

การประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ

อดุลย์วิทย์ วรรณรัตน์

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2557

AN ESTIMATION OF POROSITY IN CAST ALUMINUM ALLOYS USING IMAGE PROCESSING
TECHNIQUES

Adulwit Wannarat

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2014

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประมาณค่าความพหุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ
ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ

โดย

อดุลย์วิทย์ วรรณรัตน์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

.....กรรมการ

(ดร. ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมล แสนอ้อม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส)

อดุลย์วิทย์ วรรณรัตน์ : การประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส, 81 หน้า.

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือการศึกษาและพัฒนาวิธีการประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ซึ่งถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น BET Surface Area Analyzer, Scanning Electron Microscope หรือ Liquid penetrant testing ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนการลงทุนซื้อเครื่องทดสอบที่มีราคาแพง ลดระยะเวลาในการตรวจสอบ และเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการวิจัย ออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเป็นขั้นตอนของการเตรียมพื้นผิวของชิ้นงานก่อนนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ 2. ขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน เป็นการนำเอาภาพต้นแบบมาทำการปรับปรุง โดยใช้เทคนิคด้านการประมวลผลภาพต่างๆ โดยมีการพัฒนา GUI (Graphic User Interface) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้น 3. ขั้นตอนการทวนสอบผลการทดลอง เป็นการประเมินประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ด้วยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความพรุนกับเทคนิคการประมวลผลภาพจากเครื่องทดสอบที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน 4. ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ตัวแปรต่างๆและธาตุผสมทางเคมี เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ (K) ที่ใช้ในการเทคนิคการประมวลผลภาพด้วยรูปร่างลักษณะ (Morphology) ที่สามารถใช้ได้กับทุกเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีธาตุผสมที่แตกต่างกัน

จากผลการทวนสอบของซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ เมื่อเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน พบว่ามีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 10% ซึ่งถือว่าอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ (K) กับธาตุผสมทางเคมีในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ พบว่าธาตุอะลูมิเนียมและธาตุซิลิกอนมีความสัมพันธ์กับค่ามาตรฐาน (K) อยู่ที่ -0.819 และ -0.820 ตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% จึงสรุปได้ว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาจากเทคนิคการประมวลผลภาพสำหรับงานวิจัยนี้ ประสบความสำเร็จและมีความแม่นยำในการประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อได้ใกล้เคียงกับซอฟต์แวร์ที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน

บัณฑิตวิทยาลัย

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ADULWIT WANNARAT : AN ESTIMATION OF POROSITY IN CAST ALUMINUM ALLOYS USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES. ADVISOR : ASSISTANCE PROFESSOR DR. NUTTAPOL LIMJEERAJARUS, 81 PP.

The main purpose of this research is to study and develop an estimation method of porosity in cast aluminum alloys using image processing techniques. Comparing with conventional porosity measurements such as BET Surface Area Analyzer, Scanning Electron Microscope (SEM) and Liquid penetrant testing, the image processing based estimation is an interesting method since it requires less equipment cost, less time-consuming, and more importantly, it is non-destructive method. Research methodology of this study is divided into 4 steps. The first step is the sample preparation in which samples were well-polished before their pictures were captured by a microscope. The second step is the porosity-estimating software development by which the captured pictures were imported and processed with various image processing techniques via a convenient GUI. The third step is the software validation in which the porosity estimated by our developed software was validated with that estimated by the officially certified machined of Iron and Steel Institute of Thailand (ISIT). The last step is an investigation of the relationship between the compositions of the alloys and the parameter K used in morphology technique in our software.

From validation, the porosity estimated by the developed software had an error within 10% as compared with that estimated by ISIT. In addition, the parameter K was found to be inversely proportional to the aluminum (Al) and the silicon (Si) with a standardized coefficient of -0.819 and -0.819 , respectively, at the confidence level of 99%. Therefore, it can be concluded that the software of porosity estimation in cast aluminum alloys using image processing techniques has been successfully developed with a satisfactory accuracy.

Graduate School

Field of Engineering of Technology

Academic Year 2014

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ (An Estimation of Porosity in Cast Aluminum Alloys using Image Processing Techniques) สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เกิดจากความร่วมมือและการสนับสนุนที่ดีจากหลายภาคส่วน ขอขอบพระคุณ บริษัท MAHLE Engine Components (Thailand) Co.,Ltd ที่ได้ให้การสนับสนุนในเรื่องการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณไทรรัฐ แสนเจียม (ผู้จัดการแผนกกลึง) คุณมานะ ชนะโชติ (รองผู้จัดการแผนกประกันคุณภาพ) คุณจิตติพงษ์ ลุนนอก (หัวหน้างานส่วนงานทดสอบวัสดุ แผนกประกันคุณภาพ) และคุณธนตร มีวิเชียร (หัวหน้างานส่วนงานหล่อ แผนกหล่อ) ที่คอยให้คำแนะนำในเรื่องการเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อและจัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ บริษัท Daiki Aluminium Industry (Thailand) Co.,Ltd ที่อนุเคราะห์ชิ้นงานอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ จำนวนทั้งสิ้น 24 ชิ้น เพื่อใช้เป็นชิ้นงานตัวอย่างในการทดลองโครงการวิจัยฉบับนี้ และบริษัท โรงหล่อเกียรติมงคล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนในส่วนของการทวนสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผศ.ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ ประธานการสอบโครงการวิจัย ดร. จิตติพร เลิศรัตน์เดชากุล และ ผศ.ดร.วิมล แสนอ้อม คณะกรรมการโครงการวิจัย ที่กรุณาให้แนวความคิด คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยฉบับนี้ เพื่อความสมบูรณ์ของโครงการวิจัยฉบับนี้มากที่สุด

ทั้งนี้กระผมนายอดุลย์วิทย์ วรรณรัตน์ ผู้ดำเนินโครงการวิจัยฉบับนี้จึงขอขอบพระคุณทุกท่านและรวมถึงบริษัทต่างๆที่ให้การสนับสนุน เป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้

อดุลย์วิทย์ วรรณรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาแนวทางเหตุผลและปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
2 หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 งานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
3 ระเบียบวิธีวิจัย	26
3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	26
3.2 ขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์	29
3.3 ขั้นตอนการทวนสอบผลการทดลอง	30
3.4 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆและธาตุผสม	30
4 ผลการดำเนินงานวิจัย	31
4.1 การพัฒนาซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพูนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ	32
4.2 การทวนสอบผลการทดลอง	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการดำเนินงานวิจัย (ต่อ).....	40
4.3 การหาค่าความสัมพันธ์ด้วยการใช้สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน	41
5 สรุปผลการวิจัย	43
5.1 สรุปผลการวิจัย	43
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำโครงการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก. ข้อมูลชิ้นงานตัวอย่าง โดยแบ่งตามเกรดและธาตุผสม.....	49
ภาคผนวก ข. โค้ดโปรแกรมการประมาณค่าความพรุน.....	51
ภาคผนวก ค. ผลการทวนสอบการประมาณค่าความพรุนด้วยพารามิเตอร์ K.....	55
ภาคผนวก ง. ผลการทวนสอบการประมาณค่าความพรุนด้วยพารามิเตอร์ K'.....	68
ประวัติย่อผู้วิจัย	81

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน	4
2.1 เกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ใช้แรงขึ้นรูป (Wrought Alloys)	7
2.2 เกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ (Cast Alloys)	8
2.3 คุณสมบัติของธาตุผสมทางเคมี	10
4.1 ผลการเปรียบเทียบการทวนสอบการประมาณค่าความพรุนจากสถาบันหลักและหลักกล้า แห่งประเทศไทย (ISIT) และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา (Porosity).....	36
4.2 แสดงรายละเอียดของ Major Series, Minor Series และค่าความบริสุทธิ์ (Impurity)	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุอะลูมิเนียม (Al), ธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุแมกนีเซียม (Mg) และ ธาตุนิเกิล (Ni) และธาตุโซเดียม (Na) กับ Major Series (Porosity).....	39
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุซิลิกอนซิลิกอน (Si) และธาตุแมงกานีส (Mn) กับ Minor Series.....	40
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุโครเมียม (Cr) และค่าความบริสุทธิ์ (Impurity).....	40
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และธาตุผสมที่เกี่ยวข้อง.....	41
4.7 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับธาตุผสม Al และ Si.....	41
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อใช้ในการระบุค่า K.....	42
4.9 ค่าความผิดพลาด (Error) ที่ได้จากการปรับค่า K'	42
5.1 เปรียบเทียบต้นทุนการลงทุนในเครื่องทดสอบ.....	45
5.2 เปรียบเทียบระยะเวลาในการประมวลผลความพรุน.....	46
ก.1 ธาตุผสมทางเคมีในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ	52
ค.1 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC2B.1	60
ค.2 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC3A.2	61
ค.3 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4A.1	62
ค.4 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4B.1	63
ค.5 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4C.1	64
ค.6 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4CHV.2	65
ค.7 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4D.1	66
ค.8 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC7A.1	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค.9 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC8A.1	68
ค.10 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC8A.2	69
ค.11 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC9A.1	70
ค.12 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC9A.2	71
ง.1 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC2B.1	78
ง.2 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC3A.2	79
ง.3 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4A.1	80
ง.4 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4B.1	81
ง.5 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4C.1	82
ง.6 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4CHV.2	83
ง.7 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4D.1	84
ง.8 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC7A.1	85
ง.9 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC8A.1	86
ง.10 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC8A.2	87
ง.11 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC9A.1	88
ง.12 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC9A.2	89

TNI

TAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ประเภทของอะลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป	9
2.2 ความสามารถในการละลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนในโลหะเหลว	12
2.3 กราฟแสดงความแข็งแรงดึง (UTS) ที่เกิดจากโพรงแก๊ส.....	13
2.4 ลักษณะการจับตัวของก๊าซไฮโดรเจนกับโลหะเหลว	14
2.5 ภาพระดับความเข้มเทาและการแสดงค่าพิกเซล.....	15
2.6 ภาพสีและการแสดงค่าพิกเซล	16
2.7 ภาพไบนารีและการแสดงค่าพิกเซล.....	16
2.8 ภาพแบบดัชนีและการแสดงค่าพิกเซล	17
2.9 การเปรียบเทียบฮิสโตแกรมของภาพที่มีระดับความเข้มเทาต่างกัน	18
2.10 ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร	24
2.11 ทิศทางความสัมพันธ์ของตัวแปร	25
3.1 เครื่องขัดชิ้นงาน (หยาบ)	27
3.2 เครื่องขัดชิ้นงาน (ละเอียด)	27
3.3 กล้องจุลทรรศน์ Keyence VHS-2000	28
3.4 การกำหนดบริเวณที่สนใจ โดยใช้วิธีตัดกริด ขนาด 2x2 มิลลิเมตร	28
3.5 ภาพตัวอย่างที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ Quadrant 1 จุดตำแหน่ง 1-1	29
3.6 การขีดตำแหน่งของกริด จากกล้องจุลทรรศน์ในแนวแกน X และ Y	29
4.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ	31
4.2 การกำหนดขอบเขตในชิ้นงานตัวอย่างและตัวอย่างภาพต้นแบบของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ หล่อ เกรด AC8A.1 ตำแหน่งที่ 1-5.....	32
4.3 เปรียบเทียบภาพต้นแบบที่ผ่านกระบวนการกรองภาพและแปลงเป็นภาพสีเทาดำ	33
4.4 ภาพที่ผ่านการแยกส่วนภาพ ด้วยเทคนิคเทรชโฮลด์ดิ่ง	33
4.5 อุปกรณ์การหล่อและลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังการหล่อ	34
4.6 เปอร์เซนต์ของธาตุผสมหลักในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์	36
4.7 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ถือว่าเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน ฯลฯ ด้วยข้อได้เปรียบทางด้านคุณสมบัติทางกล เช่น การนำไฟฟ้าและความร้อนสูง น้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้า

กระบวนการตรวจสอบคุณภาพของอะลูมิเนียมจึงมีความสำคัญมาก เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดต่อการทำงานหรือสูญเสียคุณสมบัติทางกลของชิ้นส่วนนั้นๆ ตัวบ่งชี้ทางคุณภาพของอะลูมิเนียมที่สำคัญ คือ ความเป็นรูพรุน (Porosity) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบความเป็นรูพรุนอยู่หลายวิธี ได้แก่ Surface Area Analyzer เป็นการทดสอบความพรุนของชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการดูดซับก๊าซเข้าไปในรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน เพื่อหาปริมาตรของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ มีราคาไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือตรวจสอบสมัยใหม่ แต่มีข้อเสียคือ ระยะเวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน, Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการตรวจสอบ โดยใช้อิเล็กตรอนที่มีคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสง เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำมาใช้แทนเลนส์กระจกและมีตัวตรวจวัด เพื่อจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระทบที่ผิวตัวอย่าง สัญญาณดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณภาพ แต่เนื่องจากการตรวจสอบประเภทนี้มีจำเป็นต้องใช้เงินลงทุนที่สูงมาก จึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก และวิธีการทดสอบด้วยการแทนที่น้ำ เป็นวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิม ที่ถูกคิดค้นมานานแล้ว มีจุดประสงค์เพื่อหาปริมาตรและ/หรือความถ่วงจำเพาะของวัสดุต่างๆ วิธีการทดสอบนี้ ไม่มีความซับซ้อนแต่อย่างใดและต้นทุนในการทดสอบต่ำ แต่จำเป็นที่จะต้องทำลายชิ้นงานตัวอย่างก่อนที่จะนำไปหาค่าปริมาตรหรือความถ่วงจำเพาะ จึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งสำหรับวัสดุที่มีความสามารถในการจุดติดไฟได้และวัสดุที่มีคุณสมบัติคงรูป เมื่อถูกแรงกระทำ (Thermosetting Plastic) ผู้วิจัยจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าความพรุนในชิ้นงานอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ โดยสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ใช้งานง่าย โดยจะมีส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้ (Graphic User Interface หรือ GUI) ที่ออกแบบมาให้เข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถประมวลผลการประมาณค่ารูพรุนได้เร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบอื่นๆ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุนในเครื่องมือตรวจสอบรูพรุน นอกจากนี้การตรวจสอบความพรุนด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ยังเป็นการทดสอบชิ้นงานแบบไม่ทำลาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อลดต้นทุนในการซื้อเครื่องมือตรวจสอบความพรุนที่มีราคาสูง

1.2.2 เพื่อลดเวลาในการประมวลผลการตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบในรูปแบบอื่นๆ

1.2.3 เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ให้มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าความพรุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลภาพแบบ 2D จากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ตัวบ่งชี้ที่สำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพของวัสดุ นั่นก็คือความเป็นรูพรุน ความเป็นรูพรุนนั้นเกิดมาได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การแพร่ซึมของก๊าซไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียมเหลวในการกระบวนการหลอม หรือการควบคุมดูแลกระบวนการได้ก๊าซ ฯลฯ

ปัจจุบันเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบ ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาไปค่อนข้างมาก มีเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามารองรับ ทำให้เครื่องมือตรวจสอบมีราคาสูง

เทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เทียบเคียงในการตรวจสอบความพรุน นั่นคือ เทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing Technique) ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นวงการแพทย์ วงการอุตสาหกรรม และอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถหาได้ง่าย ซึ่งเป็นหนึ่งใน Toolbox ของโปรแกรม MATLAB และสามารถเรียนรู้ด้วยตนเองได้ เนื่องจากมีความซับซ้อนของภาษาโปรแกรมมีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับภาษาโปรแกรมมิ่งอื่นๆ ได้แก่ ภาษา C, ภาษา Java เป็นต้น

ขั้นตอนในการประมวลผลภาพ ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบความพรุนของวัสดุ อลูมิเนียมอัลลอยด์ ได้แก่

- I. การประมวลผลภาพสี (Color Image Processing)
- II. การลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพ (Noise Reduction)
- III. การทำภาพให้มีความคมชัดด้วยการใช้ฟิลเตอร์ (Filtering Image Processing)
- IV. การแยกส่วนภาพ (Image Segmentation)
- V. การประมวลผลภาพด้วยการปรับปรุงโครงสร้างของภาพ (Morphological Image Processing)

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการประมาณค่าความพรุนอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ซึ่งเป็นหนึ่งใน Toolbox ของโปรแกรม MATLAB โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา จะสามารถแสดงผลของการประมาณค่าความพรุน ในลักษณะที่เป็นผลการจากคำนวณและแสดงผลในลักษณะที่เป็นขอบเขตของรูพรุนที่เกิดขึ้นในภาพต้นแบบ นอกจากนี้ GUI (Graphic User Interface) ยังถูกออกแบบมาให้ผู้ใช้ สามารถใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้น

ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบ เป็นชิ้นงานอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ จำนวน 12 ชิ้นงาน แบ่งตามเกรดและตามส่วนผสมทางเคมี สอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS H 2211 Aluminum alloys ingots for casting ดังแสดงในภาคผนวก ก. โดยชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จะถูกนำไปทำการขัดหยาบ ขัดละเอียด ด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 400 ไปจนถึง 1500 และขัดด้วยผงอลูมินา เพื่อให้ผิวของชิ้นงานเกิดความมันเงา เป็นอันสิ้นสุดขั้นตอนการขัดชิ้นงาน ก่อนที่จะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHS-2000 ด้วยกำลังขยาย 300X ขนาดภาพต้นแบบที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ มีขนาด 1600x1200 หรือ 315 KB โดยประมาณ เป็นไฟล์ภาพประเภท JPEG

ขั้นตอนในการทวนสอบผลการทดลอง จะใช้วิธีการทดสอบด้วยการประมวลผลภาพแบบ 2D ด้วยซอฟต์แวร์ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (ISIT) สำหรับขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างของตัวแปรและธาตุผสมทางเคมีจะใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation Analysis) และกำหนดรูปแบบของสมการเพื่อใช้ในการพยากรณ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ด้วยสมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Multiple Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม SPSS

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ซอฟต์แวร์มีความสามารถในการประมาณค่าความพรุนในวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ โดยเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลภาพแบบ 2D จากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

1.5.2 สามารถลดเวลาในการประมวลผลการตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบอื่นๆ

1.6 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการและระยะเวลาในการดำเนินงาน

[illegible]

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

วัสดุอะลูมิเนียมในปัจจุบันถือว่าเป็นบทบาทสำคัญในฐานะที่เป็นวัตถุดิบหลักและถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ในทุกวงการอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมรถยนต์ กระบวนการตรวจสอบคุณภาพของอะลูมิเนียมอัลลอยด์จึงมีความสำคัญมาก ที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพที่ดีขึ้นส่วนนั้นๆ ในส่วนของการวิจัยและพัฒนาจึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเครื่องมือตรวจสอบด้วยเทคนิคพิเศษ

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาเครื่องมือตรวจสอบของวัสดุนั้น ในงานวิจัย [1] โดยนำเทคนิคการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในการแยกส่วนของความพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อแอมแบบอัดโนมิติ ด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ 1) Ham extraction เป็นการปรับปรุงรูปร่างลักษณะ โดยใช้ตัวดำเนินการของ Morphology 2) การพัฒนาคุณภาพของภาพ โดยการลดสัญญาณแปลกปลอม (Noise) ที่เกิดขึ้นภายในภาพและการปรับปรุงค่า Contrast 3) การแยกส่วนความพรุนออกจากภาพ ในขั้นตอนนี้จะใช้การคำนวณองค์ประกอบของภาพ และแยกส่วนความพรุนด้วย Watershed เพื่อแยกส่วนของความพรุนในแอมหมู่ออกจากภาพ นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องพบว่าพื้นที่ของหมดของความพรุน (TNP) และความเป็นรูพรุน มีความสัมพันธ์กับน้ำภายในแอม ในทิศทางลบ ($P < 0.05$), และเวลาในการทำให้สุกและเวลาเย็นตัว [2] เป็นงานวิจัยที่ต้องการศึกษาปัญหาความบกพร่องที่มีขนาดเล็กในเชิงปริมาณของงานเชื่อมโลหะยึดที่มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อน โดยนำเทคนิคการประมวลผลภาพแบบอัดโนมิติมาประยุกต์ ซึ่งถูกพัฒนาอยู่ในโปรแกรม Visual Basic 6.0 ขั้นตอนในการประมวลผลภาพ จะมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยที่ [1] คือ บริเวณแนวเชื่อมจะถูกทำให้เด่นชัดขึ้นด้วยการใช้เทคนิคเทรชโฮลด์ดิ้ง (Thresholding) และความบกพร่องขนาดเล็กจะถูกแยกส่วนออกมาด้วยเทคนิคการแนกส่วนภาพ (Image Segmentation) [3] เป็นการศึกษาโครงสร้างของความพรุนในปูนซีเมนต์โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นรูพรุนและความทนต่อแรงอัด จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพมีความสามารถที่ดียิ่งขึ้น ในการระบุถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพื้นที่ความพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคและค่าความทนแรงอัด [4] ได้พัฒนาวิธีการตรวจสอบด้วยคอมพิวเตอร์ ให้สามารถระบุและแยกประเภทถึงข้อบกพร่องภายในวัสดุ ในชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีธาตุผสม Al-Si-Cu ภาพที่ได้จากการฉายด้วยรังสีเอกซเรย์ จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างภาพ

