสติง สำหรับชิ้นงานเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์ (A CAD/CAE FOR DESIGN AND ANALYSIS OF AN ALUMINUM DIE CASTING DIE FOR AN AUTOMOBILE OIL-PUMP) อ.ที่ปรึกษา : ศ. ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 142 หน้า.
ISBN 974-333-299-5

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการนำระบบ CAD/CAE มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ในงานฉีดอะลูมิเนียมไดแคสติง งานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาของการใช้หลักการทางวิศวกรรมมาช่วยในการออกแบบเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์อย่างเป็นขั้นตอน ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบทางเข้า ระบบระบายความร้อน และระบบนำปลดชิ้นงาน ผู้วิจัยยังได้สร้างรูปแบบสามมิติของชิ้นงานพร้อมทั้งระบบทางวิ่งด้วยการใช้โปรแกรม CAD อีกด้วย จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของน้ำอะลูมิเนียมเหลวในแม่พิมพ์และลำดับการแข็งตัวของชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAE และเปรียบเทียบผลที่ได้จากแม่พิมพ์ใหม่นี้กับผลที่ได้จากแม่พิมพ์เดิมของบริษัท ผู้วิจัยพบว่าการนำหลักการทางวิศวกรรม (ระบบ CAD/CAE) มาใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ช่วยให้สามารถออกแบบแม่พิมพ์ที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาก่อน ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียมไดแคสติงได้

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

THANASAN INTARAKUMTHORNCHAI : A CAD/CAE FOR DESIGN AND ANALYSIS OF AN ALUMINUM DIE CASTING DIE FOR AN AUTOMOBILE OIL-PUMP. THESIS ADVISOR : PROF. SIRICHAN THONGPRASERT, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : PROF. PRAMOTE DECHAUMPHAI, Ph.D. 142 pp.
ISBN 974-333-299-5

The objective of the research is to use a CAD/CAE system for the design and analysis of an aluminum die casting die. An automobile oil-pump die is used in the study for the design of gating system, the thermal control system, and the ejection system. A CAD package is first used to create a three-dimensional oil-pump model with the gating system. Then a CAE program is used to analyze the fluid flow field and temperature distribution to examine whether the defects due to the filling and solidification process exist. Finally the results observed from a company designed die and the research designed die are compared. It is concluded that the CAD/CAE system can increase the efficiency in the design of aluminum die casting dies with optimal filling under suitable thermal environment.

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้จากการผลักดันของ ศ. ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา และจะไม่สำเร็จถ้าขาดคำแนะนำที่ดีเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ ศ. ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่อนุญาตให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ นายจาภิกรณ์ สุวิกรม ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม I-deas และ ProCAST ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานหล่อโลหะ และทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่คอยให้ความสะดวกและช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายผู้เขียนขอขอบคุณบิดามารดา ที่คอยให้กำลังใจ และเงินสนับสนุน ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ให้คำชี้แนะที่ดี ตลอดมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ธนสาร อินทรกำธรชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญรูป..... ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ฒ

บทที่

1. **บทนำ**..... 1

1.1 ความเป็นมาของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

1.6 ปริทัศน์วรรณกรรม..... 3

2. **ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน**..... 8

2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการฉีด..... 8

2.2 คุณลักษณะของเครื่องฉีด..... 10

2.3 สภาวะการฉีด..... 11

2.4 หน้าที่และองค์ประกอบของแม่พิมพ์..... 11

2.5 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตแม่พิมพ์..... 12

2.6 การออกแบบแม่พิมพ์..... 14

2.7 การวิเคราะห์แม่พิมพ์..... 22

3. **แนวความคิดในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ และข้อมูลพื้นฐาน**..... 35

3.1 ขั้นตอนการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์..... 35

3.2 ปัจจัยในการพิจารณาเพื่อการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์..... 35

3.3 ข้อมูลพื้นฐานของชิ้นงาน แม่พิมพ์ เครื่องจักร และสภาวะในการฉีด..... 35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

3.4 เครื่องมือและโปรแกรม CAD/CAE ที่ใช้..... 45

3.5 รูปแบบ 3 มิติของชิ้นงาน..... 46

4. การออกแบบและการวิเคราะห์..... **47**

4.1 การออกแบบแม่พิมพ์..... 47

4.2 การวิเคราะห์แม่พิมพ์..... 109

5. สรุปโครงการวิจัยและงานวิจัยต่อเนื่อง..... **117**

5.1 สรุปโครงการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 117

5.2 งานวิจัยต่อเนื่อง..... 118

5.3 อุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์..... 119

รายการอ้างอิง..... 121

ภาคผนวก ก..... 123

ภาคผนวก ข..... 125

ประวัติผู้เขียน..... 142

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมอัลลอยด์	8
2.2	ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนและกายภาพของอะลูมิเนียมอัลลอยด์	9
2.3	ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอัลลอยด์	9
2.4	ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในส่วนที่สัมผัสกับน้ำอะลูมิเนียมเหลว	14
2.5	ตารางแสดงลักษณะการใช้งาน	14
2.6	ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของเหล็ก H-13	14
2.7	ตารางแสดงขนาดของรูล้นที่สัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานและเวลาเติมเต็ม	18
3.1	ตารางแสดงอัตราเทียบความร้อน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 383	39
3.2	ตารางแสดงค่าความหนืดของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ	39
3.3	ตารางแสดงขีดความสามารถของเครื่องฉีด TOSHIBA รุ่น DC350CL	43
3.4	ตารางแสดงความสามารถในการหล่อของเครื่องรุ่น DC 350CL	44
3.5	ตารางแสดงสภาวะการฉีด	44
4.1	ตารางแสดงข้อมูลของชิ้นงานที่ได้จากรูปแบบสามมิติ	85
4.2	ตารางแสดงค่าปริมาตรและพื้นที่ผิวของชิ้นส่วนความร้อนต่างๆ ที่อยู่ในส่วนประกอบของแม่พิมพ์	87
4.3	ตารางแสดงค่าความร้อนสะสมในส่วนของความร้อน	90
4.4	ตารางแสดงค่าการสูญเสียและได้รับความร้อนในแต่ละส่วนความร้อน	94
4.5	ตารางแสดงค่าความร้อนสุดท้ายที่เข้าไปในส่วนประกอบของแม่พิมพ์แต่ละส่วน	95
4.6	ตารางแสดงค่าความร้อนที่ถูกเอาออกโดยน้ำที่ฉีดบนผิวหน้าแม่พิมพ์ในแต่ละชิ้นส่วนความร้อน	97
4.7	ตารางแสดงค่าความร้อนที่ตกค้างอยู่ในส่วนของแม่พิมพ์ในแต่ละชิ้นส่วนความร้อน.	98
4.8	ตารางแสดงค่าความร้อนที่ถูกเอาออกโดยน้ำที่ฉีดบนผิวหน้าแม่พิมพ์ในแต่ละชิ้นส่วนที่ทำการปรับเปลี่ยนการพ่นน้ำใหม่	100
4.9	ตารางแสดงค่าความร้อนที่ตกค้างอยู่ในส่วนของแม่พิมพ์ในแต่ละชิ้นส่วนใหม่	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	ตารางแสดงตำแหน่งและความยาวของท่อน้ำระบายความร้อนที่มีขนาด 7/16 นิ้ว..	106
4.11	ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบระบบทางเข้าเก่าและใหม่....	116
1	ตารางแสดงค่าต่างๆ ในการคำนวณหาเวลาในการเติมเต็ม.....	121
2	ตารางแสดงค่าความเร็วทางเข้าและค่า J Factor.....	121