ต้นแบบและภาพผลลัพธ์ เพื่อประมาณคุณภาพของชิ้นงานหล่อ และจะถูกแบ่งประเภทของข้อบกพร่องนั้น ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีสถาปัตยกรรมแบบ (Multilayer Perceptron) MLP 5-27-108 [5] นำเสนอวิธีการแยกส่วนของความพรุนที่เกิดขึ้นในเนื้อไม้ ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) ปรับปรุงโครงสร้างขององค์ประกอบของความพรุน ที่มีขนาดที่แตกต่างกัน ด้วยการปรับปรุงตามรูปร่างลักษณะโดยใช้ตัวดำเนินการของ Morphology 2) ปรับปรุงคุณภาพของภาพ 3) ลดสิ่งแปลกปลอมภายในภาพ ในการแยกส่วนของความพรุน จะใช้ Adaptive Thresholding ในการแยกส่วนภาพ จากผลการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น พบว่าเทคนิคการประมวลผลภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุถึงความพรุนในเนื้อไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 อลูมิเนียมอัลลอยด์ [6]

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในเชิงพาณิชย์ (Commercially Pure Aluminum) มีปริมาณอะลูมิเนียมในส่วนผสมทางเคมีไม่น้อยกว่า 99% โดยน้ำหนัก และมีธาตุอื่นเจือปนเล็กน้อย ได้แก่ ทองแดง ซิลิคอน เหล็ก แมกนีเซียม เป็นต้น อลูมิเนียมชนิดนี้มีความแข็งแรงไม่สูงนัก แต่มีความเหนียว มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีพอสมควรและมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงนิยมนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์นำไฟฟ้าที่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักอุปกรณ์เป็นเรื่องสำคัญ สมบัติของอะลูมิเนียมในด้านการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนจะลดประสิทธิภาพลงอย่างมากเมื่อเติมธาตุผสม เรียกอะลูมิเนียมประเภทนี้ว่า โลหะผสมอะลูมิเนียมหรืออะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys) การเติมธาตุผสมมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียม ดังนั้นโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงมีความแข็งแรงสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นเดียวกับเหล็ก เนื่องจากมีลักษณะเด่นดังต่อไปนี้

- I. มีน้ำหนักเพียงหนึ่งในสามของน้ำหนักเหล็ก
- II. มีสมบัติการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี
- III. ความแข็งแรงต่อน้ำหนักของโลหะ มีค่าสูง
- IV. ไม่เกิดคราบสนิม
- V. สะท้อนแสงได้ดี
- VI. กัดกลิ้งได้ง่าย
- VII. ไม่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก
- VIII. ไม่เป็นพิษ

โดยทั่วไปอะลูมิเนียมผสมแบ่งกลุ่มการใช้งานออกเป็น 2 กลุ่มคือ อะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูป (Wrought Alloys) และอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป (Casting Alloys) โดยอะลูมิเนียมอัลลอยด์รีด จะต้อง

ผ่านการขึ้นรูปถาวร (plastic deformation) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างจากอลูมิเนียมหล่อ ทำให้มีรูปแบบที่หลากหลายตรงกับความต้องการใช้งานการผลิตในอุตสาหกรรม นอกจากนี้แต่ละกลุ่มยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยคือ โลหะผสมอลูมิเนียมที่สามารถอบชุบได้ (Heat-Treatable Alloy) และโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่สามารถอบชุบได้ (Non Heat-Treatable Alloy)

2.2.1 อะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูป (Wrought Alloys)

กระบวนการผลิตที่จัดว่าอยู่ในกลุ่มที่ใช้แรงขึ้นรูป ได้แก่ การรีดขึ้นรูป (Rolling) การอัดขึ้นรูป (Extrusion) การทุบขึ้นรูป (Forging) เป็นต้น Aluminum Association (AA) ได้แบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูปดังตารางที่ 2.1 โดยตัวเลขที่ใช้ในการระบุอลูมิเนียมแต่ละกลุ่มมีจำนวน 4 หลัก และมีทั้งสิ้น 8 กลุ่มได้แก่ กลุ่ม 1xxx คืออลูมิเนียมบริสุทธิ์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีปริมาณอลูมิเนียมตั้งแต่ 99% กลุ่ม 2xxx ไปจนถึงกลุ่ม 7xxx มีธาตุผสมที่ต่างกัน เรียงตามลำดับดังต่อไปนี้ ทองแดง แมงกานีส ซิลิคอน แมกนีเซียม แมกนีเซียมและซิลิคอน และสังกะสี และธาตุผสมอื่นๆ นอกเหนือจากนี้จัดอยู่ในกลุ่ม 8xxx

ตารางที่ 2.1 เกรดของอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ใช้แรงขึ้นรูป (Wrought Alloys)

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ในเชิงพาณิชย์ (99% min)	1xxx
ทองแดง (ธาตุผสมหลัก)	2xxx
แมงกานีส (ธาตุผสมหลัก)	3xxx
ซิลิคอน (ธาตุผสมหลัก)	4xxx
แมกนีเซียม (ธาตุผสมหลัก)	5xxx
แมกนีเซียมและซิลิคอน (ธาตุผสมหลัก)	6xxx
สังกะสี (ธาตุผสมหลัก)	7xxx
ธาตุอื่นๆ	8xxx
(ไม่มี)	9xxx

2.2.2 อะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป (Casting Alloys)

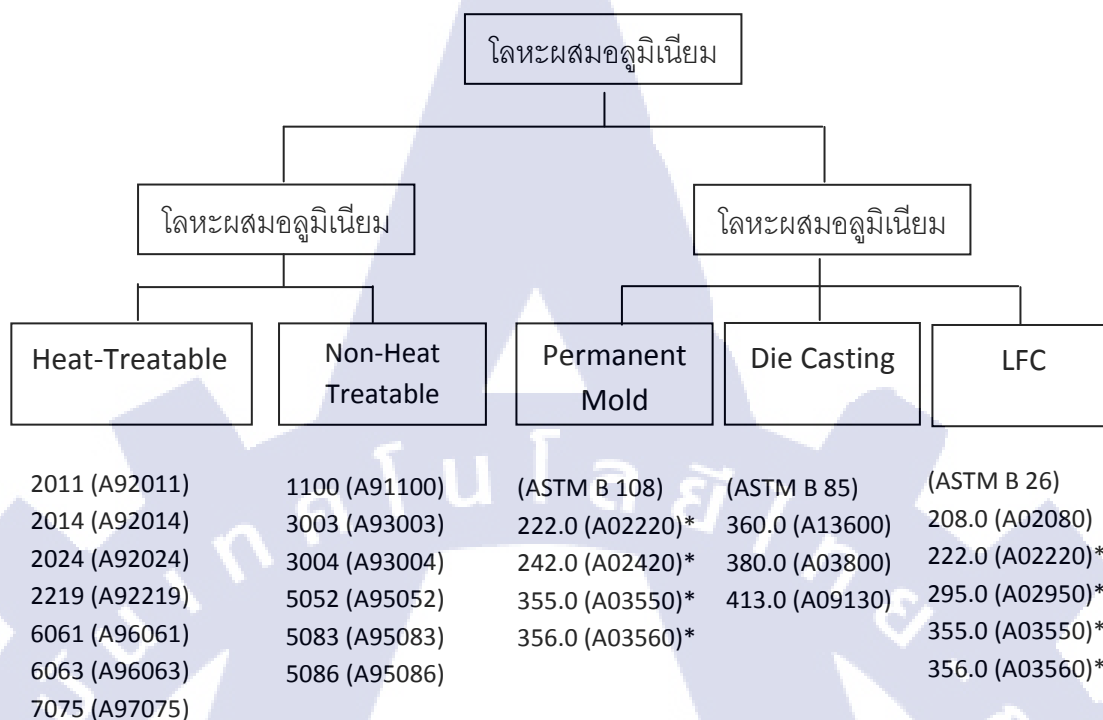
Aluminum Association ได้แบ่งกลุ่มอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยตัวเลขที่ใช้ในการระบุถึงอะลูมิเนียมแต่ละกลุ่มมีจำนวน 4 หลักและมีระบบทศนิยมมีจำนวน 8 กลุ่มประกอบด้วย 1xx.x คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีปริมาณอะลูมิเนียม

ตั้งแต่ 99% ขึ้นไป กลุ่ม 2xx.x ไปจนถึง 5xx.x จะมีธาตุผสมที่แตกต่างกันเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้ ทองแดง ซิลิคอนและทองแดง(และ/หรือแมกนีเซียม) ซิลิคอน แมกนีเซียมตามลำดับ กลุ่ม 7xx.x และ กลุ่ม 8xx.x มีธาตุผสมสังกะสีและดีบุกตามลำดับ และธาตุผสมอื่นๆที่นอกเหนือจากนี้จัดอยู่ในกลุ่ม 9xx.x ที่ตำแหน่งตัวเลขหลักสุดท้ายใช้ระบุรูปแบบของผลิตภัณฑ์ หมายเลข 0 คืองานหล่อขึ้นรูป และ หมายเลข 1 คือผลิตภัณฑ์แบบอินกอต

ตารางที่ 2.2 เกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ (Cast Alloys)

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99% min)	1xx.x
ทองแดง	2xx.x
ซิลิคอนและทองแดง (และ/หรือแมกนีเซียม)	3xx.x
ซิลิคอน	4xx.x
แมกนีเซียม	5xx.x
(ไม่มี)	6xx.x
สังกะสี	7xx.x
ดีบุก	8xx.x
ธาตุอื่นๆ	9xx.x

และจากรูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกประเภทโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป ซึ่งอะลูมิเนียมประเภทใช้แรงขึ้นรูป สามารถจำแนกได้เป็นอะลูมิเนียมที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat-Treatable) ได้แก่ กลุ่ม 2xxx , 6xxx , และ 7xxx และอีกกลุ่มหนึ่งเป็นอะลูมิเนียมที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน (Non Heat-Treatable) ได้แก่ กลุ่ม 1xxx , 3xxx , และ 5xxx สำหรับอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูปสามารถจำแนกตามกรรมวิธีของการหล่อ เช่น หล่อขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) การหล่อขึ้นรูปด้วยดายคาสติง (Die Casting) การหล่อขึ้นรูปในแบบหล่อทราย (Sand Casting) การหล่อขึ้นรูปด้วยเทคนิค Lost Foam Casting (LFC)



*สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการตกตะกอน (Precipitation Hardened)

รูปที่ 2.1 ประเภทของอลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูปและหล่อขึ้นรูป

2.2.3 ธาตุที่มีอิทธิพลต่อโลหะผสมอะลูมิเนียม

ธาตุผสมที่มีอิทธิพลต่อโลหะผสมอะลูมิเนียม แสดงในตารางที่ 2.3 ทั้งนี้เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมหรือสิ่งเจือปน หรือทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติที่ด้อยลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุผสม หากสามารถควบคุมให้มีปริมาณธาตุผสมให้อยู่ในช่วงของค่ากำหนด ก็จะส่งผลดีต่อสมบัติของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของธาตุผสมทางเคมี

เหล็ก (Fe)	ปะปนกับสินแร่ลูมิเนียม ถึงแม้จะมีปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งให้แก่ลูมิเนียมผสมบางเกรด ลดแนวโน้มการเกิดปรากฏการณ์ Hot Cracking ในงานหล่อและจาก Pickup ที่เกิดภายในโพรงของงานตายคาสติง (Die Casting)
แมงกานีส (Mn)	ใช้งานร่วมกับเหล็ก เพื่อปรับปรุงความสามารถในการหล่อขึ้นรูป ทำหน้าที่ปรับสภาพตามธรรมชาติของสารประกอบเมทัลลิก และลดการหดตัวของเนื้อโลหะ ปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength) และความต้านทานต่อการยืดตัว (Ductility)
ซิลิคอน (Si)	ปรับปรุงความสามารถในการหล่อและการเชื่อม และลดแนวโน้มการเกิดจุดบกพร่องจาก Hot Cracking ในงานหล่อ ทำการกัดกลึงได้ยาก หากมีปริมาณเกินกว่า 13% และปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อน
ทองแดง (Cu)	หากมีปริมาณไม่เกิน 12% จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็ง แต่หากผสมมากเกินไป จะทำให้อลูมิเนียมเปราะและมีความแข็งแรงลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติโลหะขณะมีอุณหภูมิสูงและความสามารถในการกัดกลึง ปริมาณเกิน 5% จะลดคุณภาพของการทำผิวเคลือบแข็ง
แมกนีเซียม (Mg)	ปรับปรุงความแข็งแรงโดยการละลายเข้าสู่สารละลายของแข็งและหากผสมมากเกินไปเกินกว่า 3% ความแข็งจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตกตะกอน (Precipitation Hardening) โดยทั่วไปอัลลอยกลุ่มนี้ควบคุมคุณภาพงานหล่อได้ยาก เนื่องจากขึ้นตระกรันปกคลุมผิวโลหะเหลว
สังกะสี (Zn)	ลดความสามารถในการหล่อ หากมีปริมาณมากเกินไป อาจทำให้เกิดจุดบกพร่องจาก hot cracking และเนื้ออลูมิเนียมเกิดการหดตัว เพิ่มแนวโน้มการแตกหักเสียหายจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นหรือ Stress Corrosion Cracking ในกรณีที่มีปริมาณเกิน 10% และเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงในกรณีทำงานร่วมกับธาตุผสมอื่น
โครเมียม (Cr)	ปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าในอลูมิเนียมบางกลุ่ม ใช้ปรับปรุงคุณภาพเกรน (<0.35%)
ไทเทเนียม (Ti)	ปะปนมากับสินแร่ลูมิเนียมตามธรรมชาติหรือเป็นธาตุผสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพเกรนในอลูมิเนียมบางเกรด
ตะกั่ว (Pb)	ธาตุผสมในอลูมิเนียมผสมบางกลุ่ม เพื่อปรับปรุงสมบัติการกัดกลึง

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของธาตุผสมทางเคมี (ต่อ)

บิสมัท (Bi)	ธาตุผสมในอะลูมิเนียมผสมบางกลุ่ม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการกัดกร่อน
เซอร์โคเรียม (Zr)	ใช้ปรับปรุงคุณภาพเกรนสำหรับอะลูมิเนียมกลุ่มอากาศยานในบางเกรด
ลิเทียม (Li)	ธาตุผสมสำหรับขึ้นส่วนอะลูมิเนียมในอากาศยาน เช่น ถังเชื้อเพลิงของกระสวยอวกาศ เพื่อลดน้ำหนักของอากาศยาน โดยต้องควบคุมบรรยากาศในการหล่อขึ้นรูป

2.3 ความเป็นรูพรุน [6]

ในกระบวนการเกิดรูพรุนของวัสดุ จะเกิดขึ้นในกระบวนการหลอมโลหะ เมื่อน้ำโลหะสัมผัสกับอากาศโดยตรงเป็นเวลานาน ซึ่งในอากาศจะประกอบด้วยไอน้ำ ทำให้ก๊าซไฮโดรเจนแทรกซึมเข้าไปในน้ำโลหะ เมื่อน้ำโลหะไปใช้ในการหล่อโลหะ จึงทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อของวัสดุ สามารถอธิบายความเป็นรูพรุนด้วยสมการที่ 1 ดังต่อไปนี้

$$\phi = Vv/VT \quad (2.1)$$

โดยที่

ϕ คือ ความเป็นรูพรุน

Vv คือ ปริมาตรของรูพรุนที่เกิดขึ้น

VT คือ ปริมาตรของวัสดุทั้งหมด

2.3.1 ข้อบกพร่องที่เกิดจากงานหล่อ [7]

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุของการเกิดรูพรุนในวัสดุ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท

2.3.1.1 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage Porosity)

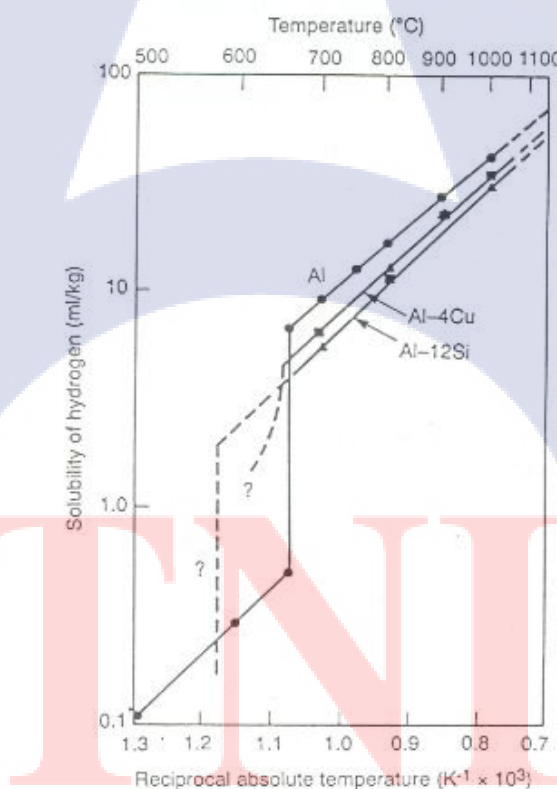
โดยปกติแล้วรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว เกิดจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นในเฟสของแข็งและของเหลวของอัลลอยด์ สำหรับขั้นตอนของการแข็งตัว เฟสที่เป็นของแข็งและของเหลวจะต้องมีความสมดุลกัน เมื่อของเหลวไม่สามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง ของแข็งจะไหลเข้าไปแทนที่ หรือในกรณีที่ไม่มีทั้งของเหลวและของแข็งไหลเข้าไป จะเกิดการหดตัวขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)

2.3.1.2 รูพรุนที่เกิดจากแก๊ส (Gas Porosity)

ปัญหาหลักที่เกิดในโลหะผสม มีดังต่อไปนี้

- 1) ปัญหาจากแก๊สไฮโดรเจน
- 2) ปัญหาการเกิดออกซิเดชันและฟิล์มออกไซด์

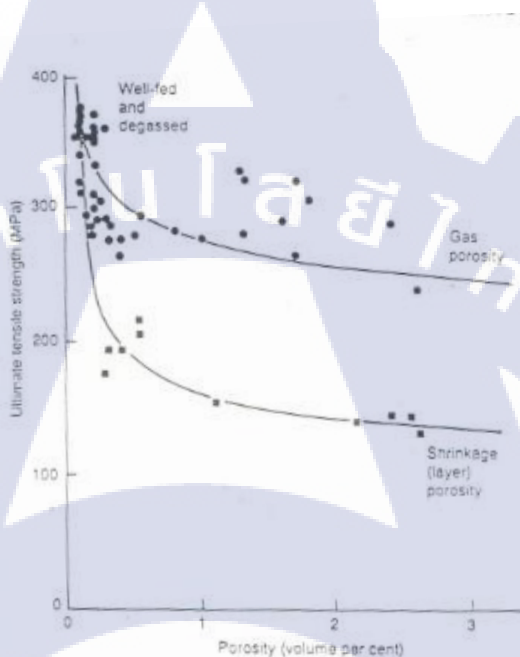
โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถจับแก๊สไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็ว แก๊สไฮโดรเจนเหล่านี้ อาจเกิดจากการแยกตัวของความชื้นในบรรยากาศ เชื้อเพลิง ความชื้นจากวัสดุทนไฟในเตาและเบ้า ความชื้นในฟลักซ์ และจากการปนเปื้อนในวัตถุดิบหรืออุปกรณ์ในการหล่อ ความสามารถในการละลายตัวของไฮโดรเจนในโลหะเหลวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังแสดงรูปในที่ 1 อย่างไรก็ตามการละลายตัวจะต่ำลงอย่างรวดเร็วในขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัว ซึ่งทำให้งานหล่อเกิดโพรงแก๊ส ถ้าไม่มีการลดปริมาณการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนก่อนการเท



รูปที่ 2.2 ความสามารถในการละลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนในโลหะเหลว

การปฏิบัติงานหล่อที่ดีควรมีการลดแก๊สไฮโดรเจนลงให้มากที่สุด โดยการหลีกเลี่ยงอุณหภูมินำโลหะที่สูงเกินไป ซึ่งจะใช้เครื่องมือที่ผ่านการอุ่นและทำให้แห้งแล้วและเศษวัสดุที่สามารถ

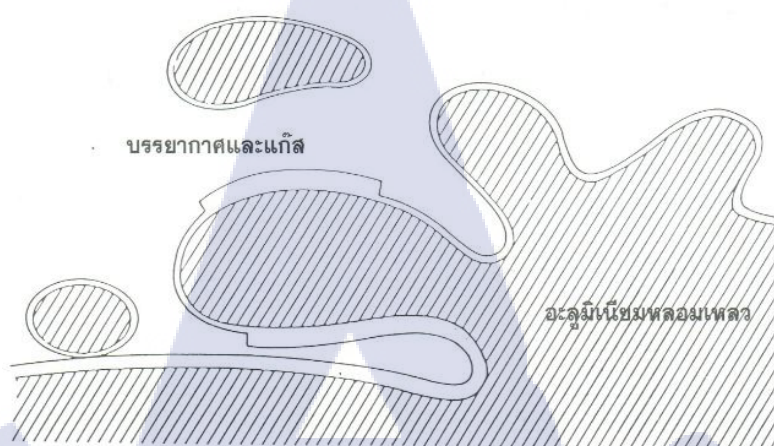
นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ควรหลีกเลี่ยงการเจือปนของน้ำมันในโลหะที่ใส่ลงในเตา (Charge Material) การปฏิบัติดังกล่าวจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนถูกกำจัดออกไป รูปที่ 2.2 เป็นกราฟแสดงความสามารถในการละลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนในโลหะหลอมเหลว เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength: UTS) ที่เกิดจากโพรงแก๊สและโพรงที่เกิดจากการหดตัว ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าโพรงแก๊สจะลดความแข็งแรงดึงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพรงที่เกิดจากการหดตัว



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความแข็งแรงดึง (UTS) ที่เกิดจากโพรงแก๊ส

โพรงแก๊สที่เป็นอันตรายต่อแบบหล่อทรายมากที่สุด ซึ่งจะเกิดฟองบริเวณใต้ชั้นผิว และมีเวลาเพียงพอสำหรับการก่อตัว ทำให้ผิวงานที่ผ่านการกลึงแล้ว เกิดความเสียหายและยังลดความแข็งแรงต่อแรงดึงและลดความทนต่อการแตกจากแรงดัน (Pressure Tightness) สำหรับการหล่อแบบ Gravity Diecasting และการหล่อแบบฉีดเข้าแบบความดันต่ำ (Low Pressure Diecasting) ฟองแก๊สจะมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในภาคตัดที่มีความหนา

โลหะสำหรับงานหล่อที่ต้องใช้ความดัน (Pressure Diecasting) ไม่จำเป็นต้องมีการไล่แก๊ส ฟองแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมากจนแทบไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานหล่อ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการทำความสะอาดโลหะหลอมเหลวในงานหล่อ แบบใช้ความดันและวิธีการไล่แก๊สด้วยวิธีการหมุน (Rotary Degassing) รวมถึงการทำความสะอาดด้วยยาฟลักซ์กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งจะลดปริมาณออกไซด์และสารมลทินในน้ำโลหะได้



รูปที่ 2.4 ลักษณะการจับตัวของก๊าซไฮโดรเจนกับโลหะเหลว

การไหลแบบปั่นป่วนในระหว่างการหลอม การถ่ายเทโลหะ (Metal Transfer) โดยเฉพาะระหว่างการเทน้ำโลหะเข้าแบบหล่อ จะเกิดการ “พับทบ” (Folded Over) ของรอยดำหนิ ออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติทางกลของงานหล่ออลูมิเนียมลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ในความเป็นจริงแท่งอลูมิเนียม (Aluminium Ingot) สำหรับงานหล่อ จะเต็มไปด้วยออกไซด์ฟิล์มที่ทับกันระหว่างการเท Ingot ออกไซด์ยังไม่ถูกแยกออก แต่จะคงอยู่ในน้ำโลหะและไหลไปพร้อมกับน้ำโลหะ เข้าไปในช่องว่างภายในแบบหล่อและรวมกับออกไซด์ที่เกิดขึ้นในขณะเทงานหล่อที่ได้จะเต็มไปด้วยฟิล์มออกไซด์ที่ทับกันภายในและแนวของฟองแก๊ส เปรียบเสมือนเกิดรอยแตกขนาดเล็ก ซึ่งมีผลทำให้เกิดความไม่แน่นอนในงานหล่อ วิธีการเทจากด้านล่าง (Non-Turbulent Bottom Filling of Molds) และการใช้ตัวกรองที่ทำมาจากเซรามิกสีในระบบทางวิ่ง จะช่วยแก้ปัญหาสมบัติทางกลและความแข็งแรงในการรับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

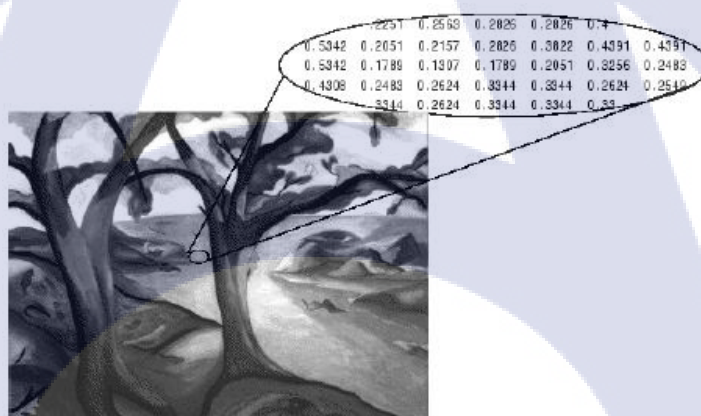
ในการลดการเกิดและผลกระทบจากออกไซด์ฟิล์ม ได้มีการพัฒนาการใช้ฟลักซ์ปกคลุมและฟลักซ์บำบัดโดยผู้ผลิตหลายราย เพื่อป้องกันและทำความสะอาดน้ำอลูมิเนียมผสม โดยอลูมิเนียมผสมจะถูกหลอมเหลวภายใต้ฟลักซ์ที่ปกคลุมหรือแก๊สเฉื่อย ร่วมกับการเลือกใช้เฉพาะวัตถุดิบที่สะอาดและหลีกเลี่ยงอุปกรณ์และวัสดุทนความร้อนที่มีความชื้น จะทำให้น้ำโลหะสัมผัสกับอากาศและเกิดออกไซด์ขึ้นได้น้อยที่สุด ฟลักซ์ที่ใช้เกือบทั้งหมดเป็นชนิดเกลือเฮไลด์ (Halide Salt) และฟลักซ์บำบัดสามารถนำมาใช้กับการกำจัดออกไซด์ที่มีการตักขี้อโลหะออกและใช้สำหรับการกำจัดร่วมกับมลทินอื่นๆ และเพื่อควบคุมโครงสร้างจุลภาค เช่น การปรับปรุงความละเอียดของเกรนออกไซด์ในอลูมิเนียมผสม ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับอลูมิเนียมเหลว จึงไม่ลอยตัวแยกขึ้นมา การใส่ฟลักซ์พร้อมกับทำการกวน จะทำให้ฟลักซ์สัมผัสกับออกไซด์และกำจัดออกไซด์ได้ดี

2.4 การประมวลผลภาพ (Image Processing) [8]

2.4.1 ประเภทของภาพ

1. ภาพระดับความเข้มเทา (Intensity Image or Gray Scale Image)

ลักษณะของภาพชนิดนี้ ในแต่ละพิกเซลจะมีค่าความเข้มแสงในระดับที่แตกต่างกัน ตั้งแต่เทาดำไปจนถึงระดับสีขาว ซึ่งสามารถกำหนดความเข้มแสงได้ โดยใช้ค่าระดับความเข้มเทา จะมีค่าระดับความเข้มเทา 8 บิต และจะถูกแบ่งออกเป็น 256 ระดับ เมื่อค่าระดับความเข้มเทาเท่ากับ 0 (00000000) หมายความว่า พิกเซลนั้นมีค่าความเข้มแสงต่ำ จะทำให้ภาพเป็นสีดำ ในทางกลับกัน หากค่าระดับความเข้มเทา เท่ากับ 255 (11111111) หมายความว่า จุดภาพนั้นมีค่าความเข้มแสงสูง จะทำให้ภาพเป็นสีขาว สำหรับค่าที่อยู่ระหว่าง 0-255 จะมีค่าเฉลี่ยไล่ไปเรื่อยๆ จากสีดำจนถึงสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพระดับความเข้มเทาและการแสดงค่าพิกเซล

2. ภาพสี (Color Image)

ภาพชนิดนี้ในแต่ละจุดภาพ จะเก็บค่าระดับความเข้มเทาของแต่ละแถบแสงของแม่สี ทั้ง 3 สี ที่ซ้อนกันอยู่ นั่นคือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งในแต่ละจุดภาพหรือพิกเซล จะแสดงผลค่าสีของแต่ละพิกเซลตามระดับความเข้มในแต่ละแถบแสงสี ดังแสดงในรูปที่ 2.6

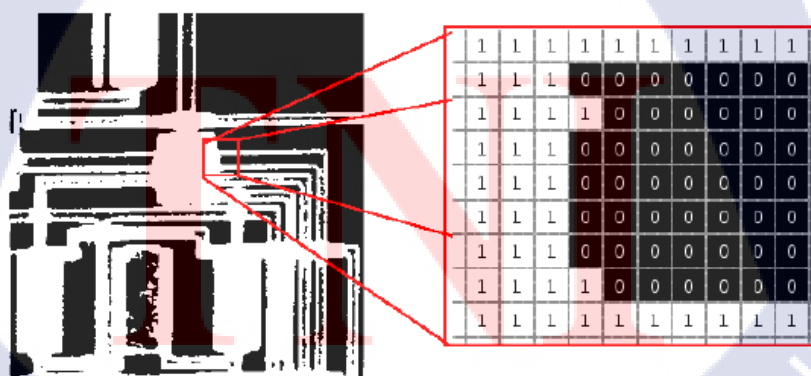
0.2235	0.1294	Blue	0.4196
0.5804	0.2902	0.0627	0.2902
0.5804	0.0627	0.0627	0.2235
0.5176	0.1922	0.0627	Green
0.5176	0.1294	0.1608	0.1294
0.5176	0.1608	0.0627	0.1608
0.5460	0.2235	0.5460	Red
0.5460	0.3882	0.5176	0.5804
0.5460	0.2588	0.2902	0.2588
0.2235	0.1608	0.2500	0.2500
0.2588	0.1608	0.2588	0.2588



รูปที่ 2.6 ภาพสีและการแสดงค่าพิกเซล

3. ภาพไบนารี (Binary Image)

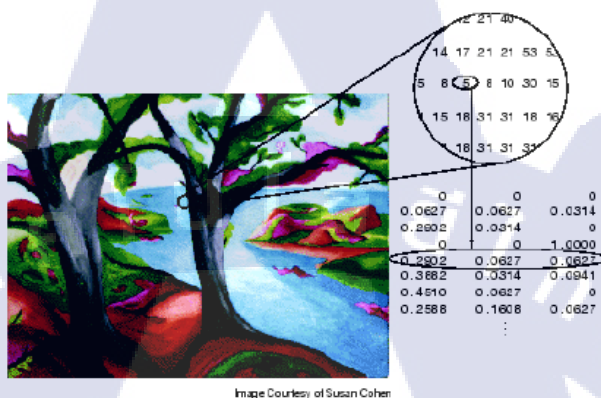
ภาพไบนารีจะแสดงลักษณะของข้อมูลภาพในรูปแบบขาวดำ กล่าวคือในแต่ละพิกเซลของภาพจะถูกแสดงค่าแบบไบนารี คือ 1 บิต ซึ่งจะประกอบด้วย 1 หมายถึงจุดสีขาวและ 0 หมายถึงจุดสีดำ ภาพประเภทนี้เหมาะสำหรับภาพที่เกี่ยวข้องกับตัวอักษร ภาพลายนิ้วมือ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาพไบนารีและการแสดงค่าพิกเซล

4. ภาพแบบดัชนี (Index Image)

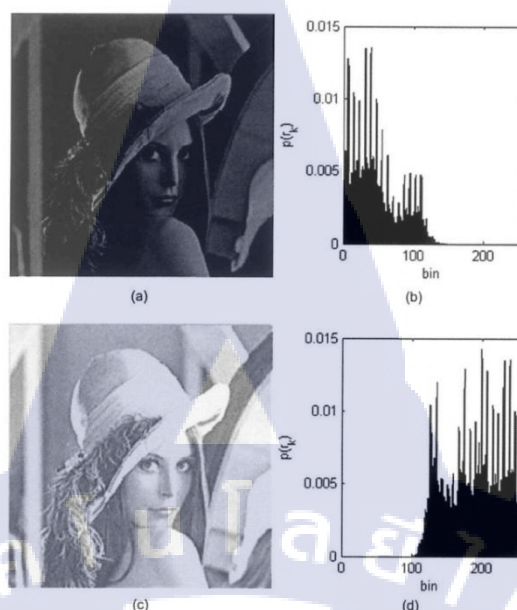
ในแต่ละพิกเซลของภาพ จะเก็บค่าดัชนี (Index Number) ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม ดังรูปที่ 2.8 โดยค่าเหล่านี้จะถูกนำไปเทียบกับตารางสี (Color Table) ตารางสีประกอบด้วย ค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงภาพในแต่ละตำแหน่งพิกเซล มีค่าอัตราส่วนแม่สี ในอัตราส่วนละเท่าไร



รูปที่ 2.8 ภาพดัชนีและการแสดงค่าพิกเซล

2.4.2 ฮิสโตแกรม (Histogram)

คือ กราฟเส้นที่แสดงจำนวนพิกเซลทั้งหมดของข้อมูลภาพตามค่าระดับความเข้มเทาที่ปรากฏหรือแสดงอยู่บนภาพดิจิทัลใดๆ โดยค่าการกระจายของข้อมูลภาพจะเรียงจากค่าระดับความเข้มเทา ตั้งแต่ระดับต่ำที่สุดไปจนถึงระดับสูงที่สุด เมื่อพิจารณาฮิสโตแกรมของภาพ ทำให้เราสามารถแยกแยะประเภทและทราบถึงรายละเอียดของภาพนั้นๆได้



รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบฮิสโตแกรมของภาพที่ระดับความเข้มเทาต่างกัน

จากรูปที่ 2.9 ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับความเข้มเทาและลักษณะของฮิสโตแกรมที่เกิดขึ้นของภาพทั้งสอง กล่าวคือ จากภาพด้านบนเป็นภาพที่มีลักษณะสีเข้มและมีด ฮิสโตแกรมของภาพจะไปรวมกลุ่มกันในบริเวณที่มีระดับความเข้มเทาดำ ขณะเดียวกันภาพด้านล่างที่สว่าง ฮิสโตแกรมจะรวมกลุ่มกันในบริเวณที่มีระดับความเข้มเทาที่สูง

2.4.3 การปรับภาพให้เรียบ (Image Smoothing)

การปรับภาพเรียบ เป็นเทคนิคที่ใช้ตัวกรองสัญญาณภาพ ทำให้ภาพเกิดความเรียบ นุ่มนวลขึ้น ตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) จะใช้กรองสัญญาณภาพที่บริเวณความถี่ต่ำผ่านได้ ส่วนบริเวณที่มีความถี่สูงกว่า จะกำหนดให้มาร์คเป็นตัวกรองให้สัญญาณภาพต่ำ ตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่านที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ตัวกรองความถี่ต่ำแบบค่าเฉลี่ย (Moving Average Filter)

เป็นการนำเอาค่าระดับความเข้มเทาของจุดภาพบริเวณข้างเคียงของจุดภาพที่ต้องการนำมาประมวลผล มาหาค่าเฉลี่ย ผลลัพธ์ของค่าเฉลี่ยที่ได้จะนำไปแทนค่าระดับความเข้มเทาเดิมของจุดภาพนั้นๆ นิยมใช้มาร์คตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย 3×3 หรือ 5×5 เป็นกระบวนการปรับภาพให้เรียบ ในลักษณะที่เป็นบริเวณ (Local Image Processing)

2. ตัวกรองแบบเกาส์เซียน (Gaussian Filter)

ตัวกรองแบบเกาส์เซียน จัดเป็นตัวกรองประเภทตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งมาร์คของเกาส์เซียน จะนิยมใช้มากกว่าแบบค่าเฉลี่ย เนื่องจากภาพต้นแบบจะได้รับผลกระทบจากการพรมัวน้อยกว่า

2.4.4 การทำให้ภาพคมชัด (Image Sharpening)

จุดประสงค์ของการทำให้ภาพคมชัด คือการเน้นขอบของภาพ (Edge Enhancement) เพื่อปรับเพิ่มรายละเอียดของภาพที่มีลักษณะพรมัวให้มีความคมชัดมากยิ่งขึ้น โดยทำให้จุดภาพตรงรอยต่อระหว่างบริเวณจุดของภาพที่มีค่าระดับความเข้มเทาใกล้เคียงกันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลง โดยทั่วไปขอบของภาพจะเป็นเส้นหรือโครงร่างที่ใช้ในการแยกระหว่างวัตถุและพื้นหลัง

2.4.5 การลดสัญญาณรบกวนของภาพ (Image Noise Reduction)

รูปภาพดิจิทัลที่ใช้งานจริง บางครั้งภาพต้นฉบับที่จัดเก็บ อาจจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) ปรากฏทับซ้อนบนค่าระดับความเข้มเทาของจุดภาพ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการประมวลผลภาพที่จะนำมาใช้งานในการลดสัญญาณรบกวนของภาพ โดยทั่วไปแล้วสัญญาณรบกวน คือ ข้อมูลภาพในช่วงความถี่สูง ดังนั้นในการขจัดสัญญาณรบกวน เราสามารถใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filtering) มาทำการลดหรือขจัดสัญญาณรบกวนของภาพได้ วิธีการลดสัญญาณรบกวนของภาพที่นิยมใช้ มีอยู่ 2 วิธีคือ

2.4.5.1 การลดสัญญาณภาพที่เป็นเชิงเส้น

วัตถุประสงค์ของการขจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ คือ การกำจัดสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นสัญญาณประเภทความถี่สูง ด้วยเหตุนี้จึงต้องอาศัยหลักการเฉลี่ยค่าความเข้มแสงเฉพาะบริเวณหรือการกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filtering) ผลลัพธ์ที่ได้หลังการกรองสัญญาณรบกวน จะทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นลดลง และภาพผลลัพธ์ที่ได้จะมีความเรียบ (Smooth) หรือในบางกรณีอาจจะทำให้ภาพผลลัพธ์พรมัวหรือมีความคมชัดน้อยลง (Blurring Effect) ด้วยเหตุนี้การกำจัดสัญญาณรบกวนจึงมุ่งเน้นที่การขจัดสัญญาณรบกวนเพียงอย่างเดียว โดยไม่ให้กระทบต่อขอบของวัตถุภายในภาพ มาร์ค (Mask) ที่ใช้ในการขจัดสัญญาณรบกวนจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองทุกตำแหน่งเป็นบวกทั้งหมด และผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ภายในมาร์คจะเท่ากับ 1

2.4.5.2 การลดสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ในบางกรณี สัญญาณรบกวนไม่สามารถที่จะใช้ตัวกรองหรือฟิลเตอร์แบบเชิงเส้น (Linear Filtering) ในการจัดสัญญาณรบกวนออกได้ ยกตัวอย่างเช่น Salt and Pepper Noise ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการกรองสัญญาณที่แตกต่างออกไปจากประเภทแรก นั่นคือ ตัวกรองหรือฟิลเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Filtering)

2.4.6 การแยกส่วนของภาพ (Image Segmentation)

การแยกส่วนของภาพ เป็นเทคนิคหรือวิธีการประมวลผลภาพที่มีวัตถุประสงค์ในการแยกวัตถุ (Object) หรือจุดที่สนใจ (Feature) ในภาพออกจากพื้นหลัง (Background) วิธีการพื้นฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการแยกวัตถุหรือลักษณะเด่นของภาพ มีอยู่ 2 วิธี คือ

2.4.6.1 การหาขอบภาพ (Edge Detection)

คือ ส่วนของข้อมูลที่แสดงถึงโครงสร้างของวัตถุภายในภาพ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของภาพที่มีความสำคัญและมีประโยชน์ในการวิเคราะห์สำหรับงานด้านต่างๆ หลักการของการหาขอบของวัตถุภายในภาพ อาจกล่าวได้ว่าเป็นการสร้างการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับความเข้มเทาแบบทันทีทันใด หรือจากค่าระดับความเข้มเทาในระดับต่ำเป็นค่าระดับสูง หรือในทางกลับกันค่าระดับความเข้มเทาจะสูงไปเป็นค่าระดับต่ำ (Step Edge) หรืออาจจะเกิดขึ้นในอีกลักษณะหนึ่ง คือ การเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มเทาที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละเล็กละน้อย (Ramp Edge)

วิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าไม่ต่อเนื่องหรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับความเข้มเทาในบริเวณใกล้เคียง คือการหาอนุพันธ์ของภาพ ผลลัพธ์ของค่าอนุพันธ์จะมีค่าเท่ากับ 0 ต่อเมื่อระดับความเข้มเทาของภาพต้นแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจะมีค่าไม่เท่ากับ 0 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มเทา

2.4.6.2 เทคนิคการทำเทรชโฮลด์ (Threshold)

เป็นวิธีการประมวลผลภาพอย่างง่าย เพื่อที่จะแบ่งแยกส่วนพื้นหน้าหรือวัตถุกับพื้นหลังออกจากกัน โดยใช้ค่าระดับเทรชโฮลด์ (T) เป็นตัวกำหนดในการแยกแยะส่วนของภาพ เพื่อให้ภาพผลลัพธ์ที่ได้เป็นภาพไบนารี ที่มีค่าระดับความเข้มเทาเพียงสองค่าเท่านั้น คือ ขาวและดำ ในการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ถ้ามีค่ามากหรือน้อยเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ในรายละเอียดของภาพหรืออาจจะเกิดสัญญาณรบกวนขึ้น ในปัจจุบันมีวิธีการที่ใช้ในการหาค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขของภาพต้นแบบและวิธีการออกแบบ

2.4.7 การประมวลผลภาพด้วยมอร์โฟโลยี (Morphological Image Processing)

มอร์โฟโลยี จัดเป็นคณิตศาสตร์แขนงหนึ่งที่อยู่ในพีชคณิต ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการประมวลผลภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือโครงสร้างของภาพ ถูกคิดค้นครั้งแรกโดย Hadwiger

เทคนิค Hit และ Miss ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับตัวดำเนินการ เพื่อกำหนดเทมเพลต (Template) ที่มีขนาดเล็กและมาจำนวนที่ ปกติจะมีค่าเท่ากับ 3×3 นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลภาพ โดยจะเปรียบเทียบตลอดทั้งภาพ ตั้งแต่ต้นภาพจนถึงท้ายภาพ ถ้าข้อมูลของภาพมีลักษณะเหมือนกับเมตริกดังกล่าว เอาพุที่ได้จะขึ้นอยู่กับพิกเซลที่เป็นศูนย์กลางของเมตริกซึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นค่าตามที่ต้องการ (1 หรือ 0) แต่ถ้าข้อมูลในเมตริกไม่เหมือนกับข้อมูลภาพข้อมูลเอาพุที่ได้จะมีค่าตรงกันข้าม

ตัวดำเนินการพื้นฐานของมอร์โฟโลยี ได้แก่

1. การขยายภาพ (Dilation)
2. การย่อภาพ (Erosion)

ความแตกต่างระหว่างตัวดำเนินการทั้งสอง กล่าวคือ การขยายภาพ เป็นการเพิ่มพิกเซลเข้าไปยังบริเวณขอบของวัตถุภายในภาพ ขณะที่การย่อภาพเป็นการกำจัดพิกเซลออกจากขอบของภาพ

2.5 วิธีการเตรียมชิ้นงาน

2.5.1 การขัดหยาบและละเอียด

ตัวอย่างเมื่อผ่านการขัดหยาบมาแล้ว จะถูกขัดด้วยผงขัด เพื่อให้ผิวเรียบปราศจากรอยขีดข่วน เป็นเงา ผงขัดที่ใช้ต้องเหมาะสมกับผ้าขัดและชนิดตัวอย่างที่จะขัด ปริมาณของผงขัดที่ใช้ ขึ้นอยู่กับความแข็งของชิ้นงาน เพราะผงขัดจะทำให้ตัวอย่างสึกเร็วกว่า การใช้สารหล่อลื่นเพื่อช่วยในการขัด จะใช้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ วัสดุอ่อนควรใช้สารหล่อลื่นปริมาณมาก เพื่อป้องกันการเสียหายของผิวชิ้นงานและใช้ผงขัดสึกหรอน้อย สำหรับวัสดุแข็ง จะใช้สารหล่อลื่นน้อยแต่ใช้ผงขัดปริมาณมาก เนื่องจากมีการสึกหรอของผงขัดเร็ว การใช้ความเร็วรอบในการขัดสูงเกินไป จะทำให้สิ้นเปลืองผงขัดและสารหล่อลื่น เพราะสารเหล่านี้จะถูกเหวี่ยงหลุดจากงานขัด

ชนิดของผงขัดที่ใช้ทั่วไป ได้แก่

- 1) ผงขัดอลูมินาหรืออลูมิเนียมออกไซด์ มีทั้งชนิดผงหรือผสมมาในรูปของยาสีฟันหรือเป็นชนิดสารแขวนลอย (Suspension) นิยมนำไปขัดละเอียดโลหะเหล็ก
- 2) ผงขัดแมกนีเซียมหรือแมกนีเซียมออกไซด์ เหมาะสำหรับการขัดอลูมิเนียมและโลหะแมกนีเซียมผสม
- 3) ผงโครเมียมออกไซด์ ใช้ขัดเหล็ก

4) ผงเพชร มีราคาสูงมาก แต่ประสิทธิภาพในการขัดสูง ได้ระนาบดี ทำให้ลดเวลาในการขัดลง สามารถนำไปขัดกับวัสดุได้ทุกชนิด

2.5.2 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา

โลหะประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุต่างๆที่ผสมอยู่ภายในโลหะนั้นๆ สภาพของโลหะซึ่งหมายรวมถึงสมบัติและพฤติกรรมในด้านต่างๆ ที่เราตรวจวัดหรือสัมผัสได้ในระดับขนาดที่พบเห็น โดยไม่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจ ซึ่งเป็นระดับที่เรานำโลหะมาใช้ในทางวิศวกรรม เป็นผลมาจากรายละเอียดของการประกอบกันของโครงสร้างในระดับดังกล่าว จัดเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในการทำงานด้านโลหะวิทยา การได้มาซึ่งสมบัติที่เหมาะสมตามความต้องการ ต้องอาศัยกระบวนการขึ้นรูปโลหะและการควบคุมส่วนผสมทางเคมี เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาที่เหมาะสม รวมถึงการยืนยันความถูกต้องและกระบวนการตรวจสอบหาความบกพร่องหรือความผิดปกติของโครงสร้างจุลภาค

ช่วงของรายละเอียดในโครงสร้างจุลภาคของโลหะจะตกอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1 ไมโครเมตร จนถึง 1 มิลลิเมตร ขนาดของช่วงดังกล่าวเล็กเกินกว่าความสามารถของสายตามนุษย์ อุปกรณ์สำคัญสำหรับการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ก็คือกล้องจุลทรรศน์ ในปัจจุบันมีอยู่สองชนิดที่ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่

- 1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา (Optical Microscope)
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)

2.5.3 การถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์

ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ เรียกว่า ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (Photomicrograph) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดและข้อมูลโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคมีความสำคัญมาก ในแง่ของการจัดเก็บประวัติข้อมูลและในด้านการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเชิงปริมาณ (Quantitative Metallography)

ภาพที่ปรากฏบนจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์ไม่ได้เป็นภาพจริงที่เกิดจากแสง แต่เป็นการสร้างภาพขึ้นมาจากสีและความสว่างที่เซลล์รับแสงในกล้องจับได้และส่งสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ ดังนั้นกำลังขยายของภาพที่ปรากฏนั้น จึงไม่สามารถที่จะนำไปคำนวณได้จากการคูณกำลังขยายเลนส์วัตถุกับกำลังขยายเลนส์ใกล้ตาเหมือนอย่างภาพที่เห็นในกล้องจุลทรรศน์ ก่อนการใช้งานในครั้งแรก จึงต้องมีการสอบเทียบกำลังขยายโดยใช้กระจกสเกลไมโครมิเตอร์

2.6 สหสัมพันธ์ (Correlation) [9]

2.6.1. สหสัมพันธ์ (Correlation)

เป็นการศึกษาตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวขึ้นไป (หรือข้อมูล 2 ชุดขึ้นไป) ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีมากหรือน้อยนั้น จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เป็นค่าที่วัดความสัมพันธ์ ซึ่งมีวิธีการทางสถิติอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวแปรหรือระดับของการวัดในตัวแปรนั้นๆ การวัดความสัมพันธ์นั้นจะต้องมีการทดสอบนัยสำคัญ จึงจะสรุปได้ว่าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์กันจริงหรือไม่และมากหรือน้อยเพียงใด

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะใช้สัญลักษณ์ r แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งกลุ่มตัวอย่างและ ρ แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้วัดขนาดของความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร มี 2 ลักษณะ กล่าวคือ $-1 \leq r \leq 1$ และ $0 \leq r \leq 1$

การบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 จะแสดงถึงการมีความสัมพันธ์ในระดับสูง แต่หากเข้าใกล้ 0 แสดงว่าการมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อยหรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อาจใช้เกณฑ์ดังต่อไปนี้

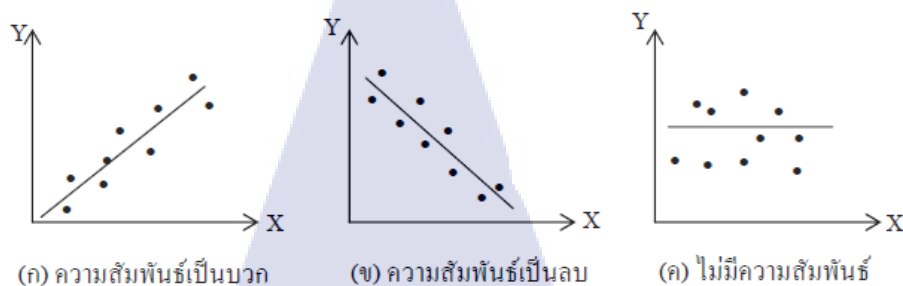
ตารางที่ 2.4 ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร

ค่า r	ระดับความสัมพันธ์
.90 – 1.00	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
.70 – .90	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
.50 – .70	มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง
.30 – .50	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ
.00 – .30	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก

เครื่องหมาย $+$, $-$ หน้าตัวเลขสัมประสิทธิ์ จะบ่งบอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังต่อไปนี้

r มีเครื่องหมายเป็น $+$ หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ตัวแปรหนึ่งมีค่าสูง อีกตัวแปรหนึ่งจะมีค่าสูงไปด้วย

r มีเครื่องหมายเป็น $-$ หมายถึง การมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ตัวแปรหนึ่งมีค่าสูง ตัวแปรอีกตัวหนึ่งจะมีค่าต่ำ



รูปที่ 2.10 ทิศทางของความสัมพันธ์ของตัวแปร

ยกเว้นเพียงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางประเภท ที่มีลักษณะ $0 \leq r \leq 1$ จะบอกได้เพียงขนาดหรือระดับของความสัมพันธ์ แต่ไม่สามารถบอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์ได้

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เหมาะสมกับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณหาพบว่าค่า $r=0$ อาจไม่ถูกต้อง หากจะตีความว่าไม่มีความสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว แต่อาจเป็นไปได้ว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์ในลักษณะอื่นที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น

2.6.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Product-Moment Correlation Coefficient)

จะใช้สัญลักษณ์ r_{xy} เป็นวิธีที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหรือข้อมูล 2 ชุด โดยที่ตัวแปรหรือข้อมูลนั้น จะต้องอยู่ในรูปของมาตราอันดับหรืออัตราส่วน (Interval or Ratio Scale) ที่มีการแจกแจงแบบปกติ มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น และต้องเป็นอิสระต่อกัน

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

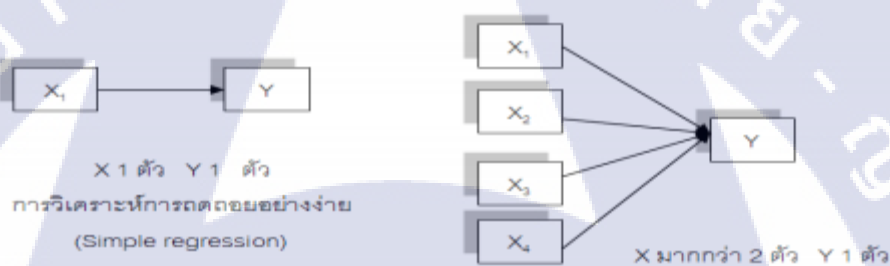
$$r_{xy} = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

โดยที่ r_{xy}	คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน
$\sum x$	คือผลรวมของข้อมูลที่วัดได้ จากตัวแปรตัวที่ 1 (X)
$\sum y$	คือผลรวมของข้อมูลที่วัดได้จากตัวแปรตัวที่ 2 (Y)
$\sum xy$	คือผลรวมของผลคูณระหว่างตัวแปรที่ 1 และ 2
$\sum x^2$	คือผลรวมของกำลังของข้อมูลที่วัดได้จากตัวแปรที่ 1

$\sum y^2$ คือผลรวมของกำลังของข้อมูลที่วัดได้จากตัวแปรที่ 2
 N คือขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

2.7 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) หรือตัวแปรเกณฑ์ (Criterion Variable) 1 ตัว และตัวแปรอิสระ (X) หรือตัวแปรทำนาย (Predictor Variable) ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติที่อาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรมาใช้ในการทำนาย โดยเมื่อทราบค่าตัวแปรหนึ่ง ก็จะสามารถทำนายค่าของอีกตัวแปรหนึ่งได้ ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ จะอยู่ในรูปของสมการทำนาย สิ่งที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณคือ สมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ



รูปที่ 2.11 รูปแบบการวิเคราะห์การถดถอย

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ คือสร้างสมการพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ ด้วยกลุ่มตัวแปรพยากรณ์ โดยตัวแปรเกณฑ์และตัวแปรพยากรณ์จะอยู่ในรูปของมาตราอันตรภาคชั้น (Interval Scale) หรือ อัตราส่วน (Ratio Scale) ในกรณีที่ตัวแปรพยากรณ์ไม่อยู่ในรูปของอัตราส่วน ให้แปลงข้อมูลเป็นตัวแปรหุ่น (Dummy Variable) ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

สำหรับวิธีการดำเนินโครงการ ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ประกอบด้วย

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง
2. ขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์
3. ขั้นตอนทวนสอบผลการทดลอง
4. ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆและธาตุผสมทางเคมี

3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

3.1.1 ชิ้นงานตัวอย่าง

ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดลองได้รับการสนับสนุนจากบริษัท Daiki Aluminium (Thailand) Co.,Ltd เกรดของอะลูมิเนียมหล่ออัลลอยด์และเปอร์เซ็นต์ของธาตุผสมที่เติม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุ ได้แสดงในภาคผนวก ก.

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยการขัด

ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัด ถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก และอาจส่งผลกระทบต่อขั้นตอนถัดไป นั่นคือ การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์และการประมวลผลภาพ รอยขีดข่วนสิ่งแปลกปลอมบนผิวชิ้นงาน อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการประมาณค่าความพรุน

สำหรับขั้นตอนในการขัดชิ้นงานตัวอย่าง จะเริ่มต้นจากการขัดด้วยกระดาษทราย ขึ้นหยาบไปจนถึงชั้นละเอียด ตั้งแต่เบอร์ 400 – 1500 จากนั้นขัดมันด้วยผงขัดอลูมินาอีกครั้ง เพื่อให้ผิวชิ้นงานเกิดความมันวาว



รูปที่ 3.1 เครื่องขัดชิ้นงาน (หยาบ)



รูปที่ 3.2 เครื่องขัดชิ้นงาน (ละเอียด)

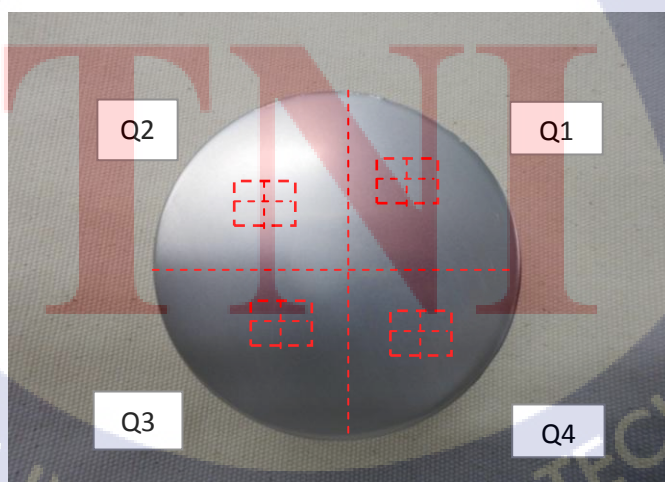
3.1.3 การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการถ่ายภาพเป็น กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHS-2000 เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงสะท้อนแบบหงาย ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและขนาดกลางแทนวางชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวซ้าย-ขวาและเข้า-ออก (X-Y Stage)



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์ Keyence VHS-2000

เมื่อผิวของชิ้นงานตัวอย่างผ่านกระบวนการขัดละเอียดและขัดเงาแล้ว ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยแบ่งชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆกัน ภายในแต่ละส่วนจะถูกกำหนดบริเวณที่สนใจ เพื่อทำการถ่ายเป็นภาพต้นแบบ ลักษณะของกริด (Grid) ขนาด 2x2 มิลลิเมตร ส่วนที่เป็นจุดตัดระหว่างเส้นกริดแต่ละเส้น จะเป็นจุดที่สนใจและถูกถ่ายภาพ จุดตัดที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นกริด รวมทั้งสิ้น 9 ภาพต่อหนึ่งส่วนของชิ้นงาน รวมทั้งสิ้น 36 ภาพ จาก 4 ส่วนภายในชิ้นงาน โดยภาพต้นแบบจะมีขนาด 1600x1200 หรือ 315 KB โดยประมาณ เป็นไฟล์ภาพ JPEG ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 เป็นภาพชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในส่วน Q1 จุดที่ 1-1 ของอลูมิเนียมอัลลอยด์ตัวอย่างเกรด AC9A.1



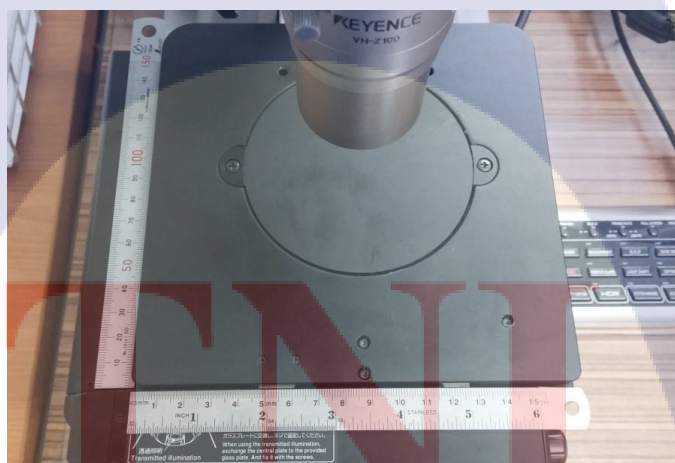
รูปที่ 3.4 การกำหนดบริเวณที่สนใจ โดยใช้วิธีตีกริด ขนาด 2x2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 ภาพตัวอย่างที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ Quadrant 1 จุดตำแหน่งที่ 1-1

3.1.4 วิธีการเซตตำแหน่งกริด จากกล้องจุลทรรศน์

ขั้นตอนในการเซตตำแหน่งของกริด จะนำไม้บรรทัดที่มีสเกลชัดเจนมาติดตั้งบนแท่นของกล้องจุลทรรศน์ในส่วนที่อยู่กับที่ โดยตำแหน่งของกริดแต่ละจุด จะถูกเทียบกับส่วนของแท่นที่เคลื่อนที่ ทั้งในแนวแกน X และ แกน Y เพื่อให้ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของกริดแต่ละจุด ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเซตตำแหน่งของกริด จากกล้องจุลทรรศน์ ในแนวแกน X และ แกน Y

3.2 ขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์

ภาพต้นแบบที่ได้จากการถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ในแต่ละพื้นที่ ที่ถูกระบุไว้ด้วยจุดตัดระหว่างเส้นกริด รวม 36 ภาพต่อชิ้นงานตัวอย่าง จะถูกนำมาประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยมีลำดับขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

3.2.1 ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณหาความพรุนในชิ้นงานอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ จะประกอบด้วย พื้นที่ของรูพรุนที่ถูกตรวจจับได้ในแต่ละภาพต้นแบบและพื้นที่ของภาพทั้งหมด จำนวนทั้งหมด 36 ข้อมูล

3.2.2 นำข้อมูลทั้ง 36 ข้อมูล มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Average)

3.3.3 ค่าเฉลี่ยรวมของพื้นที่รูพรุนที่ถูกตรวจจับได้และพื้นที่ของภาพทั้งหมด จะถูกนำมาคำนวณหาพื้นที่ความพรุนรวมที่เกิดขึ้นภายในภาพต้นแบบทั้งหมด

3.3 ขั้นตอนการทวนสอบผลการทดลอง

ขั้นตอนการทวนสอบผลการทดลอง ได้นำภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้ส่งต่อให้กับสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ซอฟแวร์ที่ใช้เป็นของบริษัท Carl Zeiss Microscopy GmbH ประเทศเยอรมนี ซึ่งมีความสามารถในการประมาณค่าความพรุนด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพแบบ 2D ที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือได้ โดยค่าเฉลี่ยความพรุนในแต่ละภาพต้นแบบของอะลูมิเนียมอัลลอยด์แต่ละเกรดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความพรุนจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาและหาค่าความผิดพลาด สมการคำนวณค่าความผิดพลาด ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{\%Aver. Porosity (ISIT) - \%Aver. Porosity (developed Software)}{\%Aver. Porosity (ISIT)} \times 100 \quad (3.1)$$

3.4 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆและธาตุผสมทางเคมี

สำหรับขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆกับธาตุผสมทางเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ (K) ที่เหมาะสม และนำไปใช้สำหรับการประมวลผลภาพตามรูปร่างลักษณะ (Morphology) เทคนิคการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้น จะใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation Analysis) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม SPSS

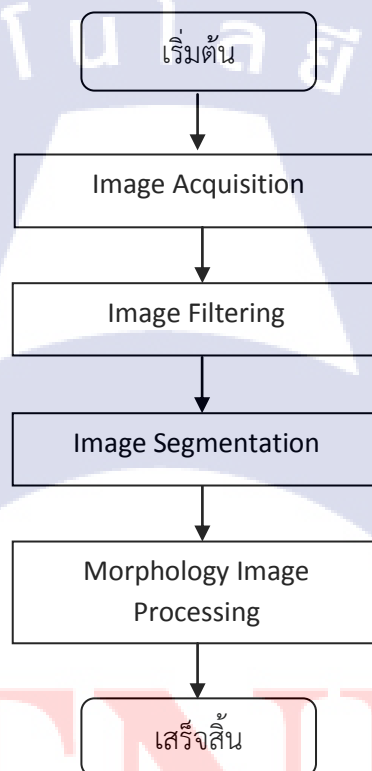
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การพัฒนาซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ

ภาพต้นแบบที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะถูกนำมาประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม MATLAB – Image Processing Toolbox โดยกระบวนการประมวลผลภาพ แสดงดังรูปที่ 4.1

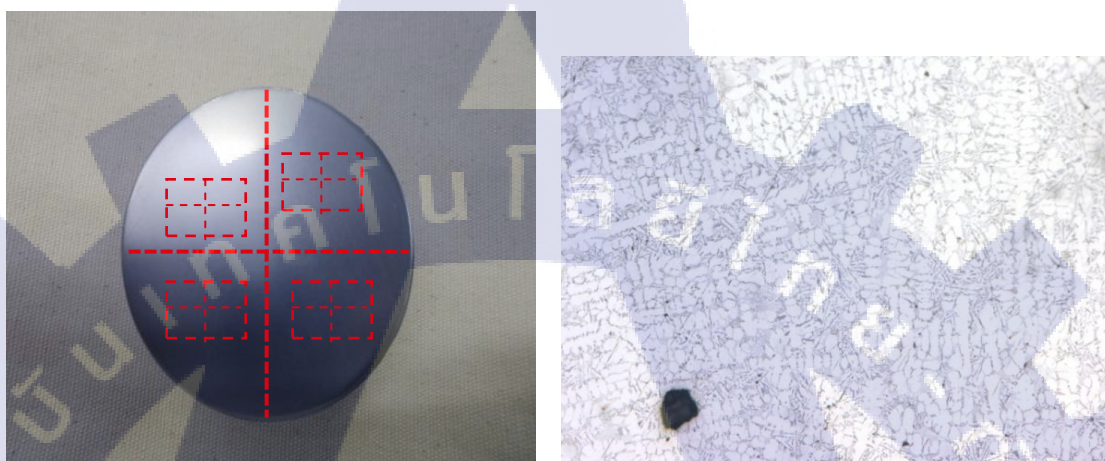
4.1



รูปที่ 4.1 Flow Chart แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

4.1.1 การได้มาซึ่งภาพ (Image Acquisition)

หลังจากชิ้นงานตัวอย่างผ่านกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ต้นแบบจะถูกดึงเข้ามา เพื่อใช้ในการประมวลผลภาพ ด้วยชุดคำสั่ง imread ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นภาพต้นแบบของอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด AC8A.1 ตำแหน่งที่ 1-5



รูปที่ 4.2 การกำหนดขอบเขตในชิ้นงานตัวอย่างและตัวอย่างภาพต้นแบบของอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด AC8A.1 ตำแหน่งที่ 1-5

4.1.2 การกรองภาพและแปลงภาพสีเป็นภาพขาวดำ (Filtering and Color Image Conversion)

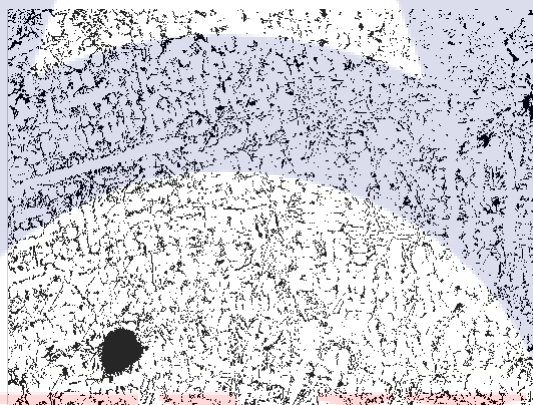
ภาพต้นแบบถูกนำมาผ่านกระบวนการกรองภาพ ด้วยตัวกรองชนิด unsharp ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้ขอบของภาพมีความคมชัดมากขึ้น จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบภาพต้นแบบและภาพที่ผ่านกระบวนการกรองภาพและแปลงเป็นสีเทา



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบภาพต้นแบบที่ผ่านกระบวนการกรองภาพและแปลงเป็นภาพสีเทา

4.1.3 ขั้นตอนการแยกส่วนของภาพ (Image Segmentation)

ในขั้นตอนนี้ขอบของเกรนจะถูกแยกออกจากพื้นหลัง โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่าเทรชโฮลด์ดิ้ง (Thresholding) จากรูปที่ 4.4 เป็นภาพที่ผ่านขั้นตอนการแยกส่วนของภาพ



รูปที่ 4.4 ภาพที่ผ่านกระบวนการแยกส่วนภาพ ด้วยเทคนิคเทรชโฮลด์ดิ้ง

4.1.4 มอร์โฟโลยี (Morphology Image Processing)

การประมวลผลภาพมอร์โฟโลยี ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณารูพรุนที่เกิดขึ้นในภาพต้นแบบ ด้วยชุดคำสั่ง bwareaopen มีหน้าที่ในการลบจุดภาพที่ไม่สนใจออกจากภาพขาวดำ ซึ่งกำหนดให้เป็นค่า K การกำหนดค่า K ถือว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อประมาณค่าความพรุนให้มีความแม่นยำในการตรวจสอบ ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของการทดสอบผลการทดลอง

4.2 การทดสอบผลการทดลอง

เพื่อให้ทราบถึงความแม่นยำของซอฟต์แวร์ในการประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าและความน่าเชื่อถือ ในเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ได้เลือกนำวิธีการทดสอบด้วยการแทนที่น้ำ เพื่อหาปริมาตรของของว่างในชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นการทดสอบในเชิงปริมาตร (Volume Base) โดยนำชิ้นงานไปหลอมและหล่อลงในเบ้า และทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยเปรียบเทียบปริมาตรก่อนและหลังการหลอม ซึ่งจะได้ค่าความพรุนที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นงานตัวอย่าง แต่เนื่องจากการทดสอบผลการทดลองด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะภายนอกที่ดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซไฮโดรเจนในบรรยากาศที่มีความสามารถในการแทรกซึมในน้ำโลหะได้อย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์การหล่อและลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังการหล่อ



รูปที่ 4.5 แสดงอุปกรณ์การหล่อและลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังการหล่อ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ จึงได้เปลี่ยนวิธีการทดสอบเป็นการทดสอบด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพแบบ 2D ซึ่งได้รับความร่วมมือจากทางสถาบันเหล็กและเหล็กกล้า

แห่งประเทศไทยในการทดสอบ ผลการทดสอบด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพแบบ 2D โดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบการทวนสอบการประมาณค่ารูพรุนจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (ISIT) และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา (Porosity)

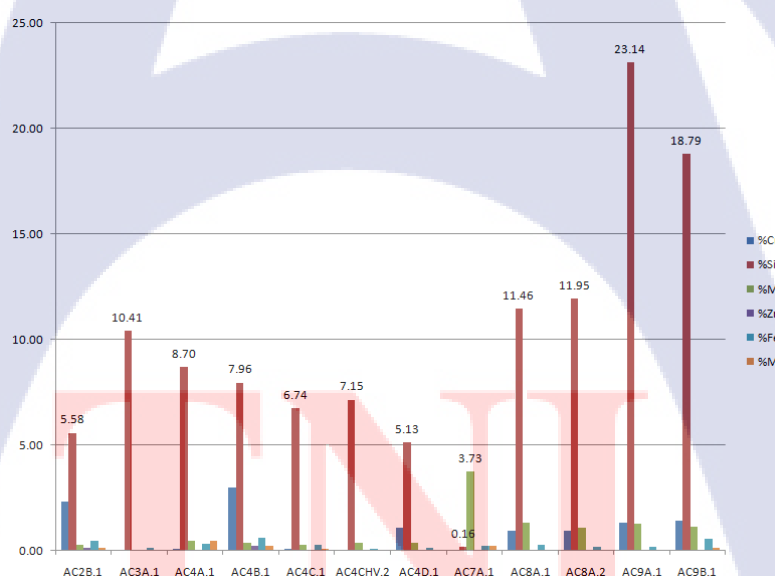
No.	Alloys Series	% Average Porosity by ISIT software	%Average Porosity by Porosity software	K Values	%Error (2 Digits)	%Error (3 Digits)
1	AC2B.1	0.07	0.07	3	0.00	-4.225
2	AC3A.1	0.04	0.04	15	0.00	-5.263
3	AC4A.1	0.06	0.06	25	0.00	3.153
4	AC4B.1	0.02	0.02	15	0.00	4.000
5	AC4C.1	0.03	0.03	3	0.00	11.111
6	AC4CHV.2	0.03	0.03	4	0.00	-3.297
7	AC4D.1	0.03	0.03	2	0.00	9.859
8	AC7A.1	0.72	0.38	0	47.22	46.816
9	AC8A.1	0.12	0.11	15	8.33	2.885
10	AC8A.2	0.02	0.02	31	0.00	5.195
11	AC9A.1	0.06	0.06	53	0.00	3.571
12	AC9B.1	0.18	0.17	17	5.56	8.295

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบการประมาณค่าความพรุนโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบ 2D จากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย และซอฟต์แวร์ Porosity ที่พัฒนาขึ้นมา จะเห็นว่าซอฟต์แวร์ Porosity มีความสามารถในการประมาณค่าความพรุนในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อได้ใกล้เคียงกับโปรแกรมของ ISIT ที่มีความเชื่อถือและมีประสิทธิภาพสูงกว่า กล่าวคือค่าความผิดพลาดไม่เกิน 10% ยกเว้นเพียงอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ เกรด AC7A.1 ที่มีค่าความผิดพลาดมากกว่า 10% เนื่องจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อเกรดนี้ มีธาตุแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมรอง ทำให้ลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคมีความแตกต่างจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อที่มีธาตุ

ผสมซิลิกอนเป็นธาตุรอง ดังนั้นเทคนิคที่ใช้ในการประมวลผลภาพสำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อชนิดนี้จึงแตกต่างกันไปด้วยเช่นกัน

4.2.1 ธาตุผสมทางเคมี

จากธาตุผสมในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อทั้ง 12 เกรด ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจุลภาพ ธาตุผสมที่สำคัญของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อคือ ธาตุซิลิกอน (Silicon) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ของธาตุซิลิกอนนั้นมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับมาตรฐานของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ เมื่อมีเปอร์เซ็นต์ของธาตุผสมที่แตกต่างกัน ย่อมทำให้โครงสร้างทางจุลภาคในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์มีความแตกต่างกันเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะของภาพต้นแบบในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ ด้วยเหตุผลนี้เองจึงจำเป็นต้องกำหนดค่า correcting factor ให้เหมาะสมกับแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ในที่นี้กำหนดให้เป็นค่า K โดยค่า K อาจนิยามได้ว่าเป็นจุดภาพหรือพิกเซลที่เล็กที่สุดและเรียงต่อกันจนเกิดเป็นลักษณะของรูพรุนที่ปรากฏในภาพต้นแบบ



รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุผสมหลักในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์

ตารางที่ 4.2 แสดงรายละเอียดของ Major Series, Minor Series และค่าความบริสุทธิ์ (Impurity)

No.	Alloys series	Main series	Minor series	Impurities
1	AC2B.1	2	B	1
2	AC3A.2	3	A	2
3	AC4A.1	4	A	1
4	AC4B.1	4	B	1
5	AC4C.1	4	C	1
6	AC4CHV.2	4	C	2
7	AC4D.1	4	D	1
8	AC7A.1	7	A	1
9	AC8A.1	8	A	1
10	AC8A.2	8	A	2
11	AC9A.1	9	A	1
12	AC9B.1	9	B	1

4.2.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุผสมและ Main Series

จากตารางที่ 4.2 เป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างธาตุผสมต่างๆในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หลักกับ Main series พบว่าธาตุผสมที่มีความสัมพันธ์กับ Main series คือ ธาตุ Al, Ni และ Na ที่ระดับความสัมพันธ์ 99% ส่วนธาตุ Si และ Mg มีระดับความสัมพันธ์ที่ 95% โดยธาตุ Al และ Na นั้นมีความสัมพันธ์แบบเปียร์สันในด้านลบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ -0.714 และ -0.797 ตามลำดับ ส่วนธาตุผสมนิกเกิล (Ni), ธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุแมกนีเซียม (Mg) นั้นมีความสัมพันธ์แบบเปียร์สันในด้านบวก มีค่าเท่ากับ 0.809 , 0.625 และ 0.588 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงมาตรฐานของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เลข Main Series จึงสรุปได้ว่าตัวเลข Main Series แปรผกผันกับค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนของธาตุอะลูมิเนียม (Al)

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างธาตุอะลูมิเนียม (Al), ธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุแมกนีเซียม (Mg), ธาตุ निकเกิล (Ni) และธาตุโซเดียม (Na) กับ Major Series

	Main	Minor	Al**	Si*	Mg*	Ni**	Na**
Pearson Correlation	1	-.423	-.714	.625	.588*	.809	-.797
Sig. (2-tailed)		.171	.009	.030	.044	.001	.002
Sum of Squares and Cross products	69.000	-12.000	-132.075	106.445	16.175	10.860	-.017
Covariance	6.273	-1.091	-12.007	9.677	1.470	.987	-.002
N	12	12	12	12	12	12	12

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

4.2.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุผสมและ Minor Series

การหาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุผสมต่างๆกับ Minor Series ได้พิจารณาเฉพาะในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อเกรด AC4 ทั้งหมด ซึ่งเป็นเกรดที่มี Minor Series ครบถ้วนที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อเกรดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ประกอบด้วยเกรด AC4A.1, AC4B.1, AC4C.1, AC4CHV.2 และ AC4D.1 โดยกำหนดให้ Minor Series A, B, C และ D แทนด้วยตัวเลข 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ผลของการหาความสัมพันธ์ พบว่า Minor series มีความสัมพันธ์กับธาตุซิลิกอน (Si) ที่ระดับความสัมพันธ์ 99% และมีความสัมพันธ์กับธาตุแมงกานีส (Mn) ที่ระดับความสัมพันธ์ 95% ซึ่งธาตุทั้งสองมีความสัมพันธ์กับ Minor series ในทิศทางลบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุแมงกานีส กับ Minor Series

	Main	Minor	Si**	Mn*
Pearson Correlation	. ^a	1	-.967	-.937
ig. (2-tailed)			.007	.019
N	5	5	5	5

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

4.2.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุผสมและความบริสุทธิ์

จากวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุผสมต่างๆและค่าความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ พบว่ามีเพียงธาตุโครเมียม (Cr) เท่านั้น ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความบริสุทธิ์ โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางลบ ที่ระดับความสัมพันธ์ 95% ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างธาตุโครเมียมและค่าความบริสุทธิ์ (Impurity)

	Main	Minor	Impurities	Cr*
Pearson Correlation	-.120	-.098	1	-.583
Sig. (2-tailed)	.709	.763		.047
N	12	12	12	12

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

4.2.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และตัวแปรที่มีความสำคัญ

จากการหาความสัมพันธ์ต่างๆข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าค่าความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ (Impurity) ธาตุโครเมียม (Cr) ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า K ในขณะเดียวกันธาตุอะลูมิเนียม (Al) และธาตุซิลิกอน (Si) มีความสัมพันธ์กับค่า K ที่ระดับความสัมพันธ์ที่ 99% ในทิศทางลบ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับ Main series และ Minor series ที่ระดับความสัมพันธ์ที่ 95% ในทิศทางบวกและลบตามลำดับเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และธาตุผสมที่เกี่ยวข้อง

	K values	Main*	Minor*	Impurities	Al**	Si**	Cr
Pearson Correlation	1	.666	-.695	.001	-.819**	-.820**	-.312
Sig. (2-tailed)		.025	.018	.997	.002	.002	.351
N	1	1	1	1	1	1	1

4.3 การหาความสัมพันธ์ด้วยการใช้สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน

จากการทวนสอบผลการทดลองในข้างต้น ทำให้สามารถทราบถึงธาตุผสมหรือตัวแปรที่มีผลต่อการกำหนดค่า K ที่เหมาะสมในอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อแต่ละเกรด การหาความสัมพันธ์นั้นได้ใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Multiple Regression Analysis) มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะธาตุอะลูมิเนียม (Al) และธาตุซิลิกอน (Si) เป็นหลัก โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบของต่างๆ เช่น Al*Si, Al/Si และ Si/Al จากตารางที่ 4.6 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และธาตุผสมทั้งสองชนิด พบว่าธาตุที่มีความสัมพันธ์กับค่า K มีเพียงธาตุซิลิกอน ที่ระดับความสัมพันธ์ 95% มีค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 63.5% และสามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อใช้ในการระบุถึงค่า K ที่เหมาะสมในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ได้ดังตารางที่ 4.7 และสมการที่ [1] ตามลำดับ โดยสมการนี้จะถูกนำไปใช้ในการเปรียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าจากการคำนวณ

ตารางที่ 4.7 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับธาตุผสม Al และ Si

Model Summary

Model	R	R^2	Adjusted R^2	Std. Error of the estimated	Change Statistics				
					R^2 Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.820 ^a	.672	.635	9.26369	.672	18.414	1	9	.002

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อใช้ในการระบุค่า K

Coefficients^a

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (constant)	-7.023	6.181		-1.136	.285	-21.005	6.958
Si	2.224	.518	.820	4.291	.002	1.052	3.397

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

$$K = -7.023 + 2.224Si \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.9 ค่าความผิดพลาด (Error) ที่ได้จากการปรับค่า K'

No.	Alloys Series	% Average Porosity by ISIT software	%Average Porosity by Porosity software	K' Values	%Error (2 Digits)	%Error (3 Digits)
1	AC2B.1	0.07	0.06	5	14.29	14.070
2	AC3A.1	0.04	0.04	16	0.00	0.000
3	AC4A.1	0.06	0.09	12	50.00	-38.288
4	AC4B.1	0.02	0.02	11	0.00	-10.667
5	AC4C.1	0.03	0.01	8	66.67	53.704
6	AC4CHV.2	0.03	0.02	9	33.33	26.374
7	AC4D.1	0.03	0.02	4	33.33	39.437
8	AC7A.1	-	-	-	-	-
9	AC8A.1	0.12	0.11	18	8.33	13.702
10	AC8A.2	0.02	0.04	20	-100.00	-90.909

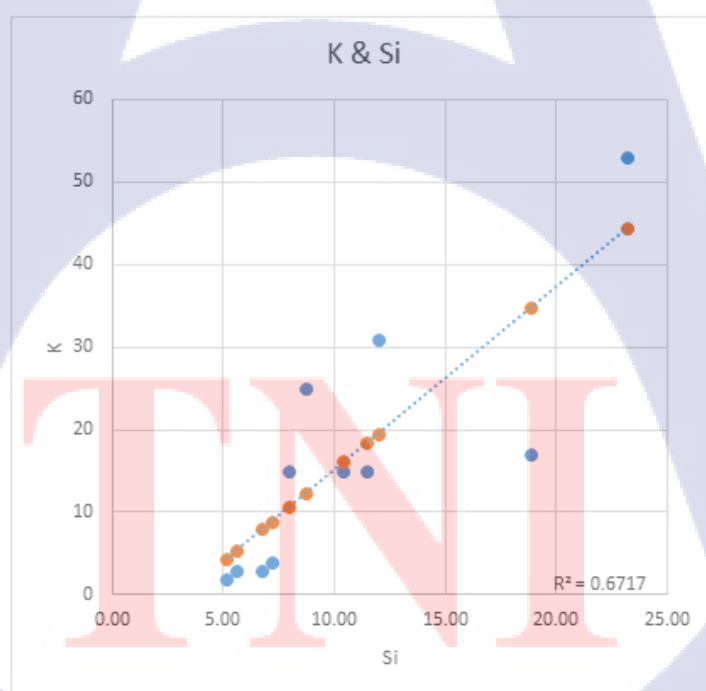
ตารางที่ 4.9 ค่าผิดพลาด (Error) ที่ได้จากการปรับค่า K' (ต่อ)

No.	Alloys Series	% Average Porosity by ISIT software	%Average Porosity by Porosity software	K' Values	%Error (2 Digits)	%Error (3 Digits)
11	AC9A.1	0.06	0.07	44	-16.67	-14.286
12	AC9B.1	0.18	0.10	35	44.44	46.237

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (จุดสีส้ม) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (จุดสีฟ้า) โดยพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณยังมีความผิดพลาดค่อนข้างมาก จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงสมการให้มีความแม่นยำในการประมาณค่าความพรุนสำหรับวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการดำเนินงานและผลวิเคราะห์โครงการ

งานวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าความพรุนในวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ โดยค่าความพรุนนี้ถือว่าเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อที่สำคัญ เครื่องมือทดสอบที่มีอยู่ในปัจจุบันถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการประมาณค่าความพรุนที่สูง แต่ก็มีอุปสรรคในเรื่องของราคาที่สูงและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน ในบางกรณีชิ้นงานตัวอย่างอาจต้องถูกทำลายไป เพราะฉะนั้นการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการประมาณค่าความพรุนของวัสดุ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับภาคอุตสาหกรรมที่ใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อเป็นวัตถุดิบในการผลิต ทั้งในด้านการต้นทุนในการตรวจสอบและระยะเวลาในการตรวจสอบ

จากผลการวิจัย พบว่าซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุนที่พัฒนาขึ้นมา มีความสามารถในการประมาณค่าความพรุนของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ที่มีธาตุผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 10.0% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการประมาณค่าความพรุนจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพเช่นกัน ซึ่งอ้างอิงผลการประมาณค่าความพรุนในภาคผนวก ค. ยกเว้นเพียงแต่อะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด AC7A.1 ที่มีธาตุแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมรอง ทำให้มีโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างจากอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีธาตุซิลิกอนผสม จึงอาจต้องมีการปรับปรุงเทคนิคการประมวลผลภาพ เพื่อให้เหมาะสมสำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรดนี้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนสำหรับการลงทุนซื้อเครื่องมือทดสอบและซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าสามารถลดต้นทุนในการลงทุนซื้อเครื่องมือทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบการลงทุนในเครื่องมือทดสอบ

	ซอฟต์แวร์ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน	ความแตกต่าง
ต้นทุนเครื่องมือทดสอบ (บาทไทย)	~100,000	~10,000	~100,000

และตารางที่ 5.2 เป็นการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลความพรุน เมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบด้วย BET Surface Area Analyzer จะเห็นว่าสามารถลดเวลาในการประมวลผลได้ประมาณ 13 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.2 ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาในการประมวลผลความพรุน

	BET Surface Area Analyzer	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน	ความแตกต่าง
ระยะเวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง)	~15	~2	-13

จากผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยพิจารณาถึง Main Series, Minor Series และ Impurity ของอะลูมิเนียมอัลลอยด์แต่ละเกรดและธาตุผสมทางเคมี เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดถึงค่าพารามิเตอร์ (K) ที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้ในการประมวลผลภาพตามรูปร่างลักษณะ (Morphology) ซึ่งค่า K อาจนิยามได้ว่าเป็นจุดที่เล็กที่สุดที่เรียงต่อกันจนเกิดเป็นรูปร่างของความพรุนในภาพต้นแบบ จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation Analysis) ธาตุซิลิกอนและธาตุอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีนัยสำคัญกับค่าพารามิเตอร์ K มากที่สุด อยู่ที่ -0.820 และ -0.819 ที่ระดับความสัมพันธ์ 99.0% ตามลำดับ นอกจากนี้ผู้วิจัยมีความพยายามที่จะระบุถึงค่าพารามิเตอร์ใหม่ เพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานในการประมวลผลภาพตามรูปร่างลักษณะ สำหรับวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ ที่เรียกว่า K' จากการหาความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถอธิบายพฤติกรรมของธาตุซิลิกอนที่มีผลต่อ K' ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น คือ $K' = 2.224Si - 7.023$ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Multiple Regression Analysis) พบว่ามีค่า Adjusted R^2 อยู่ที่ 63.5% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการประมาณค่าความพรุนจากซอฟต์แวร์ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย พบว่าค่าความผิดพลาดไม่สามารถยอมรับได้ นั่นคือ มากกว่า 10.0% จึงอาจกล่าวสรุปได้ว่าพฤติกรรมธาตุซิลิกอนอาจอยู่ในฟังก์ชันรูปแบบอื่น ที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งต้องมีการพัฒนาปรับปรุงรูปแบบสมการให้สอดคล้องกับผลการประมาณค่าความพรุนที่ได้รับมาตรฐาน

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำโครงการ

5.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานของสถาบันฯ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องขัดกระดาษทราย, กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscope) มีสภาพการใช้งานไม่ค่อยดี จึงต้องของความร่วมมือจากบริษัท Mahle Engine Components (Thailand) Co.,Ltd ในการเตรียมชิ้นงาน จึงทำให้ระยะเวลาการเตรียมชิ้นงานมีระยะเวลานานกว่าแผนงานที่ได้กำหนดไว้

5.2.2 ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะต้องพิจารณาถึงสภาพของพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังการขัดชิ้นงาน ความมันเงา และการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งจะส่งผลต่อความผิดพลาดในขั้นตอนของการประมวลผลภาพ

5.2.3 ขาดแคลนเครื่องมือที่ใช้ในขั้นตอนของการทวนสอบผลการทดลอง ทำให้ต้องเปลี่ยนวิธีการทวนสอบด้วยการแทนที่ด้วยน้ำ เป็นการทวนสอบด้วยการประมวลผลภาพ

5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะ

5.3.1 เทคนิคการประมวลผลภาพ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบในวัสดุอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3.2 ในขั้นตอนการทวนสอบผลการทดลองในเชิงปริมาตร ควรเลือกกระบวนการหล่อที่ใช้แรงดันในการหล่อกว่าการหล่อด้วยการหล่อทราย เพื่อลดโอกาสการเกิดรูพรุนหลังการหล่อ

5.3.3 จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงค่ามาตรฐาน K' ให้มีความแม่นยำในการประมาณค่าความพรุนให้มากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] C.-J. Du; and D.-W. Sun. (2006). Automatic Measurement of Pores and Porosity in Pork Ham and Their Correlations with Processing Time, Water Content and Texture. **Meat Science**. 72 (2006): 294-302.
- [2] D.-H. Shi; et al. (2007). Research on Segmentation and Distribution Features of Small Defects in Precision Weldments with Complex Structure. **NDT&E International**. 40 (2007): 397-404.
- [3] A.U. Ozturk; and B. Baradan. (2008). A Comparison Study of Porosity and Compressive Strength Mathematical Models with Image Analysis. **Computational Materials Science**. 43 (2008): 974-979.
- [4] L.A. Dobrzanski; M. Krupinski; R. Maniara; and J.H. Sokolowski. (2007). Computer Aided Method for Quality Control of Automotive Al-Si-Cu Cast Components. **Materials and Manufacturing Engineering**. 24 (2007): 151-154.
- [5] S. Pan; and M. Kudo. (2011). Segmentation of Pores in Wood Microscopic Images based on Mathematical Morphology with a Variables Structuring Element. **Computer and Electronics in Agriculture**. 75 (2011): 250-260.
- [6] John T.H. Pearce; และกลุ่ม Metals. (2544). **ข้อบกพร่องในงานหล่อโลหะ สาเหตุและวิธีการแก้ไข**. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.).
- [7] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- [8] **Image Processing Toolbox™: User's Guide**. (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 17 พฤษภาคม 2557, จาก www.mathworks.co.uk/help/pdf_doc/images/images_tb.pdf.
- [9] **สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสุขภาพ: บทที่ 7 สหสัมพันธ์ (Correlation)**. (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 8 กันยายน 2557, จาก http://intranet.nurse.cmu.ac.th/mis/download/course/lec_567730_lesson_07.pdf.

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

ธาตุผสมทางเคมีในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ

TNI

ตารางที่ ก.1 ธาตุผสมทางเคมีในแต่ละเกรดของอะลูมิเนียมอัลลอยด์หล่อ

No.	Alloy Name	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Bi	Na	Ca	Be	P
1	AC2B.1	2.31	5.58	0.29	0.11	0.47	0.13	0.16	0.04	0.04	0.00	0.03	0.028	0.0016	0.0020	0.0001	0.0023
2	AC3A.1	0.04	10.41	0.01	0.00	0.13	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0002	0.0010	0.0005	0.0000	0.0007
3	AC4A.1	0.08	8.70	0.46	0.04	0.34	0.44	0.02	0.04	0.01	0.00	0.01	0.0000	0.0015	0.0011	0.0000	*
4	AC4B.1	2.97	7.96	0.37	0.23	0.61	0.21	0.03	0.03	0.02	0.01	0.05	0.0007	0.0007	0.0017	0.0001	0.0013
5	AC4C.1	0.09	6.74	0.29	0.01	0.27	0.08	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.0001	0.0018	0.0008	0.0000	0.0013
6	AC4CHV .2	0.01	7.15	0.35	0.00	0.09	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0001	0.0018	0.0004	*	0.0008
7	AC4D.1	1.06	5.13	0.38	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0002	0.0021	0.0010	*	*
8	AC7A.1	0.04	0.16	3.73	0.04	0.22	0.22	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	*
9	AC8A.1	0.96	11.46	1.30	0.03	0.29	0.05	1.21	0.05	0.01	0.00	0.02	0.0005	0.0002	0.0016	*	*
10	AC8A.2	0.92	11.95	1.07	0.01	0.17	0.01	1.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0004	0.0003	0.0010	*	0.0053
11	AC9A.1	1.32	23.14	1.27	0.01	0.16	0.01	0.76	0.01	0.00	0.00	0.00	*	*	0.0007	*	0.0024
12	AC9B.1	1.42	18.79	1.15	0.04	0.57	0.14	0.88	0.04	0.01	0.00	0.03	0.0013	0.0005	0.0016	*	0.0070

ภาคผนวก ข.

โค้ดโปรแกรมการประมาณค่าความพูน

TNI

ภาคผนวก ข. โค้ดโปรแกรมการประมาณค่าความพรุน

```
function varargout = Porosity(varargin)
% POROSITY M-file for Porosity.fig
% POROSITY, by itself, creates a new POROSITY or raises the existing
% singleton*.
%
% H = POROSITY returns the handle to a new POROSITY or the handle to
% the existing singleton*.
%
% POROSITY('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in POROSITY.M with the given input
% arguments.
%
% POROSITY('Property','Value',...) creates a new POROSITY or raises
% the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
% are
% applied to the GUI before Porosity_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property
% application
% stop. All inputs are passed to Porosity_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
% one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Porosity

% Last Modified by GUIDE v2.5 13-Mar-2012 11:42:12

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @Porosity_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @Porosity_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [], ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Porosity is made visible.
function Porosity_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

```

% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to Porosity (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Porosity
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Porosity wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Porosity_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in Browse.
function Browse_Callback(hObject, eventdata, handles)
global I;
I = uigetfile({'*.jpg;*.tif;*.bmp;*.png;'});
I = imread(I);
axes(handles.axes1);
imshow(I);

% --- Executes on button press in Gray.
function Gray_Callback(hObject, eventdata, handles)
global I gray;
H = fspecial('unsharp');
sharpened = imfilter(I,H,'replicate');

gray=rgb2gray(sharpened);
axes(handles.axes2);
imshow(gray);

% --- Executes on button press in BW.
function BW_Callback(hObject, eventdata, handles)
global I gray hole;
BW=im2bw(gray,graythresh(gray))
hole = bwareaopen(BW, K);
axes(handles.axes2);
imshow(hole);

```

```
% --- Executes on button press in Start.
function Start_Callback(hObject, eventdata, handles)
global I hole;
[M,N,t] = size(I);

H = fspecial('unsharp');
sharpened = imfilter(I,H,'replicate');

gray=rgb2gray(sharpened);
BW=~im2bw(gray)

hole = bwareaopen(BW, K);
B = bwboundaries(hole);

numberOfWhitePixels = sum(sum(hole));
totalNumberOfPixels = M * N;
percentWhitePixels = 100.0 * numberOfWhitePixels /
totalNumberOfPixels;

axes(handles.axes2);
imshow(I)
hold on;
for k = 1:length(B);
boundary = B{k};
plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'b', 'LineWidth', 0.1);
end
set(handles.Void_area , 'String',num2str(numberOfWhitePixels));
set(handles.Total_area , 'String',num2str(totalNumberOfPixels));
set(handles.Porosity , 'String',num2str(percentWhitePixels));
```

ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบการการประมาณค่าความพຼຸນด้วยพารามิเตอร์ K

TNI

ตาราง ค.1 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC2B.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC2B.1	1-1	0.07	0.06	0.01
AC2B.1	1-2	0.05	0.05	0.00
AC2B.1	1-3	0.03	0.03	0.00
AC2B.1	1-4	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	1-5	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	1-6	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	1-7	0.14	0.13	0.01
AC2B.1	1-8	0.04	0.05	-0.01
AC2B.1	1-9	0.08	0.08	0.00
AC2B.1	2-1	0.08	0.09	-0.01
AC2B.1	2-2	0.10	0.09	0.01
AC2B.1	2-3	0.22	0.20	0.02
AC2B.1	2-4	0.09	0.09	0.00
AC2B.1	2-5	0.12	*	*
AC2B.1	2-6	0.05	0.05	0.00
AC2B.1	2-7	0.23	0.22	0.01
AC2B.1	2-8	0.09	0.10	-0.01
AC2B.1	2-9	0.02	0.04	-0.02
AC2B.1	3-1	0.03	0.03	0.00
AC2B.1	3-2	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	3-3	0.05	*	*
AC2B.1	3-4	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	3-5	0.04	0.05	-0.01
AC2B.1	3-6	0.04	0.06	-0.02
AC2B.1	3-7	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	3-8	0.06	*	*
AC2B.1	3-9	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	4-1	0.08	0.10	-0.02
AC2B.1	4-2	0.08	0.09	-0.01
AC2B.1	4-3	0.06	*	*
AC2B.1	4-4	0.08	*	*
AC2B.1	4-5	0.07	0.09	-0.02
AC2B.1	4-6	0.16	*	*
AC2B.1	4-7	0.08	0.10	-0.02
AC2B.1	4-8	0.09	*	*
AC2B.1	4-9	0.13	*	*
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.07	0.07	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.071	0.074	-4.628

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.2 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC3A.2

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC3A.2	1-1	0.00	0.01	-0.01
AC3A.2	1-2	0.00	0.02	-0.02
AC3A.2	1-3	0.02	0.04	-0.02
AC3A.2	1-4	0.04	0.06	-0.02
AC3A.2	1-5	0.05	0.07	-0.02
AC3A.2	1-6	0.03	0.06	-0.03
AC3A.2	1-7	0.08	*	*
AC3A.2	1-8	0.16	*	*
AC3A.2	1-9	0.08	*	*
AC3A.2	2-1	0.06	*	*
AC3A.2	2-2	0.03	*	*
AC3A.2	2-3	0.03	*	*
AC3A.2	2-4	0.07	*	*
AC3A.2	2-5	0.11	*	*
AC3A.2	2-6	0.06	*	*
AC3A.2	2-7	0.08	*	*
AC3A.2	2-8	0.09	*	*
AC3A.2	2-9	0.09	*	*
AC3A.2	3-1	0.02	*	*
AC3A.2	3-2	0.13	*	*
AC3A.2	3-3	0.22	*	*
AC3A.2	3-4	0.04	0.04	0.00
AC3A.2	3-5	0.06	0.04	0.02
AC3A.2	3-6	0.10	0.08	0.02
AC3A.2	3-7	0.13	*	*
AC3A.2	3-8	0.07	0.05	0.02
AC3A.2	3-9	0.07	0.05	0.02
AC3A.2	4-1	0.34	*	*
AC3A.2	4-2	0.16	*	*
AC3A.2	4-3	0.14	*	*
AC3A.2	4-4	0.15	*	*
AC3A.2	4-5	0.08	*	*
AC3A.2	4-6	0.05	0.05	0.00
AC3A.2	4-7	0.02	0.01	0.01
AC3A.2	4-8	0.02	0.02	0.00
AC3A.2	4-9	0.00	0.00	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.04	0.04	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.038	0.040	-5.263

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.3 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4A.1

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4A.1	1-1	0.04	0.04	0.00
AC4A.1	1-2	0.02	0.01	0.01
AC4A.1	1-3	0.22	0.22	0.00
AC4A.1	1-4	0.08	0.07	0.01
AC4A.1	1-5	0.13	0.13	0.00
AC4A.1	1-6	0.01	0.01	0.00
AC4A.1	1-7	0.03	0.02	0.01
AC4A.1	1-8	0.04	0.03	0.01
AC4A.1	1-9	0.02	0.01	0.01
AC4A.1	2-1	0.03	0.04	-0.01
AC4A.1	2-2	0.04	0.04	0.00
AC4A.1	2-3	0.01	0.00	0.01
AC4A.1	2-4	0.01	0.01	0.00
AC4A.1	2-5	0.02	0.01	0.01
AC4A.1	2-6	0.03	0.02	0.01
AC4A.1	2-7	0.01	0.01	0.00
AC4A.1	2-8	0.01	0.01	0.00
AC4A.1	2-9	0.04	0.04	0.00
AC4A.1	3-1	0.54	0.56	-0.02
AC4A.1	3-2	0.27	0.26	0.01
AC4A.1	3-3	0.03	0.02	0.01
AC4A.1	3-4	0.02	0.02	0.00
AC4A.1	3-5	0.01	0.01	0.00
AC4A.1	3-6	0.03	0.03	0.00
AC4A.1	3-7	0.05	0.05	0.00
AC4A.1	3-8	0.01	0.01	0.00
AC4A.1	3-9	0.19	0.21	-0.02
AC4A.1	4-1	0.05	0.06	-0.01
AC4A.1	4-2	0.05	0.05	0.00
AC4A.1	4-3	0.04	0.04	0.00
AC4A.1	4-4	0.03	0.02	0.01
AC4A.1	4-5	0.04	0.03	0.01
AC4A.1	4-6	0.03	0.02	0.01
AC4A.1	4-7	0.01	0.00	0.01
AC4A.1	4-8	0.02	0.02	0.00
AC4A.1	4-9	0.01	0.02	-0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.06	0.06	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.062	0.060	3.153

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.4 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4B.1

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4B.1	1-1	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	1-2	0.00	0.01	-0.01
AC4B.1	1-3	0.00	0.01	-0.01
AC4B.1	1-4	0.07	0.07	0.00
AC4B.1	1-5	0.02	0.02	0.00
AC4B.1	1-6	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	1-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	1-8	0.05	0.05	0.00
AC4B.1	1-9	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-1	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-2	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-3	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-4	0.01	0.00	0.01
AC4B.1	2-5	0.01	0.00	0.01
AC4B.1	2-6	0.01	0.00	0.01
AC4B.1	2-7	0.01	0.00	0.01
AC4B.1	2-8	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-9	0.07	0.07	0.00
AC4B.1	3-1	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-2	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-3	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-4	0.03	0.03	0.00
AC4B.1	3-5	0.02	0.01	0.01
AC4B.1	3-6	0.12	0.12	0.00
AC4B.1	3-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-8	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-9	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-1	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-2	0.02	0.02	0.00
AC4B.1	4-3	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-4	0.04	0.05	-0.01
AC4B.1	4-5	0.01	0.02	-0.01
AC4B.1	4-6	0.03	0.03	0.00
AC4B.1	4-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-8	0.04	0.03	0.01
AC4B.1	4-9	0.02	0.01	0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.02	0.02	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.021	0.020	4.000

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.5 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4C.1

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4C.1	1-1	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	1-2	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	1-3	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	1-4	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	1-5	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	1-6	0.05	*	*
AC4C.1	1-7	0.09	0.06	0.03
AC4C.1	1-8	0.06	0.04	0.02
AC4C.1	1-9	0.03	0.03	0.00
AC4C.1	2-1	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	2-2	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	2-3	0.06	0.04	0.02
AC4C.1	2-4	0.05	0.04	0.01
AC4C.1	2-5	0.07	0.06	0.01
AC4C.1	2-6	0.06	0.06	0.00
AC4C.1	2-7	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	2-8	0.03	0.02	0.01
AC4C.1	2-9	0.04	0.04	0.00
AC4C.1	3-1	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	3-2	0.09	0.08	0.01
AC4C.1	3-3	0.07	0.07	0.00
AC4C.1	3-4	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	3-5	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	3-6	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	3-7	0.00	0.00	0.00
AC4C.1	3-8	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	3-9	0.04	*	*
AC4C.1	4-1	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	4-2	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	4-3	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	4-4	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	4-5	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	4-6	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	4-7	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	4-8	0.02	0.02	0.00
AC4C.1	4-9	0.04	0.04	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.03	0.03	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.029	0.025	13.131

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.6 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4CHV.2

เกรดอลูมิเนียมอัลลอยด์	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4CHV.2	1-1	0.03	0.03	0.00
AC4CHV.2	1-2	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	1-3	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	1-4	0.47	0.43	0.04
AC4CHV.2	1-5	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	1-6	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	1-7	0.01	0.02	-0.01
AC4CHV.2	1-8	0.02	0.02	0.00
AC4CHV.2	1-9	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	2-1	0.06	0.05	0.01
AC4CHV.2	2-2	0.06	0.05	0.01
AC4CHV.2	2-3	0.06	0.05	0.01
AC4CHV.2	2-4	0.00	0.01	-0.01
AC4CHV.2	2-5	0.02	0.02	0.00
AC4CHV.2	2-6	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	2-7	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	2-8	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	2-9	0.01	0.02	-0.01
AC4CHV.2	3-1	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-2	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-3	0.01	0.02	-0.01
AC4CHV.2	3-4	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-5	0.01	0.02	-0.01
AC4CHV.2	3-6	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-7	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	3-8	0.00	0.02	-0.02
AC4CHV.2	3-9	0.00	0.01	-0.01
AC4CHV.2	4-1	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	4-2	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	4-3	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	4-4	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-5	0.00	0.01	-0.01
AC4CHV.2	4-6	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-7	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-8	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-9	0.00	0.01	-0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.03	0.03	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.025	0.026	-3.297

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.7 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC4D.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4D.1	1-1	0.12	*	*
AC4D.1	1-2	0.36	*	*
AC4D.1	1-3	0.17	*	*
AC4D.1	1-4	0.40	*	*
AC4D.1	1-5	0.28	*	*
AC4D.1	1-6	0.27	*	*
AC4D.1	1-7	0.81	*	*
AC4D.1	1-8	0.56	*	*
AC4D.1	1-9	0.43	*	*
AC4D.1	2-1	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	2-2	0.01	0.02	-0.01
AC4D.1	2-3	0.06	*	*
AC4D.1	2-4	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	2-5	0.03	0.03	0.00
AC4D.1	2-6	0.02	0.02	0.00
AC4D.1	2-7	0.03	0.03	0.00
AC4D.1	2-8	0.10	*	*
AC4D.1	2-9	0.02	0.05	-0.03
AC4D.1	3-1	0.11	*	*
AC4D.1	3-2	0.08	0.06	0.02
AC4D.1	3-3	0.04	0.04	0.00
AC4D.1	3-4	0.03	0.02	0.01
AC4D.1	3-5	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	3-6	0.02	0.02	0.00
AC4D.1	3-7	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	3-8	0.00	0.02	-0.02
AC4D.1	3-9	0.00	0.01	-0.01
AC4D.1	4-1	0.75	*	*
AC4D.1	4-2	0.15	0.10	0.05
AC4D.1	4-3	0.07	0.05	0.02
AC4D.1	4-4	0.04	0.03	0.01
AC4D.1	4-5	0.07	0.04	0.03
AC4D.1	4-6	0.04	0.03	0.01
AC4D.1	4-7	0.00	0.01	-0.01
AC4D.1	4-8	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	4-9	0.01	0.01	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.03	0.03	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.031	0.028	9.859

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.8 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC7A.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC7A.1	1-1	1.68	0.57	1.11
AC7A.1	1-2	1.11	0.51	0.60
AC7A.1	1-3	0.81	0.38	0.43
AC7A.1	1-4	1.90	0.85	1.05
AC7A.1	1-5	1.01	0.51	0.50
AC7A.1	1-6	1.08	0.47	0.61
AC7A.1	1-7	1.27	*	*
AC7A.1	1-8	0.92	0.42	0.50
AC7A.1	1-9	0.69	0.36	0.33
AC7A.1	2-1	0.38	0.21	0.17
AC7A.1	2-2	0.55	0.45	0.10
AC7A.1	2-3	0.73	0.34	0.39
AC7A.1	2-4	0.52	0.30	0.22
AC7A.1	2-5	0.93	0.48	0.45
AC7A.1	2-6	1.15	0.58	0.57
AC7A.1	2-7	1.13	0.57	0.56
AC7A.1	2-8	1.21	0.65	0.56
AC7A.1	2-9	1.68	0.86	0.82
AC7A.1	3-1	0.80	0.49	0.31
AC7A.1	3-2	0.42	0.25	0.17
AC7A.1	3-3	0.33	0.19	0.14
AC7A.1	3-4	0.36	0.25	0.11
AC7A.1	3-5	0.26	0.30	-0.04
AC7A.1	3-6	0.24	0.24	0.00
AC7A.1	3-7	0.20	0.16	0.04
AC7A.1	3-8	0.23	0.19	0.04
AC7A.1	3-9	0.31	*	*
AC7A.1	4-1	0.97	0.45	0.52
AC7A.1	4-2	0.64	0.38	0.26
AC7A.1	4-3	0.42	0.25	0.17
AC7A.1	4-4	0.39	0.27	0.12
AC7A.1	4-5	0.26	0.18	0.08
AC7A.1	4-6	0.31	0.20	0.11
AC7A.1	4-7	0.34	0.23	0.11
AC7A.1	4-8	0.20	0.14	0.06
AC7A.1	4-9	0.48	0.31	0.17
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.72	0.38	47.22
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.716	0.382	46.609

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.9 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC8A.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC8A.1	1-1	0.08	0.08	0.00
AC8A.1	1-2	0.07	0.07	0.00
AC8A.1	1-3	0.13	0.14	-0.01
AC8A.1	1-4	0.08	0.08	0.00
AC8A.1	1-5	0.58	0.57	0.01
AC8A.1	1-6	0.16	0.15	0.01
AC8A.1	1-7	0.74	0.76	-0.02
AC8A.1	1-8	0.19	0.17	0.02
AC8A.1	1-9	0.22	0.23	-0.01
AC8A.1	2-1	0.09	0.09	0.00
AC8A.1	2-2	0.08	0.08	0.00
AC8A.1	2-3	0.11	0.10	0.01
AC8A.1	2-4	0.07	0.07	0.00
AC8A.1	2-5	0.11	0.10	0.01
AC8A.1	2-6	0.09	0.08	0.01
AC8A.1	2-7	0.07	0.07	0.00
AC8A.1	2-8	0.16	0.16	0.00
AC8A.1	2-9	0.15	0.12	0.03
AC8A.1	3-1	0.05	0.05	0.00
AC8A.1	3-2	0.05	0.06	-0.01
AC8A.1	3-3	0.05	0.04	0.01
AC8A.1	3-4	0.04	0.03	0.01
AC8A.1	3-5	0.06	0.06	0.00
AC8A.1	3-6	0.06	0.06	0.00
AC8A.1	3-7	0.04	0.04	0.00
AC8A.1	3-8	0.06	0.06	0.00
AC8A.1	3-9	0.09	0.08	0.01
AC8A.1	4-1	0.04	0.03	0.01
AC8A.1	4-2	0.05	0.04	0.01
AC8A.1	4-3	0.04	0.04	0.00
AC8A.1	4-4	0.07	0.06	0.01
AC8A.1	4-5	0.06	0.06	0.00
AC8A.1	4-6	0.04	0.04	0.00
AC8A.1	4-7	0.05	0.05	0.00
AC8A.1	4-8	0.05	0.04	0.01
AC8A.1	4-9	0.08	0.08	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.12	0.11	8.33
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.116	0.112	2.885

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.10 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC8A.2

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC8A.2	1-1	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	1-2	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	1-3	0.03	0.04	-0.01
AC8A.2	1-4	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	1-5	0.03	0.03	0.00
AC8A.2	1-6	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	1-7	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	1-8	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	1-9	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	2-1	0.05	0.06	-0.01
AC8A.2	2-2	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	2-3	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	2-4	0.01	0.00	0.01
AC8A.2	2-5	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	2-6	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	2-7	0.03	0.04	-0.01
AC8A.2	2-8	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	2-9	0.03	0.05	-0.02
AC8A.2	3-1	0.01	0.00	0.01
AC8A.2	3-2	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	3-3	0.01	0.00	0.01
AC8A.2	3-4	0.01	0.00	0.01
AC8A.2	3-5	0.01	0.00	0.01
AC8A.2	3-6	0.01	0.00	0.01
AC8A.2	3-7	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	3-8	0.02	0.01	0.01
AC8A.2	3-9	0.02	0.01	0.01
AC8A.2	4-1	0.03	0.03	0.00
AC8A.2	4-2	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	4-3	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	4-4	0.05	0.04	0.01
AC8A.2	4-5	0.04	0.04	0.00
AC8A.2	4-6	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	4-7	0.02	0.02	0.00
AC8A.2	4-8	0.02	0.00	0.02
AC8A.2	4-9	0.03	0.03	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.02	0.02	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.021	0.020	5.195

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.11 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC9A.1

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC9A.1	1-1	0.02	*	*
AC9A.1	1-2	0.05	0.04	0.01
AC9A.1	1-3	0.07	0.07	0.00
AC9A.1	1-4	0.05	*	*
AC9A.1	1-5	0.07	0.07	0.00
AC9A.1	1-6	0.12	0.13	-0.01
AC9A.1	1-7	0.07	0.06	0.01
AC9A.1	1-8	0.09	*	*
AC9A.1	1-9	0.08	*	*
AC9A.1	2-1	0.04	0.06	-0.02
AC9A.1	2-2	0.09	0.08	0.01
AC9A.1	2-3	0.04	*	*
AC9A.1	2-4	0.07	0.06	0.01
AC9A.1	2-5	0.09	*	*
AC9A.1	2-6	0.03	0.04	-0.01
AC9A.1	2-7	0.05	0.03	0.02
AC9A.1	2-8	0.04	*	*
AC9A.1	2-9	0.03	*	*
AC9A.1	3-1	0.03	0.01	0.02
AC9A.1	3-2	0.09	*	*
AC9A.1	3-3	0.02	*	*
AC9A.1	3-4	0.03	0.01	0.02
AC9A.1	3-5	0.03	*	*
AC9A.1	3-6	0.04	*	*
AC9A.1	3-7	0.08	0.08	0.00
AC9A.1	3-8	0.04	0.07	-0.03
AC9A.1	3-9	0.02	*	*
AC9A.1	4-1	0.04	*	*
AC9A.1	4-2	0.03	*	*
AC9A.1	4-3	0.06	*	*
AC9A.1	4-4	0.04	*	*
AC9A.1	4-5	0.04	*	*
AC9A.1	4-6	0.04	*	*
AC9A.1	4-7	0.08	*	*
AC9A.1	4-8	0.02	*	*
AC9A.1	4-9	0.03	*	*
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.06	0.06	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.060	0.058	3.571

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ค.12 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K เกรด AC9A.2

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC9B.1	1-1	0.09	0.09	0.00
AC9B.1	1-2	0.08	0.08	0.00
AC9B.1	1-3	0.08	0.09	-0.01
AC9B.1	1-4	0.08	0.08	0.00
AC9B.1	1-5	0.08	0.07	0.01
AC9B.1	1-6	0.07	0.06	0.01
AC9B.1	1-7	0.15	0.13	0.02
AC9B.1	1-8	0.07	0.07	0.00
AC9B.1	1-9	0.07	0.06	0.01
AC9B.1	2-1	0.13	0.12	0.01
AC9B.1	2-2	0.19	0.19	0.00
AC9B.1	2-3	0.19	0.18	0.01
AC9B.1	2-4	0.20	0.17	0.03
AC9B.1	2-5	0.19	0.19	0.00
AC9B.1	2-6	0.33	0.31	0.02
AC9B.1	2-7	0.40	0.34	0.06
AC9B.1	2-8	0.30	0.26	0.04
AC9B.1	2-9	0.38	0.36	0.02
AC9B.1	3-1	0.35	0.32	0.03
AC9B.1	3-2	0.27	0.23	0.04
AC9B.1	3-3	0.25	0.23	0.02
AC9B.1	3-4	0.18	0.15	0.03
AC9B.1	3-5	0.28	0.25	0.03
AC9B.1	3-6	0.22	0.23	-0.01
AC9B.1	3-7	0.14	0.13	0.01
AC9B.1	3-8	0.17	0.17	0.00
AC9B.1	3-9	0.16	0.13	0.03
AC9B.1	4-1	0.34	0.30	0.04
AC9B.1	4-2	0.15	0.14	0.01
AC9B.1	4-3	0.20	0.19	0.01
AC9B.1	4-4	0.19	0.17	0.02
AC9B.1	4-5	0.20	0.20	0.00
AC9B.1	4-6	0.13	0.12	0.01
AC9B.1	4-7	0.09	0.07	0.02
AC9B.1	4-8	0.06	0.05	0.01
AC9B.1	4-9	0.05	0.04	0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.18	0.17	5.56
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.181	0.166	8.295

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบการการประมาณค่าความพูนด้วยพารามิเตอร์ K'

TNI

ตาราง ง.1 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC2B.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC2B.1	1-1	0.07	0.06	0.01
AC2B.1	1-2	0.05	0.04	0.01
AC2B.1	1-3	0.03	0.03	0.00
AC2B.1	1-4	0.04	0.03	0.01
AC2B.1	1-5	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	1-6	0.04	0.03	0.01
AC2B.1	1-7	0.14	0.12	0.02
AC2B.1	1-8	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	1-9	0.08	0.06	0.02
AC2B.1	2-1	0.08	0.07	0.01
AC2B.1	2-2	0.10	0.08	0.02
AC2B.1	2-3	0.22	0.19	0.03
AC2B.1	2-4	0.09	0.07	0.02
AC2B.1	2-5	0.12	*	*
AC2B.1	2-6	0.05	0.04	0.01
AC2B.1	2-7	0.23	0.19	0.04
AC2B.1	2-8	0.09	0.08	0.01
AC2B.1	2-9	0.02	0.02	0.00
AC2B.1	3-1	0.03	0.03	0.00
AC2B.1	3-2	0.04	0.03	0.01
AC2B.1	3-3	0.05	*	*
AC2B.1	3-4	0.04	0.03	0.01
AC2B.1	3-5	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	3-6	0.04	0.04	0.00
AC2B.1	3-7	0.04	0.03	0.01
AC2B.1	3-8	0.06	*	*
AC2B.1	3-9	0.04	0.03	0.01
AC2B.1	4-1	0.08	0.07	0.01
AC2B.1	4-2	0.08	0.07	0.01
AC2B.1	4-3	0.06	*	*
AC2B.1	4-4	0.08	*	*
AC2B.1	4-5	0.07	0.08	-0.01
AC2B.1	4-6	0.16	*	*
AC2B.1	4-7	0.08	0.09	-0.01
AC2B.1	4-8	0.09	*	*
AC2B.1	4-9	0.13	*	*
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.07	0.06	14.29
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.071	0.061	14.070

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.2 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC3A.2

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC3A.2	1-1	0.00	0.01	-0.01
AC3A.2	1-2	0.00	0.02	-0.02
AC3A.2	1-3	0.02	0.04	-0.02
AC3A.2	1-4	0.04	0.06	-0.02
AC3A.2	1-5	0.05	0.07	-0.02
AC3A.2	1-6	0.03	0.05	-0.02
AC3A.2	1-7	0.08	*	*
AC3A.2	1-8	0.16	*	*
AC3A.2	1-9	0.08	*	*
AC3A.2	2-1	0.06	*	*
AC3A.2	2-2	0.03	*	*
AC3A.2	2-3	0.03	*	*
AC3A.2	2-4	0.07	*	*
AC3A.2	2-5	0.11	*	*
AC3A.2	2-6	0.06	*	*
AC3A.2	2-7	0.08	*	*
AC3A.2	2-8	0.09	*	*
AC3A.2	2-9	0.09	*	*
AC3A.2	3-1	0.02	*	*
AC3A.2	3-2	0.13	*	*
AC3A.2	3-3	0.22	*	*
AC3A.2	3-4	0.04	0.03	0.01
AC3A.2	3-5	0.06	0.04	0.02
AC3A.2	3-6	0.10	0.08	0.02
AC3A.2	3-7	0.13	*	*
AC3A.2	3-8	0.07	0.05	0.02
AC3A.2	3-9	0.07	0.04	0.03
AC3A.2	4-1	0.34	*	*
AC3A.2	4-2	0.16	*	*
AC3A.2	4-3	0.14	*	*
AC3A.2	4-4	0.15	*	*
AC3A.2	4-5	0.08	*	*
AC3A.2	4-6	0.05	0.05	0.00
AC3A.2	4-7	0.02	0.01	0.01
AC3A.2	4-8	0.02	0.02	0.00
AC3A.2	4-9	0.00	0.00	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.04	0.04	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.038	0.038	0.000

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.3 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4A.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4A.1	1-1	0.04	0.07	-0.03
AC4A.1	1-2	0.02	0.05	-0.03
AC4A.1	1-3	0.22	0.23	-0.01
AC4A.1	1-4	0.08	0.11	-0.03
AC4A.1	1-5	0.13	0.16	-0.03
AC4A.1	1-6	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	1-7	0.03	0.05	-0.02
AC4A.1	1-8	0.04	0.06	-0.02
AC4A.1	1-9	0.02	0.04	-0.02
AC4A.1	2-1	0.03	0.05	-0.02
AC4A.1	2-2	0.04	0.05	-0.01
AC4A.1	2-3	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	2-4	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	2-5	0.02	0.03	-0.01
AC4A.1	2-6	0.03	0.06	-0.03
AC4A.1	2-7	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	2-8	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	2-9	0.04	0.07	-0.03
AC4A.1	3-1	0.54	0.59	-0.05
AC4A.1	3-2	0.27	0.29	-0.02
AC4A.1	3-3	0.03	0.06	-0.03
AC4A.1	3-4	0.02	0.04	-0.02
AC4A.1	3-5	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	3-6	0.03	0.07	-0.04
AC4A.1	3-7	0.05	0.09	-0.04
AC4A.1	3-8	0.01	0.03	-0.02
AC4A.1	3-9	0.19	0.23	-0.04
AC4A.1	4-1	0.05	0.10	-0.06
AC4A.1	4-2	0.05	0.10	-0.05
AC4A.1	4-3	0.04	0.07	-0.03
AC4A.1	4-4	0.03	0.05	-0.02
AC4A.1	4-5	0.04	0.07	-0.03
AC4A.1	4-6	0.03	0.06	-0.03
AC4A.1	4-7	0.01	0.02	-0.01
AC4A.1	4-8	0.02	0.03	-0.01
AC4A.1	4-9	0.01	0.02	-0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.06	0.09	-50.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.062	0.085	-38.288

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.4 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4B.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4B.1	1-1	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	1-2	0.00	0.01	-0.01
AC4B.1	1-3	0.00	0.01	-0.01
AC4B.1	1-4	0.07	0.08	-0.01
AC4B.1	1-5	0.02	0.02	0.00
AC4B.1	1-6	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	1-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	1-8	0.05	0.05	0.00
AC4B.1	1-9	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-1	0.01	0.02	-0.01
AC4B.1	2-2	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-3	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-4	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-5	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-6	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-8	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	2-9	0.07	0.07	0.00
AC4B.1	3-1	0.01	0.02	-0.01
AC4B.1	3-2	0.01	0.02	-0.01
AC4B.1	3-3	0.01	0.02	-0.01
AC4B.1	3-4	0.03	0.03	0.00
AC4B.1	3-5	0.02	0.01	0.01
AC4B.1	3-6	0.12	0.12	0.00
AC4B.1	3-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-8	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	3-9	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-1	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-2	0.02	0.03	-0.01
AC4B.1	4-3	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-4	0.04	0.05	-0.01
AC4B.1	4-5	0.01	0.02	-0.01
AC4B.1	4-6	0.03	0.03	0.00
AC4B.1	4-7	0.01	0.01	0.00
AC4B.1	4-8	0.04	0.04	0.00
AC4B.1	4-9	0.02	0.01	-0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.02	0.02	0.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.021	0.023	-10.667

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.5 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4C.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4C.1	1-1	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	1-2	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	1-3	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	1-4	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	1-5	0.02	0.00	0.02
AC4C.1	1-6	0.05	*	*
AC4C.1	1-7	0.09	0.04	0.05
AC4C.1	1-8	0.06	0.03	0.03
AC4C.1	1-9	0.03	0.01	0.02
AC4C.1	2-1	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	2-2	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	2-3	0.06	0.02	0.04
AC4C.1	2-4	0.05	0.02	0.03
AC4C.1	2-5	0.07	0.04	0.03
AC4C.1	2-6	0.06	0.01	0.05
AC4C.1	2-7	0.01	0.01	0.00
AC4C.1	2-8	0.03	0.02	0.01
AC4C.1	2-9	0.04	0.02	0.02
AC4C.1	3-1	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	3-2	0.09	0.07	0.02
AC4C.1	3-3	0.07	0.03	0.04
AC4C.1	3-4	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	3-5	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	3-6	0.02	0.00	0.02
AC4C.1	3-7	0.00	0.00	0.00
AC4C.1	3-8	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	3-9	0.04	*	*
AC4C.1	4-1	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	4-2	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	4-3	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	4-4	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	4-5	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	4-6	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	4-7	0.01	0.00	0.01
AC4C.1	4-8	0.02	0.01	0.01
AC4C.1	4-9	0.04	0.02	0.02
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.03	0.01	66.67
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.029	0.014	53.704

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.6 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4CHV.2

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4CHV.2	1-1	0.03	0.02	0.01
AC4CHV.2	1-2	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	1-3	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	1-4	0.47	0.42	0.04
AC4CHV.2	1-5	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	1-6	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	1-7	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	1-8	0.02	0.01	0.01
AC4CHV.2	1-9	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	2-1	0.06	0.04	0.02
AC4CHV.2	2-2	0.06	0.04	0.02
AC4CHV.2	2-3	0.06	0.04	0.02
AC4CHV.2	2-4	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	2-5	0.02	0.01	0.01
AC4CHV.2	2-6	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	2-7	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	2-8	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	2-9	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-1	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	3-2	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	3-3	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	3-4	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-5	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-6	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	3-7	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	3-8	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	3-9	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-1	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	4-2	0.01	0.01	0.00
AC4CHV.2	4-3	0.01	0.00	0.01
AC4CHV.2	4-4	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-5	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-6	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-7	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-8	0.00	0.00	0.00
AC4CHV.2	4-9	0.00	0.00	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.03	0.02	33.33
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.025	0.019	26.374

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.7 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC4D.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC4D.1	1-1	0.12	*	*
AC4D.1	1-2	0.36	*	*
AC4D.1	1-3	0.17	*	*
AC4D.1	1-4	0.40	*	*
AC4D.1	1-5	0.28	*	*
AC4D.1	1-6	0.27	*	*
AC4D.1	1-7	0.81	*	*
AC4D.1	1-8	0.56	*	*
AC4D.1	1-9	0.43	*	*
AC4D.1	2-1	0.01	0.00	0.01
AC4D.1	2-2	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	2-3	0.06	*	*
AC4D.1	2-4	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	2-5	0.03	0.02	0.01
AC4D.1	2-6	0.02	0.01	0.01
AC4D.1	2-7	0.03	0.02	0.01
AC4D.1	2-8	0.10	*	*
AC4D.1	2-9	0.02	0.02	0.00
AC4D.1	3-1	0.11	*	*
AC4D.1	3-2	0.08	0.05	0.03
AC4D.1	3-3	0.04	0.02	0.02
AC4D.1	3-4	0.03	0.01	0.02
AC4D.1	3-5	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	3-6	0.02	0.01	0.01
AC4D.1	3-7	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	3-8	0.00	0.01	-0.01
AC4D.1	3-9	0.00	0.00	0.00
AC4D.1	4-1	0.75	*	*
AC4D.1	4-2	0.15	0.08	0.07
AC4D.1	4-3	0.07	0.04	0.03
AC4D.1	4-4	0.04	0.02	0.02
AC4D.1	4-5	0.07	0.04	0.03
AC4D.1	4-6	0.04	0.02	0.02
AC4D.1	4-7	0.00	0.00	0.00
AC4D.1	4-8	0.01	0.01	0.00
AC4D.1	4-9	0.01	0.01	0.00
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.03	0.02	33.33
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.031	0.019	39.437

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.8 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC7A.1

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC7A.1	1-1	1.68	0.57	1.11
AC7A.1	1-2	1.11	0.51	0.60
AC7A.1	1-3	0.81	0.38	0.43
AC7A.1	1-4	1.90	0.85	1.05
AC7A.1	1-5	1.01	0.51	0.50
AC7A.1	1-6	1.08	0.47	0.61
AC7A.1	1-7	1.27	*	*
AC7A.1	1-8	0.92	0.42	0.50
AC7A.1	1-9	0.69	0.36	0.33
AC7A.1	2-1	0.38	0.21	0.17
AC7A.1	2-2	0.55	0.45	0.10
AC7A.1	2-3	0.73	0.34	0.39
AC7A.1	2-4	0.52	0.30	0.22
AC7A.1	2-5	0.93	0.48	0.45
AC7A.1	2-6	1.15	0.58	0.57
AC7A.1	2-7	1.13	0.57	0.56
AC7A.1	2-8	1.21	0.65	0.56
AC7A.1	2-9	1.68	0.86	0.82
AC7A.1	3-1	0.80	0.49	0.31
AC7A.1	3-2	0.42	0.25	0.17
AC7A.1	3-3	0.33	0.19	0.14
AC7A.1	3-4	0.36	0.25	0.11
AC7A.1	3-5	0.26	0.30	-0.04
AC7A.1	3-6	0.24	0.24	0.00
AC7A.1	3-7	0.20	0.16	0.04
AC7A.1	3-8	0.23	0.19	0.04
AC7A.1	3-9	0.31	*	*
AC7A.1	4-1	0.97	0.45	0.52
AC7A.1	4-2	0.64	0.38	0.26
AC7A.1	4-3	0.42	0.25	0.17
AC7A.1	4-4	0.39	0.27	0.12
AC7A.1	4-5	0.26	0.18	0.08
AC7A.1	4-6	0.31	0.20	0.11
AC7A.1	4-7	0.34	0.23	0.11
AC7A.1	4-8	0.20	0.14	0.06
AC7A.1	4-9	0.48	0.31	0.17
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.72	0.38	47.22
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.716	0.382	46.609

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.9 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC8A.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC8A.1	1-1	0.08	0.07	0.01
AC8A.1	1-2	0.07	0.05	0.02
AC8A.1	1-3	0.13	0.13	0.00
AC8A.1	1-4	0.08	0.08	0.00
AC8A.1	1-5	0.58	0.55	0.03
AC8A.1	1-6	0.16	0.13	0.03
AC8A.1	1-7	0.74	0.73	0.01
AC8A.1	1-8	0.19	0.14	0.05
AC8A.1	1-9	0.22	0.19	0.03
AC8A.1	2-1	0.09	0.08	0.01
AC8A.1	2-2	0.08	0.07	0.01
AC8A.1	2-3	0.11	0.09	0.02
AC8A.1	2-4	0.07	0.05	0.02
AC8A.1	2-5	0.11	0.09	0.02
AC8A.1	2-6	0.09	0.06	0.03
AC8A.1	2-7	0.07	0.06	0.01
AC8A.1	2-8	0.16	0.13	0.03
AC8A.1	2-9	0.15	0.10	0.05
AC8A.1	3-1	0.05	0.04	0.01
AC8A.1	3-2	0.05	0.05	0.00
AC8A.1	3-3	0.05	0.03	0.02
AC8A.1	3-4	0.04	0.03	0.01
AC8A.1	3-5	0.06	0.05	0.01
AC8A.1	3-6	0.06	0.05	0.01
AC8A.1	3-7	0.04	0.04	0.00
AC8A.1	3-8	0.06	0.06	0.00
AC8A.1	3-9	0.09	0.07	0.02
AC8A.1	4-1	0.04	0.02	0.02
AC8A.1	4-2	0.05	0.03	0.02
AC8A.1	4-3	0.04	0.03	0.01
AC8A.1	4-4	0.07	0.05	0.02
AC8A.1	4-5	0.06	0.05	0.01
AC8A.1	4-6	0.04	0.04	0.00
AC8A.1	4-7	0.05	0.04	0.01
AC8A.1	4-8	0.05	0.04	0.01
AC8A.1	4-9	0.08	0.07	0.01
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.12	0.11	8.33
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.116	0.100	13.702

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.10 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC8A.2

เกรดคอนกรีต	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC8A.2	1-1	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	1-2	0.01	0.02	-0.01
AC8A.2	1-3	0.03	0.06	-0.03
AC8A.2	1-4	0.02	0.05	-0.03
AC8A.2	1-5	0.03	0.07	-0.04
AC8A.2	1-6	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	1-7	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	1-8	0.02	0.06	-0.04
AC8A.2	1-9	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	2-1	0.05	0.09	-0.04
AC8A.2	2-2	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	2-3	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	2-4	0.01	0.02	-0.01
AC8A.2	2-5	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	2-6	0.02	0.05	-0.03
AC8A.2	2-7	0.03	0.05	-0.02
AC8A.2	2-8	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	2-9	0.03	0.06	-0.03
AC8A.2	3-1	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	3-2	0.01	0.02	-0.01
AC8A.2	3-3	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	3-4	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	3-5	0.01	0.02	-0.01
AC8A.2	3-6	0.01	0.01	0.00
AC8A.2	3-7	0.01	0.02	-0.01
AC8A.2	3-8	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	3-9	0.02	0.03	-0.01
AC8A.2	4-1	0.03	0.05	-0.02
AC8A.2	4-2	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	4-3	0.02	0.05	-0.03
AC8A.2	4-4	0.05	0.09	-0.04
AC8A.2	4-5	0.04	0.08	-0.04
AC8A.2	4-6	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	4-7	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	4-8	0.02	0.04	-0.02
AC8A.2	4-9	0.03	0.07	-0.04
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.02	0.04	-100.00
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.021	0.041	-90.909

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.11 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC9A.1

เกรตอลูมิเนียมอัลลอยด์	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่า ความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC9A.1	1-1	0.02	*	*
AC9A.1	1-2	0.05	0.05	0.00
AC9A.1	1-3	0.07	0.09	-0.02
AC9A.1	1-4	0.05	*	*
AC9A.1	1-5	0.07	0.09	-0.02
AC9A.1	1-6	0.12	0.15	-0.03
AC9A.1	1-7	0.07	0.07	0.00
AC9A.1	1-8	0.09	*	*
AC9A.1	1-9	0.08	*	*
AC9A.1	2-1	0.04	0.06	-0.02
AC9A.1	2-2	0.09	0.09	0.00
AC9A.1	2-3	0.04	*	*
AC9A.1	2-4	0.07	0.08	-0.01
AC9A.1	2-5	0.09	*	*
AC9A.1	2-6	0.03	0.05	-0.02
AC9A.1	2-7	0.05	0.04	0.01
AC9A.1	2-8	0.04	*	*
AC9A.1	2-9	0.03	*	*
AC9A.1	3-1	0.03	0.02	0.01
AC9A.1	3-2	0.09	*	*
AC9A.1	3-3	0.02	*	*
AC9A.1	3-4	0.03	0.02	0.01
AC9A.1	3-5	0.03	*	*
AC9A.1	3-6	0.04	*	*
AC9A.1	3-7	0.08	0.08	0.00
AC9A.1	3-8	0.04	0.07	-0.03
AC9A.1	3-9	0.02	*	*
AC9A.1	4-1	0.04	*	*
AC9A.1	4-2	0.03	*	*
AC9A.1	4-3	0.06	*	*
AC9A.1	4-4	0.04	*	*
AC9A.1	4-5	0.04	*	*
AC9A.1	4-6	0.04	*	*
AC9A.1	4-7	0.08	*	*
AC9A.1	4-8	0.02	*	*
AC9A.1	4-9	0.03	*	*
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.06	0.07	-16.67
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.060	0.069	-14.286

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้

ตาราง ง.12 ผลการทวนสอบผลการทดลอง ด้วยค่าพารามิเตอร์ K' เกรด AC9B.1

เกรดคอนกรีตอัดแรง	ตำแหน่ง	ซอฟต์แวร์ ISIT (Pixel)	ซอฟต์แวร์ประมาณค่าความพรุน (Pixel)	ความแตกต่าง
AC9B.1	1-1	0.09	0.05	0.04
AC9B.1	1-2	0.08	0.04	0.04
AC9B.1	1-3	0.08	0.05	0.03
AC9B.1	1-4	0.08	0.03	0.05
AC9B.1	1-5	0.08	0.04	0.04
AC9B.1	1-6	0.07	0.04	0.03
AC9B.1	1-7	0.15	0.09	0.06
AC9B.1	1-8	0.07	0.03	0.04
AC9B.1	1-9	0.07	0.03	0.04
AC9B.1	2-1	0.13	0.07	0.06
AC9B.1	2-2	0.19	0.11	0.08
AC9B.1	2-3	0.19	0.11	0.08
AC9B.1	2-4	0.20	0.09	0.11
AC9B.1	2-5	0.19	0.10	0.09
AC9B.1	2-6	0.33	0.17	0.16
AC9B.1	2-7	0.40	0.20	0.20
AC9B.1	2-8	0.30	0.14	0.16
AC9B.1	2-9	0.38	0.23	0.15
AC9B.1	3-1	0.35	0.21	0.14
AC9B.1	3-2	0.27	0.12	0.15
AC9B.1	3-3	0.25	0.14	0.11
AC9B.1	3-4	0.18	0.09	0.09
AC9B.1	3-5	0.28	0.15	0.13
AC9B.1	3-6	0.22	0.13	0.09
AC9B.1	3-7	0.14	0.08	0.06
AC9B.1	3-8	0.17	0.08	0.09
AC9B.1	3-9	0.16	0.07	0.09
AC9B.1	4-1	0.34	0.24	0.10
AC9B.1	4-2	0.15	0.08	0.07
AC9B.1	4-3	0.20	0.15	0.05
AC9B.1	4-4	0.19	0.10	0.09
AC9B.1	4-5	0.20	0.10	0.10
AC9B.1	4-6	0.13	0.07	0.06
AC9B.1	4-7	0.09	0.03	0.06
AC9B.1	4-8	0.06	0.02	0.04
AC9B.1	4-9	0.05	0.02	0.03
%Error (2 ตำแหน่ง)		0.18	0.10	44.44
%Error (3 ตำแหน่ง)		0.181	0.097	46.237

*เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถนำภาพต้นแบบมาประมวลผลได้