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปแสดงเฟสไดอะแกรมของ Al-Si	9
2.2	องค์ประกอบของแม่พิมพ์	12
2.3	รูปแสดงพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งที่นิยมใช้	15
2.4	รูปแสดงลักษณะและองค์ประกอบของทางวิ่งเข้าแบบสัมผัส	16
2.5ก	รูปแสดงลักษณะของทางวิ่งเข้ารูปพัดที่มีเส้นกึ่งกลางตั้งฉากกับชิ้นงาน	17
2.5ข	รูปแสดงลักษณะของทางวิ่งเข้ารูปพัดที่มีเส้นกึ่งกลางทำมุมเอียงกับชิ้นงาน	18
2.6	รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Frommer	23
2.7	รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Brandt	24
2.8	รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Koester และ Goehring	24
2.9	รูปแสดงลำดับการแข็งตัวของชิ้นงานที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ	25
2.10	รูปแสดงลำดับการแข็งตัวของชิ้นงานที่มีหน้าตัดเท่ากันแต่อยู่บนแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน	26
2.11	รูปแสดงลำดับการแข็งตัวของรูปร่างชิ้นงานที่เกิดขีดจำกัดของการกระจายความร้อนทำให้เกิดรูพรุนที่ผิวหน้า	27
2.12	การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ	32
2.13	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ	33
3.1	รูปแสดงขั้นตอนในการผลิตผลิตภัณฑ์ในทางการค้าทั่วๆไป	36
3.2	รูปแสดงขั้นตอนในการผลิตผลิตภัณฑ์โดยนำระบบ CAD/CAE เข้ามาพัฒนา	37
3.3	รูปแสดงปัจจัยต่างๆที่มีความสัมพันธ์กันในการออกแบบและวิเคราะห์	38
3.4	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราเทียบความร้อน	40
3.5	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	40
3.6	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่น	41
3.7	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนืด	41
3.8	รูปแสดงภาพเขียนแบบของชิ้นงานตัวอย่างใน 2 มิติ	41
3.9	รูปแสดงภาพชิ้นงาน 3มิติ แบบไวร์เฟรม (wire frame)	46
3.10	รูปแสดงภาพชิ้นงาน 3มิติ แบบรูปร่างของแข็ง (solid)	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	รูปแสดงแนวแบ่งแยก และ ส่วนที่อยู่กับแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่และอยู่กับที่.....	47
4.2	รูปแสดงลักษณะของไส้แบบที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานตัวอย่าง.....	48
4.3	รูปแสดงเส้นทางการไหลกับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ	49
4.4	รูปแสดงเส้นทางการไหลของน้ำโลหะเหลวผ่านชิ้นงานตัวอย่าง.....	49
4.5	รูปแสดงมุมการไหลของน้ำโลหะเหลววัดเทียบกับเส้นตั้งฉากกับแนวทางเข้า.....	50
4.6	รูปแสดงเส้นทางการไหลถูกแยกออกเป็น 2 เส้นทางเมื่อไหลผ่านชิ้นงานรูปทรงกระบอก.....	50
4.7ก	รูปแสดงการแบ่งชิ้นงานตัวอย่างตามเส้นทางการไหลในแบบไวร์เฟรม.....	51
4.7ข	รูปแสดงการแบ่งชิ้นงานตัวอย่างตามเส้นทางการไหลในแบบของแข็ง.....	51
4.8	รูปแสดงแผนภาพเครือข่ายของชิ้นงานตัวอย่าง.....	52
4.9	รูปแสดงภาพร่างโดยสังเขปของตำแหน่งและความยาวของทางเข้า.....	53
4.10	รูปแสดงตำแหน่งและขนาดของรูล้นและทางหนีอากาศในชิ้นงานตัวอย่าง.....	53
4.11	รูปแสดงข้อมูลต่างๆของชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกบันทึกลงใน ตารางคำนวณ.....	54
4.12	รูปแสดงทรงกระบอกเจาะรูซึ่งมีลักษณะคล้ายชิ้นงานตัวอย่าง.....	55
4.13	รูปแสดงส่วนต่างๆ ของระบบทางเข้า	57
4.14	รูปแสดงข้อมูลต่างๆของระบบทางเข้าที่ถูกบันทึกลงใน ตารางคำนวณ.....	59
4.15	รูปแสดงข้อมูลต่างๆของระบบทางเข้าที่ถูกบันทึกลงใน ตารางคำนวณ.....	61
4.16	รูปแสดงแผนภาพ PV^2.....	63
4.17	รูปแสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของระบบทางเข้ากับเครื่องจักรที่ใช้.....	64
4.18	รูปแสดงลักษณะของมุมของทางวิ่งเข้ารูปพัด	67
4.19	รูปแสดงข้อมูลต่างๆของระบบทางเข้าที่ถูกบันทึกลงใน ตารางคำนวณ.....	68
4.20	รูปแสดงทางวิ่งเข้าแบบสัมผัสแบบหวี	69
4.21ก	รูปแสดงข้อมูลต่างๆของระบบทางเข้าหน้าตัดที่ 1 - 5 ถูกบันทึกลงใน ตารางคำนวณ.....	77
4.21ข	รูปแสดงข้อมูลต่างๆของระบบทางเข้าหน้าตัดที่ 6 - 9 ถูกบันทึกลงใน ตารางคำนวณ.....	78
4.22	รูปแสดงข้อมูลของทางวิ่งที่บันทึกลงในตารางคำนวณ.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.23ก	รูปแสดงภาพวาดสามมิติแบบไวร์เฟรมของระบบทางวิ่งเข้ากับชิ้นงานที่ได้จากออกแบบข้างต้น	84
4.23ข	รูปแสดงภาพวาดสามมิติแบบรูปร่างของแข็งของระบบทางวิ่งเข้ากับชิ้นงานที่ได้จากออกแบบข้างต้น	84
4.24ก	รูปแสดงชิ้นส่วนความร้อนของชิ้นงานตัวอย่าง	87
4.24ข	รูปแสดงชิ้นส่วนความร้อนของชิ้นงานตัวอย่าง	87
4.25	รูปแสดงลำดับในการวิ่งของน้ำโลหะเหลวผ่านส่วนความร้อนในแต่ละส่วน	92
4.26	รูปแสดงตำแหน่งของท่อน้ำระบายความร้อนในชิ้นงานตัวอย่าง	107
4.27	รูปแสดงตำแหน่งของเข็มแทงบนชิ้นงานเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์	109
4.28	รูปแสดงภาพของปัญหาพื้นฐานที่ทำการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ	110
4.29	รูปแสดงรูปร่างตัวอย่างที่จะมาทำการทดสอบปัญหาการถ่ายเทความร้อน	111
ข.1	รูปแสดงการทดสอบปัญหาพื้นฐานด้านการไหล	124
ข.2	รูปแสดงการทดสอบปัญหาพื้นฐานด้านการถ่ายเทความร้อนรูปที่ 4.29ก	125
ข.3	รูปแสดงการทดสอบปัญหาพื้นฐานด้านการถ่ายเทความร้อนรูปที่ 4.29ข	126
ข.4	รูปแสดงการทดสอบปัญหาพื้นฐานด้านการถ่ายเทความร้อนรูปที่ 4.29ค	127
ข.5	รูปแสดงการทดสอบด้านการไหลของระบบทางเข้าที่ทางโรงงานออกแบบไว้	128
ข.6	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเร็วที่เปลี่ยนไปในแต่ละโนด (node) ของระบบทางเข้าที่ทางโรงงานออกแบบไว้	132
ข.7	รูปแสดงการทดสอบด้านการถ่ายเทความร้อนของระบบทางเข้าที่ทางโรงงานออกแบบไว้	133
ข.8	รูปแสดงการทดสอบด้านการเป็นของแข็งของระบบทางเข้าที่ทางโรงงานออกแบบไว้	134
ข.9	รูปแสดงการทดสอบด้านการไหลของระบบทางเข้าที่ออกแบบไว้ใหม่	135
ข.10	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเร็วที่เปลี่ยนไปในแต่ละโนด (node) ของระบบทางเข้าที่ออกแบบไว้ใหม่	137
ข.11	รูปแสดงการทดสอบด้านการถ่ายเทความร้อนของระบบทางเข้าที่ออกแบบไว้ใหม่	138
ข.12	รูปแสดงการทดสอบด้านการแข็งตัวของระบบทางเข้าที่ออกแบบไว้ใหม่	139

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CAD(Computer Aided Design)	การออกแบบโดยนำคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนช่วย
CAE(Computer Aided Engineering)	การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมโดยนำคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนช่วย
CAM(Computer Aided Manufacturing)	การผลิตโดยนำคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนช่วย
Aluminum 380	อะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยด์ 380 มาตรฐาน ANSI
μm	ไมโครเมตร (10^{-6} เมตร)
cal	หน่วยวัดพลังงานเป็นแคลลอรี่
centipoise	หน่วยในการวัดค่าความหนืด
H-13	เหล็กกล้างานร้อนเกรด H-13 ตามมาตรฐาน AISI
u	ความเร็วในแนวแกน X
v	ความเร็วในแนวแกน Y
Φ	ฟังก์ชันการกระจายความหนืด
ρ	ความหนาแน่น
σ_x	ความเค้นในแนวแกน X
σ_y	ความเค้นในแนวแกน Y
τ_{xy}	ความเค้นเฉือน
μ	ค่าความหนืด
ε	พลังงานรวม
γ	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
e	พลังงานภายในต่อมวลหนึ่งหน่วย
T	อุณหภูมิ
K	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน