

การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์
ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการติดตามสภาพเครื่องจักร

นายพีระวัตร นันวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ISBN 974-19-0810-5
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายพีระวัตร นันทวงศ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์
ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการติดตามสภาพเครื่องจักร
สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ราชภูริบุญ
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การศึกษาลักษณะของอนุภาคการสีกหรือสามารถใช้เป็นวิธีตรวจสอบติดตามการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนเครื่องกลประเภทหมุนที่หล่อลื่นด้วยน้ำมัน อนุภาคการสีกหรือสามารถศึกษาได้โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถวัดค่าเชิงตัวเลขที่แสดงถึงลักษณะรูปร่าง เช่น แบบเป็นเส้น แบบผิวดก หรือแบบทรงกลม ลักษณะพื้นผิวซึ่งอาจมีลักษณะหยาบ เรียบ หรือมีรอยขีดยาว และลักษณะสีของอนุภาค เช่น สีสนิมดำ สีทองแดงสีผิวไหม้ สีสนิมแดง หรือสีของเหล็ก ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกว่ามีความน่าเชื่อถือและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการตรวจพินิจด้วยตามนุษย์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบการศึกษาลักษณะรูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการกับอนุภาคการสีกหรือจากเครื่องจักรในอุตสาหกรรม กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาคการสีกหรือให้ค่าเชิงตัวเลขที่แสดงถึง ขนาด รูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และลักษณะสี

ผลการทดลองวิเคราะห์ค่าเชิงตัวเลขที่ได้ในวิธีทางสถิติหลายตัวแปรและวิธีโครงข่ายประสาทเทียม เมื่อเทียบกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ ในการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือให้ผลความถูกต้องของวิธีการจัดกลุ่มประมาณ 96.22 เปอร์เซ็นต์ วิธีการจำแนกกลุ่มประมาณ 88.65 เปอร์เซ็นต์และวิธีโครงข่ายประสาทเทียมประมาณ 98.81 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือให้ผลความถูกต้องของวิธีการจำแนกกลุ่ม ประมาณ 82.16 เปอร์เซ็นต์และวิธีโครงข่ายประสาทเทียมประมาณ 86.90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีการจัดกลุ่มจากค่าที่สกัดด้วยวิธีจีแอลซีเอ็มให้ผลความถูกต้องที่ค่อนข้างต่ำ การวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาคการสีกหรือให้ผลความถูกต้องของวิธีการจัดกลุ่มประมาณ 72.22 เปอร์เซ็นต์ วิธีการจำแนกกลุ่มประมาณ 91.35 เปอร์เซ็นต์ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียมประมาณ 93.67 เปอร์เซ็นต์ วิธีการเหล่านี้สามารถช่วยในการตัดสินใจแยกประเภทอนุภาคการสีกหรือ ซึ่งเป็นแนวทางที่ดีกว่าการพิจารณาด้วยตัวของบุคคล

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 307 หน้า)

คำสำคัญ : อนุภาคการสีกหรือ, การวิเคราะห์ภาพ, การติดตามสภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Peerawatt Nunwong
Thesis Title : Wear Particle Morphological Analysis-Utilization of Computer Image
Analysis Techniques for Machinery Condition Monitoring
Major Field : Production Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Dr.Surapol Raadnui
Academic Year : 2006

Abstract

Analysis of wear particle can be used to monitor possible failure mode in various machine elements, in particular rotating machine using lube oil. Image processing is one of reliable techniques to classify particle characteristic. Its result is more accurate and reliable than human eyes. Also, an error from human examination and cost of investigation are decreased.

Objective of this study was to compare characteristic of wear particles using lube oil from laboratory with industrial counterparts. Various types of wear particle such as those from fatigue, mild, and severe sliding including from cutting were identified by computer image processing. Wear particle images were characterized by their size, shape, surface texture, and particle color using numerical technique.

It was found that correct results from shape classification by clustering, discriminant, neural network were 96.22, 88.65, and 98.81%, respectively. Correct results from surface texture analysis by discriminant and neural network were 82.16 and 86.90%, respectively. However, result from surface texture analysis by clustering technique was not highly accurate. Correct result from analysis of particle color by clustering, discriminant, and neural network were 72.22, 91.35, and 93.67%, respectively. All these techniques could be used to identify characteristics of wear particles effectively, resulting in more reliable determination than human assessment.

(Total 307 pages)

Keywords : Wear particle, Image analysis, Condition monitoring

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ราชภูริ์นุ้ย ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวคิดและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมาก ตลอดจนกระตุ้นให้การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้มีความสมบูรณ์ ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ ทองผดุงโรจน์ ที่ได้ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ การติดตามสภาพเครื่องจักรและโทรโบลีย์ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต และเจ้าหน้าที่ที่เอื้อเฟื้อเครื่องทดสอบ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ Dr.Wayne Rasband หัวหน้านักวิจัย แห่ง National Institutes of Health, USA ผู้พัฒนาโปรแกรมที่กรุณาให้ความรู้ตอบข้อซักถามเกี่ยวกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายทางการแพทย์

ขอขอบคุณ Associate Professor Dr.Mryka Hall-Beyer แห่ง University of Calgary, Canada ที่กรุณาให้ความรู้ตอบข้อซักถามเกี่ยวกับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพ

ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีแก่ผู้วิจัยทุกครั้งและผู้วิจัยเขียนอีเมลล์ ไปถามขอความรู้

ขอกราบขอบพระคุณ มารดา ญาติพี่น้อง ที่อบรมสั่งสอนเลี้ยงดูให้การศึกษาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งสนับสนุนด้านการเงินและกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา ขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และบุคคลที่ไม่ได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

คุณประโยชน์ ที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชา แต่ มารดา ญาติพี่น้อง ครูอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ เป็นพลังในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

พีระวัตร นันวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 บทความวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 การติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องกล	4
2.3 วิธีการทดสอบวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	9
2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้อนุภาคการสึกหรอ	20
2.5 กลไกการสึกหรอของวัสดุ	25
2.6 การหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่น	37
2.7 เครื่องทดสอบทางไทรโบโลยี	41
2.8 การวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์	44
2.9 การวิเคราะห์ทางสถิติหลายตัวแปร	58
2.10 โครงข่ายประสาทเทียม	61
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย	71
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	71
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	73
3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้อนุภาคการสึกหรอ	75
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	85
4.1 ห้อนุภาคการสึกหรอจากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิกล์	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง (ต่อ)	85
4.2 ตัวอย่างภาพถ่ายอนุภาคการสีกหรือ	88
4.3 ผลการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจัดกลุ่ม	88
4.4 ผลการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	93
4.5 ผลการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	95
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการการวิจัย และข้อเสนอแนะ	105
5.1 อภิปรายผลการการวิจัย	105
5.2 สรุปผลการวิจัย	106
5.3 ข้อเสนอแนะ	109
เอกสารอ้างอิง	111
ภาคผนวก ก	115
มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	116
ภาคผนวก ข	121
ข้อมูลอนุภาคการสีกหรือ	122
ภาคผนวก ค	137
การวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือ	138
ประวัติผู้วิจัย	307

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 คุณลักษณะของระบบเฟืองะวังและเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น	9
2-2 การวิเคราะห์ค่าหมายเลขคลื่นของ FTIR	18
2-3 คุณลักษณะของเทคนิคการตรวจสอบด้วยสเปกโตรมิเตอร์	19
2-4 คุณลักษณะของวิธีการติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องกลแบบต่างๆ	24
2-5 แหล่งที่มาของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	34
2-6 ค่าเชิงตัวเลขของฟิกเชล	44
3-1 คุณสมบัติของลูกบอลที่ใช้ทดลอง RB 12.7 ยี่ห้อ SKF (AISI 52100)	74
3-2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง	74
3-3 การทดลองการสึกหรอบนเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์	74
4-1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ลักษณะรูปร่างอนุภาคการสึกหรอ	103
4-2 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอ	103
4-3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ลักษณะสัณฐานอนุภาคการสึกหรอ	104
ข-1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	122
ข-2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	127
ข-3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	132
ค-1 ข้อมูลภาพตัวอย่าง	138
ค-2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	169
ค-3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	200
ค-4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	231
ค-5 ผลการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	262
ค-6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	276
ค-7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	290

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 อุปกรณ์วัดสัญญาณความลั่นสะเทือน	5
2-2 อุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูง	5
2-3 กล้องถ่ายภาพความร้อน	6
2-4 ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิมอเตอร์	7
2-5 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์	7
2-6 ระบบการแผ่รังสีและเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น	8
2-7 เครื่องตรวจนับอนุภาคแบบอัตโนมัติ	10
2-8 ระดับความสะอาดน้ำมันตามมาตรฐาน ISO 4406 : 1999	10
2-9 หลักการวัดความหนืดคิเนมาติก ASTM D445 : 1997	11
2-10 หลักการทดสอบอาร์พีวอท	13
2-11 หลักการของแอปซอพชั่นสเปคโตรมิเตอร์	14
2-12 หลักการของอิมิสชันสเปคโตรมิเตอร์แบบ RDE	15
2-13 หลักการของอิมิสชันสเปคโตรมิเตอร์แบบ ICP	16
2-14 หลักการของเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปคโตรมิเตอร์	17
2-15 หลักการ FTIR สเปคโตรมิเตอร์	18
2-16 ลักษณะของสัญญาณจากการวัด FTIR	19
2-17 หลักการของปลั๊กแม่เหล็ก	21
2-18 หลักการเฟอโรกราฟี	21
2-19 หลักการแผ่นสไลด์เฟอโรแกรม	22
2-20 หลักการของเลเซอร์เน็ตไฟน์	23
2-21 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด	25
2-22 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด	26
2-23 ลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด	27
2-24 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว	27
2-25 ลักษณะการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี	28
2-26 ลักษณะการสึกหรอแบบพ่นปะทะในอุปกรณ์วาล์วนิวแมติกส์	29
2-27 กลไกการสึกหรอแบบโพรงอากาศ	29
2-28 กลไกการสึกหรอเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-29 กลไกการลึกรหรือจากการเกิดออกไซด์	31
2-30 กลไกการลึกรหรือจากการกระแทก	31
2-31 อนุภาคการลึกรหรือแบบปกติ	32
2-32 อนุภาคการลึกรหรือจากการยึดติดแบบรุนแรง	32
2-33 อนุภาคการลึกรหรือแบบขูดขีด	33
2-34 อนุภาคการลึกรหรือแบบล้าตัวจากการลึงและการลื่นไถล	34
2-35 อนุภาคการลึกรหรือจากการล้าตัวแบบเป็นก้อน	34
2-36 อนุภาคการลึกรหรือจากการล้าตัวแบบทรงกลม	34
2-37 อนุภาคการลึกรหรือจากการล้าตัวแบบเป็นแผ่น	35
2-38 เส้นโค้งสไตรเบ็ค	37
2-39 การหล่อลื่นแบบแห้ง	38
2-40 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี	38
2-41 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสม	39
2-42 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก	40
2-43 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก	41
2-44 การทดสอบแบบทิมเคน	42
2-45 การทดสอบแบบโฟร์บอล	42
2-46 การทดสอบฟาเล็กซ์แบบวืบล็อก	43
2-47 การทดสอบแบบพินออนดิกส์	44
2-48 ส่วนประกอบของระบบกระบวนการวิเคราะห์ภาพดิจิทัล	44
2-49 ขั้นตอนของกระบวนการวิเคราะห์ภาพทั่วไป	47
2-50 หลักการวิเคราะห์พื้นที่	47
2-51 หลักการจุดภาพทแยงมุม	48
2-52 หลักการวิเคราะห์วงกลมเฟอร์รี่	49
2-53 หลักการวิเคราะห์อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว	50
2-54 ทิศทางในการวิเคราะห์จีแอลซีเอ็ม	51
2-55 การกำหนดค่าระดับสีเทา 2 บิต	51
2-56 การดูดกลืนแสงของแม่สีในตามนุษย์	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-57 ระบบโคออดิเนตของสี่	55
2-58 โมเดลสี่	55
2-59 ไดอะแกรมไฮโครเมตริกการดูดกลืนสี่	56
2-60 แผนภูมิวงกลมสี่สันมาตรฐาน	57
2-61 โมเดลสี่เอชเอสไอ	57
2-62 โมเดลสี่แอลเอบี	58
2-63 ระยะยูคลิด	59
2-64 การโยงเส้นด้วยระยะยูคลิด	60
2-65 ระยะสแควร์ยูคลิด	61
2-66 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสัญญาณภายในนิวรอล	63
2-67 โครงสร้างของเพอร์เซ็ปตรอน	64
2-68 โครงสร้างของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน	65
2-69 พิสัยข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน	66
2-70 โครงสร้างมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนชนิดวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ	67
3-1 ขั้นตอนการวิจัยการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือ	72
3-2 เครื่องทดสอบการสีกหรือแบบพินออนดิสก์	73
3-3 กล้องจุลทรรศน์พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วงกับเครื่องคอมพิวเตอร์	73
3-4 กระบวนการทางภาพของการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือ	75
3-5 ตัวอย่างไฟล์รูปภาพที่นำมาวิเคราะห์	76
3-6 ตัวอย่างการตัดภาพ	76
3-7 ตัวอย่างการแปลงภาพ	76
3-8 หน้าต่างเครื่องมือสำหรับการสอบเทียบสเกล	77
3-9 หน้าต่างอิมเมจเทรตไซดิง	78
3-10 ตัวอย่างภาพจากการอิมเมจเทรตไซดิง	78
3-11 หน้าต่างผลการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือ	78
3-12 หน้าต่างเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือ	79
3-13 หน้าต่างผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือ	79
3-14 การกำหนดของเขตการวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาคการสีกหรือ	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-15 หน้าต่างผลการวิเคราะห์ลักษณะสื่ออนุภาคการสีกหรือ	80
3-16 ตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลภาพอนุภาคการสีกหรือ	81
4-1 อนุภาคการสีกหรือจากเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ ใช้เวลา 15 นาที	86
4-2 อนุภาคการสีกหรือจากเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ ใช้เวลา 25 นาที	86
4-3 อนุภาคการสีกหรือจากเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ ใช้เวลา 5 นาที	87
4-4 กราฟเดโนโตแกรมการจัดกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสีกหรือ	89
4-5 ตัวอย่างรูปร่างอนุภาคการสีกหรือกลุ่ม ก	90
4-6 ตัวอย่างรูปร่างอนุภาคการสีกหรือกลุ่ม ข	90
4-7 ตัวอย่างรูปร่างอนุภาคการสีกหรือกลุ่ม ค	90
4-8 กราฟเดโนโตแกรมการจัดกลุ่มลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือ	91
4-9 กราฟเดโนโตแกรมการจัดกลุ่มลักษณะสื่ออนุภาคการสีกหรือ	92
4-10 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจัดกลุ่ม	93
4-11 การวิเคราะห์สื่ออนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจัดกลุ่ม	93
4-12 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	94
4-13 การวิเคราะห์พื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	95
4-14 การวิเคราะห์สื่ออนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม	95
4-15 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	96
4-16 การวิเคราะห์พื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	97
4-17 การวิเคราะห์สื่ออนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม	97
4-18 การแบ่งแยกลักษณะรูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยสามตัวแปร	98
4-19 การแบ่งแยกลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยสามตัวแปร	98
4-20 การแบ่งแยกลักษณะสื่ออนุภาคการสีกหรือด้วยสามตัวแปร	99
4-21 การแบ่งแยกลักษณะรูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยสองตัวแปร	99
4-22 การแบ่งแยกลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยสองตัวแปร	100
4-23 การแบ่งแยกลักษณะสื่ออนุภาคการสีกหรือด้วยสองตัวแปร	100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาวិเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสึกหรอในสารหล่อลื่นที่ใช้แล้ว สำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ เช่น เพือง ร่องลื่น ฯลฯ รูปร่างลักษณะอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับจุดสัมผัส ลักษณะการเคลื่อนที่ วัสดุ การหล่อลื่น อุณหภูมิ เป็นต้น [9], [10] การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสึกหรอที่สามารถที่จะบ่งบอกถึงกลไกการสึกหรอ (Wear Mechanisms) จะทำให้สามารถทราบได้ว่าชิ้นส่วนอะไรเกิดการชำรุดเสียหายมีความรุนแรงระดับใด ทำให้สามารถประเมินสาเหตุที่ทำให้เกิดการชำรุดเสียหายได้ เพื่อการป้องกันและแก้ไขอย่างมีประสิทธิภาพ หากเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ความสั่นสะเทือน การวิเคราะห์คลื่นเสียงความถี่สูง การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเหล่านี้ ทำให้ทราบเพียงระดับความรุนแรงเท่านั้นไม่สามารถบ่งชี้ว่าชิ้นส่วนใดเกิดการชำรุดเสียหายในกรณีที่อุปกรณ์ใช้สารหล่อลื่นร่วมกัน อาทิเช่น กระปุกเพืองทด ระบบการหล่อลื่นในระบบแก๊ซเทอร์ไบน์ เป็นต้น

การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสึกหรอ เพื่อพิจารณาว่าเกิดจากกลไกการสึกหรอแบบใดซึ่งจะถูกกำหนดจากประสบการณ์ ความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญทางทริบोलยี (Tribologists) สำหรับประเทศไทยผู้เชี่ยวชาญทางด้านทริบोलยีมีน้อยและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ผลมีจำกัด [11] ทำให้การวิเคราะห์ที่ใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง แนวทางในการแก้ปัญหานี้คือใช้หลักการ การวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาคการสึกหรอด้วยการประยุกต์ใช้และปรับปรุงซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ภาพทั่วไป หรือที่เรียกว่า คอมพิวเตอร์อิมเมจโปรเซสซิง (Computer Image Processing) สามารถที่จะวิเคราะห์ รูปร่าง พื้นที่ เส้นรอบรูป สี พื้นผิว เป็นต้น เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการที่จะพิจารณารูปแบบการสึกหรอ (Wear Modes) ซึ่งจะนำไปสู่กลไกการสึกหรอ (Wear Mechanisms) ข้อมูลที่ได้เหล่านี้เป็นค่าเชิงตัวเลขเป็นลักษณะข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือและทั่วโลกให้การยอมรับเป็นการลดค่าใช้จ่ายจากการวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญและลดความผิดพลาด (Human error) จากการวิเคราะห์ด้วยสายตาของบุคคลที่อาจจะเกิดขึ้นได้ [1], [9], [10], [12] ดังนั้นการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอด้วยการใช้หลักการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์เป็นทางเลือกหนึ่งในการประเมินรูปแบบลักษณะการสึกหรอของระบบเครื่องจักรในอุตสาหกรรมที่ใช้สารหล่อลื่น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ใช้หลักการในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะโหะจากการสึกหรอในสารหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อประเมินรูปแบบลักษณะการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

1.2.2 ประยุกต์ใช้และปรับปรุงซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพทั่วไปเพื่อวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 จำลองกลไกการสึกหรอ 2 แบบ คือ กลไกการสึกหรอแบบเส้นไถล กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด วิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอ แบบปกติและรุนแรง เพื่อศึกษาอนุภาคการสึกหรอในสภาวะหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่นและแบบไร้สารหล่อลื่น โดยใช้มัน้ำหล่อลื่น SAE 40 ในขอบเขตการหล่อลื่นแบบแห้ง ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ แบบพินออนดิสก์ (Pin-on-disc) ในขอบเขตการหล่อลื่นแบบแห้ง ใช้ภาระ 10 กิโลกรัม ความเร็ว 100 รอบ/นาที เวลา 5 นาที และในขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี ใช้เวลา 15 และ 25 นาที

1.3.2 ศึกษาลักษณะเศษโลหะที่เกิดขึ้น โดยพิจารณา พื้นที่ เส้นรอบรูป พื้นที่ผิว เส้นรอบรูปผิวดัดส่วนพื้นที่ ความกลม วงกลมเฟอร์เรท์ ลักษณะพื้นผิว ลักษณะสีอนุภาค ด้วยหลักการวิเคราะห์ภาพถ่ายแบบสองมิติทางคอมพิวเตอร์

1.3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าเชิงตัวเลขของลักษณะเศษโลหะ ด้วยกรรมวิธีทางสถิติหลายตัวแปรเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

1.3.4 วิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอจากการจำลองทางโทรโบลีย์เปรียบเทียบกับตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม โดยใช้ตัวอย่างจากการทดลองจำนวน 120 ตัวอย่าง และใช้ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมจำนวน 65 ตัวอย่าง

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1.4.1 เป็นแนวทางในการประเมินสภาพชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยใช้หลักการในการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอในน้ำมันใช้แล้ว เพื่อช่วยพัฒนาวิธีการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล

1.4.2 เป็นแนวทางในการใช้แยกชนิดอนุภาคการสึกหรอตามรูปแบบลักษณะของการสึกหรอเพื่อใช้ติดตามสภาพและบำรุงรักษาชิ้นส่วนเครื่องจักรกลได้อย่างเหมาะสม

1.4.3 สามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

บทที่ 2

บทความวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kirk, et al [1] ได้ศึกษาการตรวจวิเคราะห์หอนุภาคการสีกหรือด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นวิธีการติดตามสภาพเครื่องจักรกลและการวินิจฉัยข้อบกพร่อง การวิเคราะห์หอนุภาคการสีกหรือเป็นสิ่งที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม การวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์สามารถจะวิเคราะห์แทนผู้เชี่ยวชาญ โดยพิจารณาค่าเชิงตัวเลขของรูปร่าง เช่น พื้นที่ สัดส่วนความกว้างต่อความยาว (major and minor axis) เส้นขด (Curl) แฟคเตอร์รูปร่าง รูปทรง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนโค้งขอบอนุภาค (Curvature analysis) เป็นต้น สามารถจะวิเคราะห์แทนผู้เชี่ยวชาญได้ โดยมีความผิดพลาดน้อย

Xu, et al [2] ได้ศึกษาการจำแนกชนิดอนุภาคการสีกหรือ ด้วยค่าเชิงตัวเลขของรูปร่างอนุภาคการสีกหรือ ซึ่งแบ่งเป็น รูปทรงปกติ รูปทรงผิดปกติ รูปทรงกลม รูปร่างเป็นเส้น โดยพิจารณาจาก ลักษณะรูปร่าง, ขนาด สัดส่วนความกว้างต่อความยาว รูปทรง และเส้นรอบรูป ด้วยวิเคราะห์ส่วนโค้งขอบอนุภาค ซึ่งเป็นค่า เชิงรูปร่าง ลักษณะอื่นๆ เช่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานรูปร่าง ความเบ้

Peng, et al [3] ได้ศึกษาการวิเคราะห์หอนุภาคการสีกหรือ ด้วยวิธี ลักษณะขอบเขตรูปร่างของอนุภาค (Boundary Morphological) ประกอบด้วยการวิเคราะห์ ขนาด,การกระจายตัวของอนุภาค,ลักษณะรูปร่าง, ลักษณะเส้นรอบรูป เพื่อแยกอนุภาคการสีกหรือแบบปกติ , ล้าตัวทรงกลม,แบบเส้น และใช้วิธีการวิเคราะห์ แยกสีเงาของอนุภาคการสีกหรือ (Spectral Analysis) โดยใช้ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของอนุภาคการสีกหรือ ด้วยการจำลองการสีกหรือของกระปุกเฟืองทด

Umeda, et al [4] ได้ศึกษาวิเคราะห์หอนุภาคการสีกหรือจากการจำลองรูปแบบการสีกหรือด้วยเครื่องทดสอบแบบพินออนดิस्क และวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาคการสีกหรือจากกล้องจุลทรรศน์และจำแนกชนิดอนุภาคด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Self-organizing neural network) จากความสัมพันธ์ลักษณะอนุภาคการสีกหรือ อีกส่วนหนึ่งเป็นการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์เมตริกซ์ความเกี่ยวพัน (Co-occurrence matrix) โดยพิจารณาค่าเชิงตัวเลขของคอนทราสต์ และ โมเมนต์เชิงมุมอันดับสอง

Cho, et al [5] ได้ศึกษาการจัดกลุ่มอนุภาคการสีกหรือ จากการหาความสัมพันธ์ของค่าเชิงตัวเลข โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติหลายตัวแปร ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบชั้น (Hierarchical Clustering) ซึ่งพิจารณาอนุภาคการสีกหรือทั้งหมด 71 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม

Myshkin, et al [6] ได้ศึกษาการจำแนกชนิดอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีการแยกสี ด้วยโมเดลสีที่แปลงจากค่าอาร์จีบีเป็น ค่าสีสัน (H) ค่าความอิ่มตัวสี (S) ค่าความเข้มสี (I) เพื่อแยกลักษณะสีของสนิมดำ

สนิมแดง ทองแดงประสม และเศษโลหะ การใช้วิธีทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) จำแนกอนุภาคการสึกหรอ

Laghari, [7] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคการสึกหรอ ด้วยวิธีการวิเคราะห์เมตริกซ์ความเกี่ยวพัน (Co-occurrence matrix) โดยพิจารณาระดับสีเทา 4 ถึง 6 ระดับ ประกอบด้วยเมตริกซ์ 4x4, 5x5 และ 6x6 ซึ่งสามารถแยกอนุภาคการสึกหรอแบบรุนแรง (Severe wear) กับการสึกหรอแบบปกติได้

Myshkin, et al [8] ได้ศึกษาการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอด้วยหลักการวิเคราะห์ภาพ จากภาพถ่ายอนุภาคเศษโลหะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยใช้การวัดค่าเชิงตัวเลขของรูปร่างอนุภาคการสึกหรอ ด้วยค่าของ พื้นที่ รูปทรง ด้วยการนับจุดพิกเซล และการวัดเส้นรอบรูปด้วยการแปลงอนุกรมฟูเรียร์ รวมถึงการวิเคราะห์สีของอนุภาคด้วยความแตกต่างของเมสซี และใช้วิธีการทางสถิติและโครงข่ายประสาทเทียม พิจารณาแบ่งแยกชนิดอนุภาคการสึกหรอ

2.2 การติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องกล [13]

เนื่องจากการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนเครื่องกล อาทิเช่น ร่องลื่น เพือง ฯลฯ สิ่งเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรต่ำลง และอาจถึงขั้นต้องหยุดเครื่องจักร หากเครื่องจักรไม่สามารถผลิตสินค้าตามวัตถุประสงค์ได้ ย่อมจะสร้างความเสียหายต่อองค์กร การที่จะทำให้เครื่องจักรมีความพร้อมในการใช้งานอยู่เสมอ จำเป็นจะต้องนำเทคนิควิธีในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์หรือการบำรุงรักษาแบบการติดตามสภาพเข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อป้องกันการบำรุงรักษาแบบซ่อมเมื่อเสีย สำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่กล่าวมามีวิธีการหลายวิธีที่จะใช้เฝ้าระวังติดตามสภาพ ซึ่งในแต่ละวิธีการจะมีความขีดความสามารถ ประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน ในการเลือกใช้วิธีการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับค่าวัดที่ต้องการ โดยพิจารณาระดับความสำคัญของเครื่องจักร และงบประมาณ เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีวิธีการใดที่สรุปว่าดีที่สุด แต่การใช้หลายวิธีร่วมกันคงเป็นทางออกที่ดี

วิธีการติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องกลที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่ 1) การวัดความสั่นสะเทือน 2) คลื่นเสียงความถี่สูง 3) การวัดอุณหภูมิและสมรรถนะ 4) การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ 5) การวิเคราะห์สารหล่อลื่นใช้แล้ว

2.2.1 การวัดสัญญาณความสั่นสะเทือน (Vibration Analysis)

เครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่จะมีการสั่นสะเทือนตามสถานะของเครื่องจักร การที่จะทราบความผิดปกติที่เกิดขึ้น พิจารณาได้จากสัญญาณความสั่นสะเทือนที่ผิดไปจากเดิม ในการวัดค่าสัญญาณความสั่นสะเทือน 2 ทิศทาง คือ ในแนวแกนและแนวรัศมี โดยช่วงสัญญาณความสั่นสะเทือนจะอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ การวัดสัญญาณความสั่นสะเทือนนี้ใช้ในการตรวจจับหาความผิดปกติจากการชำรุดอย่างถาวรของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น การเยื้องศูนย์ของเพลา การล้าตัวของเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 2-1 อุปกรณ์วัดสัญญาณความสั่นสะเทือน

2.2.2 คลื่นเสียงความถี่สูง (Acoustic Emission)

การวัดสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของเนื้อวัสดุ เช่น การล้าตัวในเนื้อวัสดุ การเสียดสีของผิววัสดุ ฯลฯ มีช่วงความถี่ของสัญญาณที่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำให้สามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำเนื่องจากสามารถจัดคลื่นความถี่ต่ำที่เป็นสัญญาณรบกวน อุปกรณ์นี้ใช้โซ่อิเลคทริกเซนเซอร์ เป็นตัวจับสัญญาณและเก็บข้อมูลเข้าไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2-2 อุปกรณ์วัดสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูง

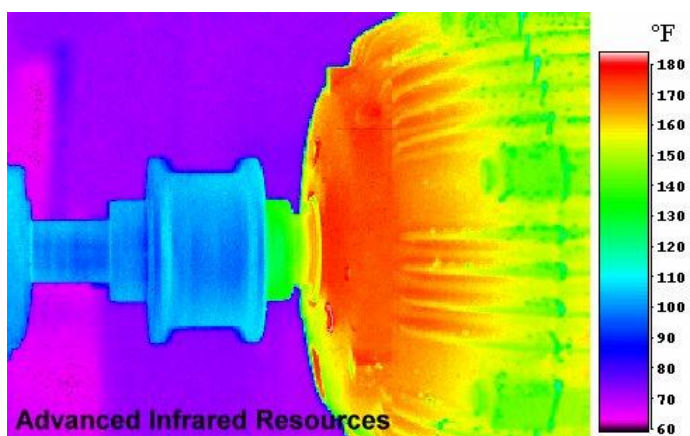
2.2.3 การวัดอุณหภูมิความร้อน (Thermography)

การเฝ้าระวังติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีการวัดอุณหภูมิ โดยการใช้มือสัมผัสบริเวณภายนอกตัวเรือนของกระปุกเฟืองทด ต่อกังตารองเพลลา ฯลฯ เป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายแต่ต้องอาศัยประสบการณ์ ความชำนาญของผู้ตรวจสอบ เพื่อลดความผิดพลาดจากวิธีการที่กล่าวมา ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจจับความร้อน โดยใช้การถ่ายภาพรังสีได้แดง ซึ่งเรียกว่า กล้องถ่ายภาพความร้อน

(Thermography) กล้องนี้ประกอบด้วยอินฟราเรดเซ็นเซอร์และจอแสดงภาพ ซึ่งจะรับสัญญาณความร้อนจากชิ้นงานและแปรผลระดับอุณหภูมิความร้อนในรูปของระดับสี วิธีการนี้มีความแม่นยำกว่าการตรวจสอบด้วยประสาทสัมผัสของบุคคล แต่ก็มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดในบริเวณที่ระดับความร้อนกระจาย (ambient temperatures) เพราะจะทำให้ผลจากการวัดเกิดความผิดพลาดได้



ภาพที่ 2-3 กล้องถ่ายภาพความร้อน



ภาพที่ 2-4 ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิของมอเตอร์

2.2.4 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ (Motor Current Spectrum Analysis)

เป็นวิธีการเฝ้าระวังติดตามสภาพสำหรับเครื่องจักรที่ใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง ซึ่งวิธีการนี้ใช้หลักการความสมดุลพลังงาน หากว่าภาระทางกลไม่คงที่จะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปไม่คงที่เช่นเดียวกัน ความสัมพันธ์นี้จะมีการทดลองหาโดยผู้ผลิตมอเตอร์ และขึ้นอยู่กับมอเตอร์ในแต่ละตัว จากหลักการนี้จะนำมาวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อหาสภาวะหรือการเสื่อมสภาพที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน



ภาพที่ 2-5 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

2.2.5 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Used Oil Analysis) [13],[14]

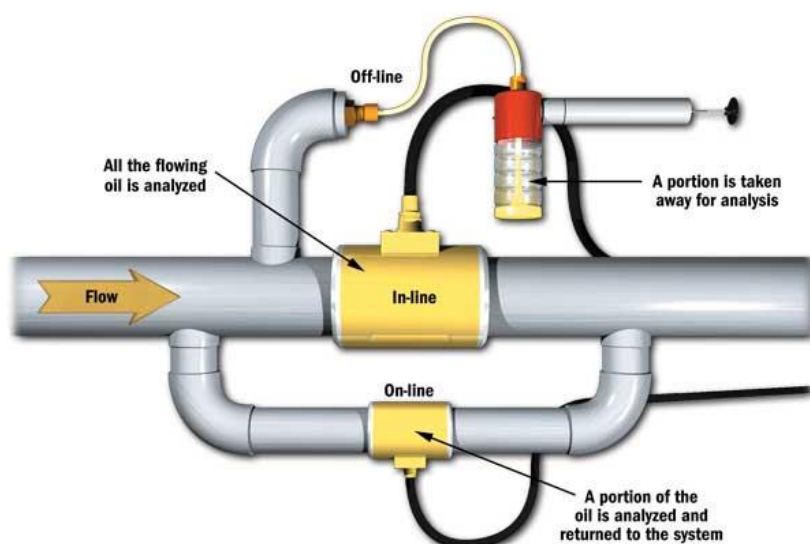
น้ำมันหล่อลื่นทำหน้าที่หล่อลื่นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยการสร้างฟิล์มหล่อลื่น ระหว่างผิวคู่สัมผัสที่อยู่ใต้ภาระ เพื่อลดความเสียหาย ความร้อน และชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวคู่สัมผัส นอกจากนี้สามารถที่จะวิเคราะห์ประเมินสภาพของน้ำมันระหว่างการใช้งาน รวมถึงการประเมินสภาพเครื่องจักรที่สารหล่อลื่นดังกล่าวทำการหล่อลื่นเครื่องจักรอยู่

การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะมีการตรวจวิเคราะห์ค่าหลายรูปแบบเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงตัวเลขหรือเชิงปริมาณ เพื่อช่วยในการตัดสินใจในการบำรุงรักษาให้เหมาะสมกับ สภาพและสภาพของเครื่องจักร โดยการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมัน การวิเคราะห์สิ่งสกปรกปนเปื้อน

2.2.5.1. การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมัน เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และคุณสมบัติของสารปรุงแต่ง

2.2.5.2. การวิเคราะห์สิ่งปนเปื้อน เป็นการวิเคราะห์สารปนเปื้อนที่มาจากสิ่งแวดล้อมและผ่านเข้ามาสู่ระบบหรืออาจถูกสร้างขึ้นภายในระบบหล่อลื่น เช่น อนุภาคโลหะ วาไนซ์ หรือตะกอนจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว รวมถึงเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอ สิ่งสกปรกมักมีผลต่อระดับความนำเชื้อเพลิงของเครื่องจักร และเร่งให้สารหล่อลื่นเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

วิธีการเฝ้าระวังติดตามสภาพเครื่องจักรกลที่ใช้ น้ำมันเป็นสารหล่อลื่นในปัจจุบันมีระบบการติดตามสภาพและการเก็บตัวอย่างน้ำมันอยู่ 3 ระบบ ก. อิน-ไลน์ (In-line) เป็นการติดตามสภาพจากเส้นทางไหลหลักของน้ำมันโดยตรง ข. ออน-ไลน์ (On-line) เป็นการติดตามสภาพจากเส้นทางไหลน้ำมันที่ต่อเป็นแบบบายพาสกับเส้นทางเดินหลัก ค. ออฟ-ไลน์ (Off-line) เป็นการติดตามสภาพน้ำมันจากเส้นทางที่ต่อแยกออกมาที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับระบบ



ภาพที่ 2-6 ระบบการเฝ้าระวังและเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น

ระบบการเผ่าระวังและเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่กล่าวมา มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเครื่องจักร

ตารางที่ 2-1 คุณลักษณะของระบบเผ่าระวังและเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น [13]

วิธีการ	ข้อดี	ข้อด้อย
อิน-ไลน์	สามารถตรวจสอบได้แบบเรียล -ไทม์ และไม่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอก ให้ผลได้ทันที	การติดตั้งอุปกรณ์ทำได้ยาก เนื่องจากต้อง ติดตั้งในท่อทางเดินน้ำมัน มีผลให้การไหล ของน้ำมันไม่ได้เต็มสมรรถนะ
ออน-ไลน์	การติดตั้งอุปกรณ์ทำได้ง่าย ไม่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอก มีผลกระทบกับการไหลเพียงเล็กน้อย ให้ผลได้ทันที	หากระบบอุปกรณ์หรือท่อมีขนาดเล็ก จะทำ ให้การติดตั้งอุปกรณ์และการเก็บตัวอย่าง น้ำมันทำได้ยาก
ออฟ-ไลน์	การติดตั้งอุปกรณ์ทำได้ง่ายและสะดวก ไม่มีผลกระทบต่อการไหลของน้ำมัน ค่าใช้จ่ายถูกกว่าสองวิธีที่กล่าวมา	ไม่เหมาะสมกับเครื่องจักรที่มีสภาวะแวดล้อม สกปรก เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ , อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ ฯลฯ

2.3 วิธีการทดสอบวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว [14]

วิธีการทดสอบวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

2.3.1 การตรวจนับจำนวนอนุภาค (Particle counting) วิธีการตรวจนับจำนวนอนุภาคการสึกหรอของแข็งในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วทำให้ทราบถึงจำนวนอนุภาคขนาดต่างๆ ต่อปริมาตรของไหลที่ทำการตรวจสอบ โดยมักจะตรวจนับอนุภาคที่ระบุเช่นอนุภาคที่โตกว่า 6 ไมครอน หรือ 14 ไมครอน ที่มีอยู่ในน้ำมันปริมาตร 1 มิลลิลิตร และจากการตรวจนับข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาแสดงถึงการกระจายตัวของอนุภาคในระบบมาตรฐาน ที่นิยมใช้ ISO 4406 (รหัสความสะอาดของน้ำมัน) อนุภาคของแข็งมีหลักการในการตรวจนับด้วยบุคคลผ่านกล้องจุลทรรศน์หรืออาจใช้ระบบอัตโนมัติในการตรวจนับอนุภาคโดยหลักการของแสง หรือใช้หลักการของการลดแรงดันของน้ำมันในระบบลงจากการอุดตันช่องว่างโดยสิ่งสกปรก แต่ควรใช้วิธีการเดียวกันทุกครั้งในการทำการวิเคราะห์ หรือเปรียบเทียบค่าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มสภาวะของเครื่องจักร



ภาพที่ 2-7 เครื่องตรวจนับอนุภาคแบบออตโนมัตติ

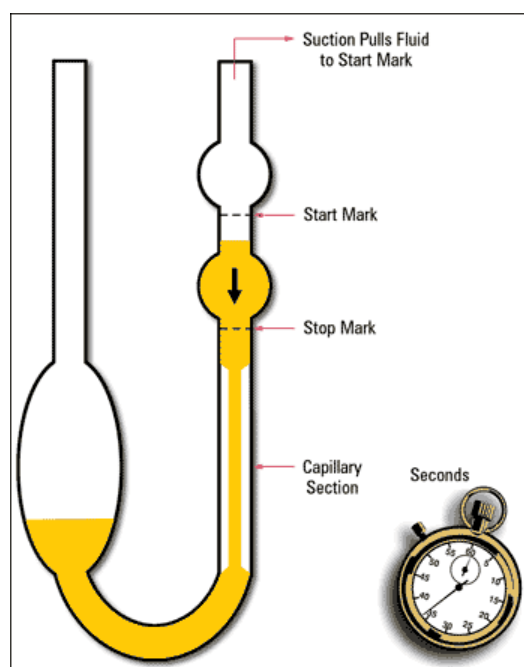
Example Particle Count		Number of Particles per ml		
Size (microns)	Count Larger Than Size per ml	More Than	Up to and Including	Range Number (R)
4	1752	80,000	160,000	24
6	517	40,000	80,000	23
10	144	20,000	40,000	22
14	55	10,000	20,000	21
20	25	5,000	10,000	20
50	1.3	2,500	5,000	19
75	0.27	1,300	2,500	18
100	0.08	640	1,300	17
		320	640	16
		160	320	15
		80	160	14
		40	80	13
		20	40	12
		10	20	11
		5	10	10
		2.5	5	9
		1.3	2.5	8
		0.64	1.3	7
		0.32	0.64	6
		0.16	0.32	5
		0.08	0.16	4
		0.04	0.08	3
		0.02	0.04	2
		0.01	0.02	1

Under ISO 4406:99, a sample is given a fluid cleanliness rating using the above table. To do this, the number of particles greater than three size ranges, 4, 6 and 14 mm are determined in the equivalent of one milliliter of sample. In the above example, the particle count distribution shown in the table on the left translates to an ISO 4406:99 rating of 18/16/13.

ภาพที่ 2-8 ระดับความสะอาดน้ำมันตามมาตรฐาน ISO 4406:1999

2.3.2 ความหนืดคิเนมาติก (Kinematic Viscosity)

เป็นค่าการวัดการต่อต้านการไหลของของไหลภายใต้แรงโน้มถ่วง มีหลักการในการวัดค่าเวลา (หน่วยเป็นวินาที) ที่ของไหลใช้ในการไหลตัว ณ ปริมาตรคงที่ผ่านหลอดแก้วมาตรฐานที่มีความยาวคงที่ โดยที่หลอดแก้วมีการปรับเทียบเป็นไปตามมาตรฐาน และถูกนำมาประกอบเป็นชุดเครื่องวัดความหนืด โดยมีการควบคุมค่าความดันภายในหลอดแก้วทดสอบ และควบคุมค่าอุณหภูมิในการทดสอบให้มีค่าคงที่ นำค่าเวลาที่วัดได้คูณกับค่าคงที่ของหลอดแก้วทดสอบ และผลที่ได้จะมีหน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt) ค่าความหนืดจะถูกรายงานตามมาตรฐาน และยอมรับได้ก็ต่อเมื่อมีการระบุถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจวัดค่าที่ 40 องศาเซลเซียส และที่ 100 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดของน้ำมันที่แปรเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อการใช้งานของเครื่องจักรทำให้มีผลต่อการสูญเสียพลังงานจากการเสียดทาน หรือ ทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำมันเปลี่ยนไป ดังนั้นการวัดค่าและการวิเคราะห์ติดตามแนวโน้มของค่าความหนืดนับเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์น้ำมันใช้แล้ว แม้มีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยของค่าความหนืดก็อาจจะไปมีผลต่อสมรรถนะหรือเสถียรภาพของสารหล่อลื่น หรือ แม้แต่อาจทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างผิวคู่สัมผัสและก่อให้เกิดการสึกหรอได้ การเปลี่ยนแปลงไปของค่าความหนืดมักเป็นอาการเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดอาการชำรุดอื่นๆ ตามมา



ภาพที่ 2-9 หลักการวัดความหนืดคิเนมาติก ตามมาตรฐาน ASTM D445:1997

2.3.3 ตัวเลขรวมความเป็นกรด (TAN: Total Acid Number)

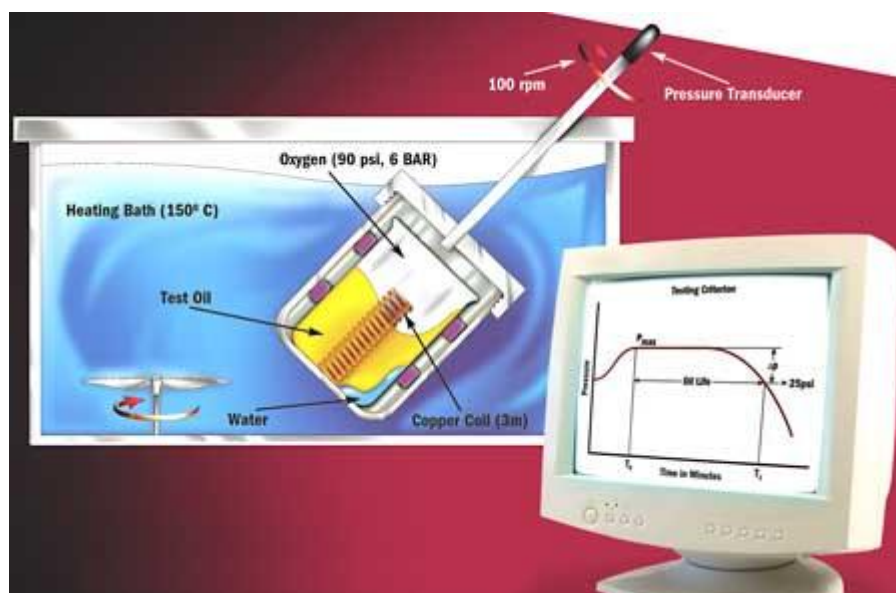
การวัดค่ารวมของปริมาณความเป็นกรดในน้ำมัน ค่า TAN จะแสดงผลของค่าที่วัดได้เป็นค่าปริมาณ (มิลลิกรัม) ของโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในการวัดทำให้กรดต่างๆ ในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วหนึ่งกรัมกลายสภาพมาเป็นกลาง (ค่าจุดสะเทิน) หน่วยวัดของค่า TAN จึงแสดงเป็น mgKOH/g ของน้ำมันหล่อลื่น สามารถวัดค่า TAN ได้ทั้งวิธีหาความเป็นกลางด้วยการไตเตรตชั้น แบบดูจากสี ที่เปลี่ยนไปเมื่อถึงจุดสะเทิน (Colorimeter) หรือการไตเตรตชั้นหาจุดสะเทินด้วยหลักการวัดค่าศักย์ทางไฟฟ้า (Potentiometric) ซึ่งในกรณีที่น้ำมันมีสีเข้มดำมากจะไม่สามารถวัดด้วยการดูสีสารปรุแต่งน้ำมันบางชนิด เช่น สารต่อต้านการเกิดสนิม สารต่อต้านการสึกหรอมีผลทำให้ TAN มีค่าสูงมากในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปและสารปรุแต่งเริ่มเสื่อมสภาพค่า TAN จะค่อยๆ ลดลงและเมื่อน้ำมันถูกออกซิไดซ์จะทำให้เริ่มมีสารเคมีที่มีสภาพเป็นกรดเกิดเพิ่มขึ้นที่ละน้อยและมีผลทำให้ TAN มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ระดับของ TAN ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าค่า TAN ของน้ำมันใหม่ เป็นจุดบ่งบอกว่าน้ำมันเริ่มมีการเสื่อมสภาพ

2.3.4 ตัวเลขรวมความเป็นด่าง (TBN: Total Base Number)

การวัดค่ารวมของปริมาณความเป็นด่างที่เหลืออยู่ของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีส่วนประกอบของสารเคมีที่มีหน้าที่คอยทำให้กรดที่เกิดขึ้นในระบบในระหว่างการเผาไหม้กลายเป็นกลางหรือสะเทิน เมื่อใดที่ปริมาณด่างหมดไปจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นมีสภาพความเป็นกรดสูงขึ้นและมีสภาพของการกัดกร่อนสูง ซึ่งการวัดค่า TBN ใช้หลักการเช่นเดียวกับการวัด TAN โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการหาจุดสะเทินด้วยหลักการทางไฟฟ้า เพราะน้ำมันเครื่องยนต์มักมีสีเข้มดำมากเนื่องจากเขม่า แต่ในการวัด TBN จะใช้สารไตเตรตเป็นกรดไฮโดรคลอริก ค่าวัดของค่า TBN แสดงเป็น mgKOH/g เช่นเดียวกับการวัดค่า TAN ค่า TBN มักจะมีค่าค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาในการใช้งาน เนื่องจากการเสื่อมสภาพของด่างที่ใช้เป็นสารปรุแต่ง โดยที่ความเป็นด่างจะถูกทำลายจากสารเคมีที่เป็นกรดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ และการเกิดออกซิเดชัน

2.3.5 การทดสอบอาร์พีวอท (RPVOT: Rotating Pressure Vessel Oxidation Test)

การทดสอบวิธีนี้แต่เดิมเรียกว่า RBOT: Rotating Bomb Oxidation Test ซึ่งใช้หลักการของภาชนะอัดก๊าซออกซิเจนภายใต้ความดัน เพื่อศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่น ณ อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งมีการเร่งให้เกิดออกซิเดชัน โดยการเจือปนน้ำมันด้วยน้ำและขดลวดทองแดง ภาชนะทดสอบถูกอัดไว้ด้วยที่ออกซิเจนที่ความดัน 150 กิโลปาสกาล และจุ่มแช่ในอ่างน้ำมันที่มีอุณหภูมิคงที่ 150 องศาเซลเซียสและหมุนด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ภาชนะมีมุมเอียง 30 องศา เพื่อให้ความดันออกซิเจนในระบบลดลง การอ่านค่าความดันจากเกจวัดความดัน จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกับค่าเวลา (หน่วยเป็นนาทีก) ในลักษณะทดสอบเหมือนกับน้ำมันใหม่ซึ่งความแตกต่างของเวลาทั้งสองเป็นการแสดงถึงความสามารถในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีเหลืออยู่ของน้ำมันที่ใช้งานอยู่ และทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าน้ำมันน่าจะมียาอายุเหลืออยู่เท่าใด



ภาพที่ 2-10 หลักการทดสอบบอร์ฟิวท

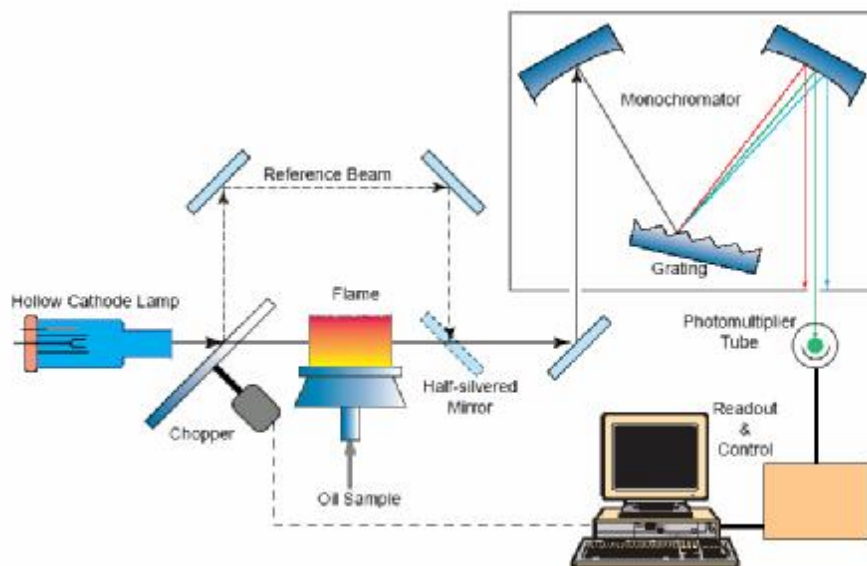
2.3.6 การตรวจวิเคราะห์ธาตุด้วยสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) [14], [15]

เป็นการตรวจวิเคราะห์ธาตุอนินทรีย์สารที่ผสมรวมตัวหรือแขวนลอยปะปนอยู่ในน้ำมัน ด้วยวิธีการทำให้น้ำมันตัวอย่างได้รับความร้อนสูงโดยการอาร์คของขั้วอิเล็กโตรด ซึ่งอยู่ภายใต้เปลวก๊าซอาร์กอน ความร้อนที่สูงมากที่เกิดขึ้นจะทำให้อะตอมของธาตุต่างๆ ในน้ำมันหลอมละลายมีการระเหิดตัวและพลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะของแสง แต่ละธาตุจะมีแสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ความเข้มของแสงจะบ่งบอกของปริมาณแต่ละธาตุ เช่น เหล็ก ตะกั่ว ดีบุก ฯลฯ หน่วยของค่าวัดจะเป็นหนึ่งในล้านส่วนของน้ำมันหล่อลื่น (ppm: part per million) สเปกโตรมิเตอร์ส่วนใหญ่สามารถรายงานผลการวิเคราะห์ธาตุได้มากกว่า 15 ธาตุขึ้นไป การวิเคราะห์จะทำให้ทราบถึงการเพิ่มขึ้นของการสึกหรอของชิ้นส่วนในจุดต่างๆ ของเครื่องจักร สิ่งสกปรกที่มาจากภายนอกหรือการเสื่อมสภาพของสารปรุงแต่งบางกลุ่ม

สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายแบบ ซึ่งแบ่งได้ดังต่อไปนี้

2.3.6.1 แอปซอพชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (AAS: Atomic Absorption Spectrometer)

เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดใช้ในการวิเคราะห์ชนิดธาตุหรือปริมาณธาตุจากการสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่น หลักการคือ เฝาน้ำมันตัวอย่างให้มีความร้อนสูงภายใต้เปลวเพลิงของก๊าซอาร์กอน ทำให้น้ำมันกลายเป็นเปลวพลาสมา



ภาพที่ 2-11 หลักการของแอปซอพซันสเปคโตรมิเตอร์

เปลวพลาสมาดังกล่าวจะถูกกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดคาโทดโดยมีการเปล่งรังสีจากคาโทดด้วยความยาวคลื่นเฉพาะตัวของธาตุต่างๆ ตามต้องการ หากมีปริมาณธาตุหรือเศษโลหะจากการสึกหรอในปริมาณสูงจะทำให้มีการดูดกลืนแสงจากอะตอมของธาตุที่อยู่ในเปลวพลาสมาที่เกิดขึ้น ระดับของการดูดกลืนแสงจากคาโทดจะถูกเปลี่ยนเป็นค่าของปริมาณธาตุเป็น ppm ของธาตุนั้นๆ และค่าวัดจะแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

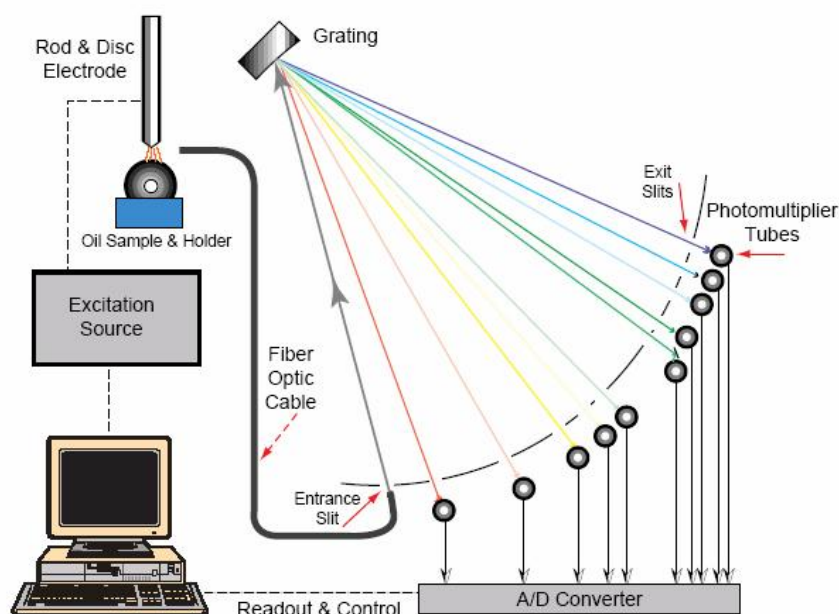
2.3.6.2 อิมิสชันสเปคโตรมิเตอร์ (AES: Atomic Emission Spectrometer)

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว หลักการคือ การทำให้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเศษโลหะจากการสึกหรอและธาตุอื่นๆ มีการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในอะตอมโดยพลังงานความร้อน ซึ่งทำให้อะตอมของธาตุอยู่ในสภาวะตบสนองต่อพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรุนแรง และทำให้อิเลคตรอนวงนอกสุดถูกผลักดันให้หลุดออกมาจากวงโคจร เมื่อวงโคจรมีตำแหน่งว่างของอิเลคตรอน เป็นผลให้มีการทดแทนอิเลคตรอนดังกล่าวด้วยอิเลคตรอนในวงโคจรข้างเคียง ซึ่งทำให้เกิดการเปล่งแสงออกมาในกระบวนนี้ รังสีหรือแสงที่เปล่งออกมาทำให้ทราบความยาวคลื่นของโฟตอน คลื่นพลังงานจะเคลื่อนผ่านช่องทางของเบ้ารับแสงซึ่งแบ่งเป็นช่วงๆ ตามขนาดความยาวคลื่นของแต่ละธาตุที่อยู่ในน้ำมันที่นำมาวิเคราะห์ ค่าความเข้มข้นหรือปริมาณของธาตุจะถูกวัดค่าโดยวงจรจับค่าความเข้มข้นของแสงส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล คอมพิวเตอร์จะมีค่าเทียบเคียงที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของธาตุออกมาเป็นหน่วย ppm

อิมิสชันสเปคโตรมิเตอร์แบ่งได้อีกเป็น 2 แบบดังต่อไปนี้

1. RDE: Rotary Disk Electrode เป็นอุปกรณ์ของสเปคโตรมิเตอร์ชนิดหนึ่ง เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วถูกนำมาวิเคราะห์ จะถูกส่งเข้าสู่ระบบอาร์คเพื่อทำให้เกิดอุณหภูมิสูง โดยการใช้จานหมุนที่ทำจากวัสดุ

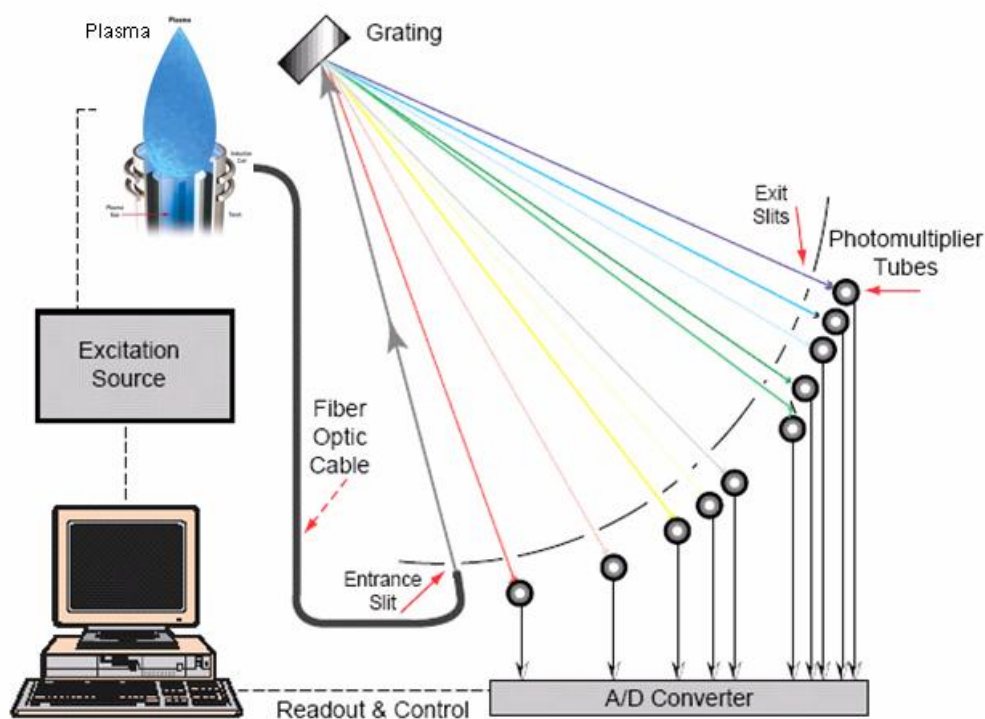
คาร์บอนซึ่งจะจมอยู่ในถ้วยหรือภาชนะบรรจุน้ำมันหล่อลื่น แผ่นงานจะชักพาน้ำมันรวมทั้งเศษโลหะหรือธาตุต่างๆ จากน้ำมันหล่อลื่นขึ้นมา เมื่อเกิดการอาร์คขึ้นจะทำให้อะตอมธาตุ หรือโลหะเกิดสภาวะตอบสนองต่อพลังงานความร้อนอย่างรุนแรงทำให้อิเล็กตรอนวงนอกหลุดออกจากวงโคจรและมีการเปล่งรังสีที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่าของธาตุนั้นๆ ที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว



ภาพที่ 2-12 หลักการของอิมิสชันสเปกโตรมิเตอร์แบบ RDE

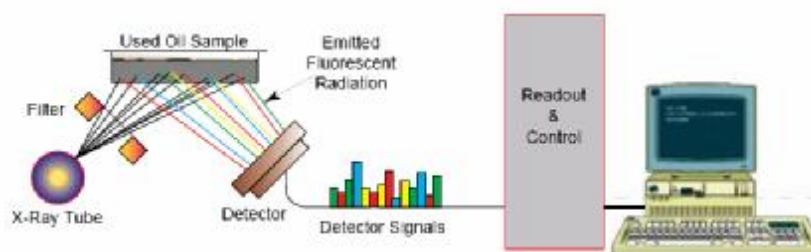
2. ICP: Inductively Coupled Plasma เป็นอุปกรณ์ของสเปกโตรมิเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ที่ใช้การส่งก๊าซอาร์กอนผ่านไปในคอยล์เหนี่ยวนำที่ใช้ความยาวคลื่นวิทยุ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนในระดับอุณหภูมิประมาณ 8,000 ถึง 10,000 องศาเซลวิน ก่อให้เกิดเป็นเปลวพลาสมา ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาวิเคราะห์จะต้องถูกทำให้เจือจางด้วยโซลเวนต์เช่น ไซลีนหรือ กิโลซีน (น้ำมันก๊าด) แล้วนำเข้าสู่บ่้าเผา โดยถูกครอบคลุมไว้ด้วยก๊าซอาร์กอนผ่านไปยังศูนย์กลางของเปลวพลาสมา อุณหภูมิที่สูงมากจะทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะเร้าจากความร้อน และมีผลให้อิเล็กตรอนวงนอกหลุดออกจากวงโคจร มีการเปล่งพลังงานออกมาในค่าความยาวคลื่นที่แตกต่าง ซึ่งแสงที่เปล่งพลังงานออกมาจะถูกตรวจวัดโดยระบบการวัดแสง อุปกรณ์แบบ ICP มีให้เลือกใช้ทั้งการวัดแบบครั้งเดียวหลายๆ ธาตุหรือแบบการวัดเป็นลำดับๆ ขึ้นตามชนิดของธาตุ สำหรับ ICP จะใช้การเลื่อนไปมาของชุดวัดแสง (Grating and Single Photometer) ระบบ ICP มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงกว่า RDE ซึ่ง ICP บางประเภทสามารถวัดค่าได้ละเอียดถึงหน่วยหนึ่งในพันล้านส่วนของน้ำมันหล่อลื่น (ppb: part per billion) สำหรับกลุ่มของสารประกอบที่มีความไวสูง เช่น

โลหะอินทรีย์สารและเศษโลหะจากการสึกหรอที่มีขนาดเล็กกว่า 3 ไมครอน อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของเศษโลหะโตมากขึ้น ความไว ความแม่นยำของ ICP จะลดลง



ภาพที่ 2-13 หลักการของอิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์แบบ ICP

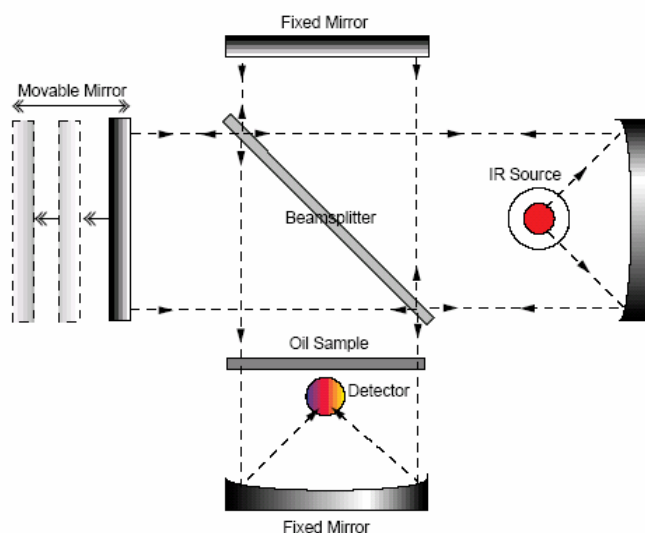
2.3.6.3 เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF: X-Ray Fluorescence Spectrometer) มีหลักการคือทำให้มีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงานสูงเปล่งรังสีไปสู่วัตถุอย่างแน่นหนาหลอมเหลวที่ต้องการวิเคราะห์ พลังงานของรังสีเอกซ์จะทำให้อะตอมในธาตุตอบสนอง มีผลทำให้ธาตุเปล่งแสงออกมาจากอะตอมของแต่ละธาตุ อิเล็กตรอนวงที่อยู่ใกล้นิวเคลียสจะถูกผลักดันออกมาจากวงโคจร เนื่องจากการที่โฟตอนถูกกระแทกจากรังสีเอกซ์พลังงานสูงที่ส่งเข้าไป ทำให้วงโคจรในสุดที่ขาดอิเล็กตรอนไปนั้นจะถูกอิเล็กตรอนตัวอื่นเข้าไปแทนที่และจะปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสีเอกซ์ ค่าความยาวของคลื่นรังสีเอกซ์ที่เปล่งออกมาจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุซึ่งจะทำให้ทราบได้ว่าตัวอย่างนั้นน่าวิเคราะห์มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเศษโลหะเป็นธาตุใดบ้าง



ภาพที่ 2-14 หลักการของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์

2.3.6.4 การวิเคราะห์ด้วยรังสีใต้แดง (FTIR : Fourier Transform Infrared Spectrometer) FTIR เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อการตรวจวิเคราะห์สภาพน้ำมันหล่อลื่น โดยสามารถวัดค่าวิเคราะห์ค่าได้หลายๆค่า พร้อมกันในครั้งเดียวของการทดสอบ วิธีการคือนำน้ำมันหล่อลื่นมาป้ายเป็นฟิล์มบางๆ ให้ความหนาสม่ำเสมอ บนช่องทดสอบบนเครื่อง FTIR จะมีการส่งผ่านคลื่นรังสีใต้แดงผ่านไปยังฟิล์มของน้ำมันตัวอย่าง คุณสมบัติหลายประการของน้ำมันรวมถึงสารปรุงแต่งและสิ่งสกปรกจะมีการดูดกลืนพลังงานของคลื่นรังสีใต้แดงที่แตกต่างกัน ซึ่งความหมายคือ ที่ความถี่ของคลื่นที่ต่างกัน โดยมีการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์คือ ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT: Fast Fourier Transform) ในการวิเคราะห์สภาพความเปลี่ยนแปลงของพลังงานของคลื่นอินฟราเรดที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปมักใช้หลักการส่งผ่านพลังงานของคลื่นอินฟราเรด รูปแบบของคลื่นอินฟราเรดจะถูกทำการเปรียบเทียบลักษณะกราฟที่ได้จากน้ำมันใหม่กับน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วซึ่งสามารถทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพไปของ เซม่า น้ำ ไกลคอล น้ำมันเชื้อเพลิง สารปรุงแต่งต่อต้านการสึกหรอ โซลเวนท์ สารปรุงแต่งรับแรงกดสูง สารปรุงแต่งยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน หรือสารที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไนเตรชันและปฏิกิริยาซัลเฟชัน การวิเคราะห์ด้วย FTIR นี้มีจุดเด่นในการวิเคราะห์สภาพน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในระดับโมเลกุล ข้อมูลที่ได้มีประโยชน์สูงมากในการวิเคราะห์ผลน้ำมัน โดยเฉพาะกลุ่มของการศึกษาการเสื่อมสภาพของสารปรุงแต่งและในกรณีที่น่าสนใจปริมาณสารเคมีที่เกิดขึ้นหรือตกค้างอยู่ของการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันหล่อลื่น

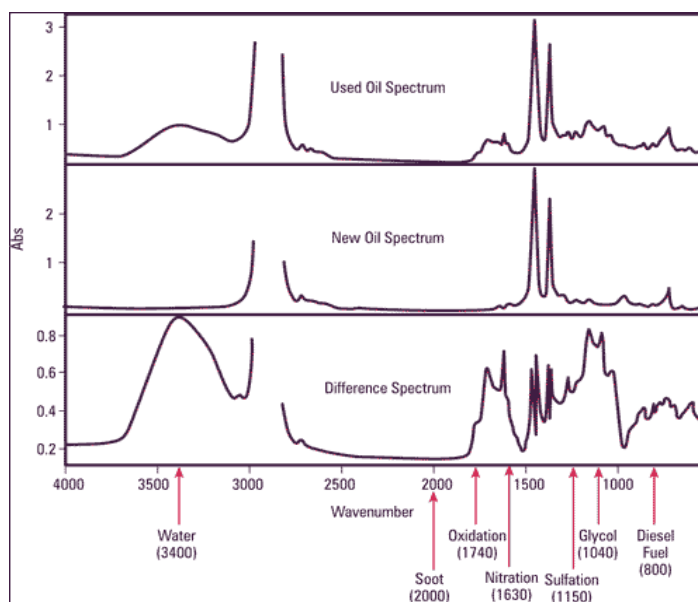
เทคนิค FTIR จะมีชุดอุปกรณ์และซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล ค่าความแตกต่างของพลังงานคลื่นอินฟราเรดในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ซึ่งเรียกว่าค่าหมายเลขคลื่น (Wave number)



ภาพที่ 2-15 หลักการ FTIR สเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 2-2 การวิเคราะห์ค่าหมายเลขคลื่นของ FTIR [14]

พารามิเตอร์	หมายเลขคลื่น (Wave number ,cm-1)
ออกซิเดชั่น	น้ำมันแร่ - 1750 เอสเตอร์ (อินทรีย์) - 3540 ฟอสเฟสเอสเตอร์ - 815
ซัลเฟชั่น	1150
ไนเตรชั่น	1630
เขม่า	2000
น้ำ	น้ำมันแร่ - 3400 เอสเตอร์ (อินทรีย์) - 3625
ไกลคอล	880 ,3400,1040 และ 1080
น้ำมันเชื้อเพลิง	800 - ดีเซล 750 - เบนซิน
สารยับยั้งออกซิเดชั่น - ฟีนอล	795 ถึง 815 - น้ำมันเครื่องบิน
สารต่อต้านการสึกหรอ -ต่อต้านออกซิเดชั่น :ZDDP (Zinc Dialkyl Dithio Phosphate)	3650 980



ภาพที่ 2-16 ลักษณะของสัญญาณจากการวัด FTIR

ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะของเทคนิคการตรวจสอบด้วยสเปกโตรมิเตอร์ [15]

คุณลักษณะ	FL/AAS	GF/AAS	RDE/AES	ICP/AES	XRF
ขีดความสามารถ	ดีมาก	ดีที่สุด	ดี	ดีมาก	ยอมรับได้
ความเที่ยงตรง	1%	3 -10%	3%	1%	1%
ระยะสั้น					
ปริมาณอนุภาค	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด
ช่วงพลวัต	2-3 สิบรอบ	1-2 สิบรอบ	2-3 สิบรอบ	4-6 สิบรอบ	4-6 สิบรอบ
การเตรียม	ใช่	ใช่	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่
ตัวอย่าง					
การทดสอบ	>30 วินาที.	20 นาที.	1 นาที.	1-2 นาที.	1-5 นาที.
ต่อหน่วยเวลา (ต่อชิ้น)					
ความสะดวก	ง่าย	ยาก	ง่ายมาก	ยาก	ง่าย
ในการปฏิบัติงาน					
วัสดุสิ้นเปลือง	อะซิทีลีน	อาร์กอน	กราไฟต์	อาร์กอน,	ไม่มี
(รายวันและการลงทุน)	ฮอลล์ คาโทรด	ไนโตรเจน	อิเล็กโทรด	สารละลาย	
	หลอดไฟ	กราไฟต์			
	สารละลาย,	เตา,			
		ฮอลล์ คาโทรด			
		หลอดไฟ, สารละลาย			
ค่าใช้จ่าย(ใบรับรอง)	\$15-\$60 K	\$20-\$90 K	\$60-\$75 K	\$60-\$150 K	\$25-\$250 K
ค่าใช้จ่ายต่อชิ้น	\$0.75-\$5	\$0.75-\$5	\$0.50-\$1	\$0.75-\$5	\$0.50-\$1

2.3.7 การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ (Wear Particle Analysis) [9],[10],[16]

อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากกลไกการสึกหรอที่แตกต่างกันจะทำให้มีรูปร่างลักษณะ (Morphological) ของอนุภาคแตกต่างกันไปด้วย ทำให้สามารถที่จะนำเอาข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์วินิจฉัยชิ้นส่วนเครื่องกลเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

ในการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ

2.3.7.1 การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคการสึกหรอ อนุภาคที่เกิดจากกลไกการสึกหรอแบบต่างๆจะมีขนาดแตกต่างกัน สามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินสภาพชิ้นส่วนเครื่องกลได้

2.3.7.2 การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาคการสึกหรอ รูปร่างลักษณะของอนุภาคการสึกหรอ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งชี้ถึงกลไกการสึกหรอ

2.3.7.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวทางสถิติของอนุภาคการสึกหรอ การศึกษาการกระจายตัวอนุภาคการสึกหรอ ทำให้สามารถทราบระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรกล

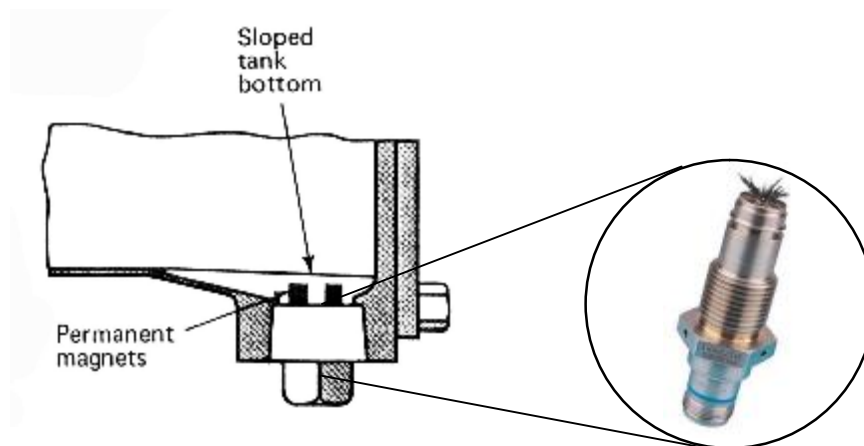
2.3.7.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคการสึกหรอ องค์ประกอบของอนุภาคการสึกหรอ อาทิเช่น สีของอนุภาคการสึกหรอ เป็นต้น ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าอนุภาคการสึกหรอที่ได้เป็นโลหะหรือสิ่งแปลกปลอมชนิดใด ซึ่งเป็นข้อมูลหนึ่งที่ทำให้ทราบว่าชิ้นส่วนใดเกิดการสึกหรอ

2.3.7.5 การศึกษาอนุภาคการสึกหรอเชิงจุลภาค การใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูลักษณะของอนุภาคการสึกหรอเป็นวิธีการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอที่ทำได้ไม่ยากนัก ความคมชัดของภาพมีความสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับ คุณภาพของเลนส์ การให้แสง กำลังขยาย แต่วิธีการนี้ต้องอาศัย ประสบการณ์ ความชำนาญของผู้วิเคราะห์ ถึงจะทำให้การวิเคราะห์และประเมินผลใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ [9],[10],[12], [16]

2.4.1 การวิเคราะห์เศษโลหะชนิดเหล็กจากปลั๊กแม่เหล็ก(MCD : Magnetic Chip Detector)

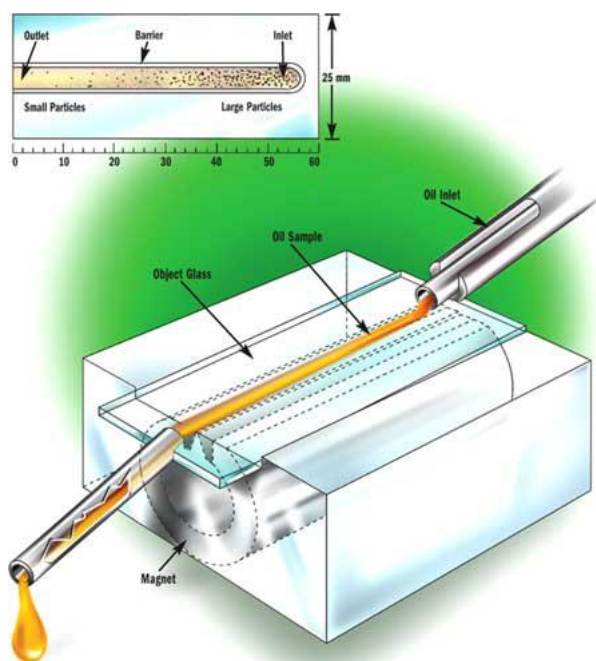
เป็นวิธีการนำเอาปลั๊กแม่เหล็กชนิดถาวรไปติดตั้งในระบบหล่อลื่น เช่น ถังพักน้ำมัน รองเส้นแบบกบกระปุกเฟืองทด ฯลฯ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการทำหน้าที่กรองเศษโลหะและเป็นตัวดักเศษโลหะเพื่อนำไปวิเคราะห์และประเมินสภาพชิ้นส่วนเครื่องกล ปลั๊กแม่เหล็กมีความเป็นไปได้สูงที่จะดูดเศษโลหะ จากการสึกหรอที่มีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอน ที่มีลักษณะเป็นก้อนสามมิติหรือแผ่นขนาดใหญ่ที่เกิดจากกลไกการสึกหรอแบบล้าตัว ปริมาณเศษโลหะที่ได้จากปลั๊กแม่เหล็กแสดงให้เห็นความรุนแรงของการสึกหรอ หากมีเศษโลหะมากเกินไปก็ควรที่จะนำเอาเศษโลหะไปวิเคราะห์รูปร่างลักษณะการสึกหรอ (Wear Morphological Analysis) เพื่อหากลไกการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องกล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาที่รากสาเหตุ (Root Cause Analysis) ของเครื่องจักร



ภาพที่ 2-17 หลักการของปลั๊กแม่เหล็ก

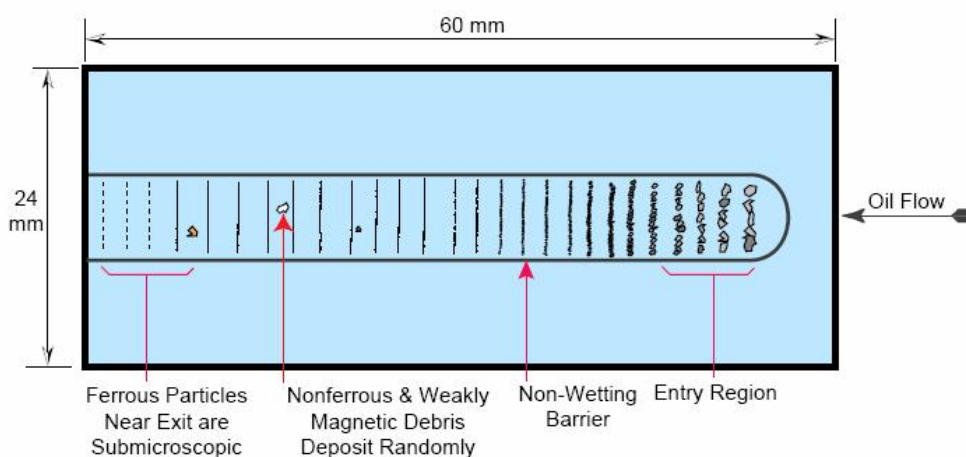
2.4.2 การวิเคราะห์เฟอร์โรกราฟี (AF: Analytical Ferrography)

เป็นวิธีการวิเคราะห์รูปร่าง ลักษณะหรือรูปพรรณ สันฐานของเศษโลหะโดยการทำให้เศษโลหะกลุ่มเหล็กในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเกาะติดอยู่บนแผ่นสไลด์โดยใช้หลักการของแม่เหล็กแบบถาวรแผ่นสไลด์ที่ได้เรียกว่า “เฟอร์โรแกรม” หรืออาจจะใช้หลักการของการกรองผ่านกระดาษกรองที่ละเอียดมากและเรียกแผ่นกระดาษกรองนั้นว่า “ฟิลเตอร์แกรม”



ภาพที่ 2-18 หลักการเฟอร์โรกราฟี

เมื่อเศษโลหะถูกดูดด้วยแม่เหล็กก็จะเรียงตัวกันจากขนาดใหญ่ไปหาขนาดเล็กตามทิศทางสนามแม่เหล็กโดยที่โลหะกลุ่มที่ไม่ใช่เหล็กจะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถนำเอาแผ่นสไลด์แก้วมาตรวจสอบใต้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้ทราบอย่างคร่าวๆ ว่ามีเศษโลหะประเภทใดและมาจากการสึกหรอจากชิ้นส่วนในระบบที่ชิ้นส่วนใด ในกรณีของฟิลเตอร์แกรมสามารถแยกแยะว่าเศษโลหะเป็นเหล็กหรือโลหะอื่น โดยการใส่แม่เหล็กไว้ใต้กระดานกรองแล้วทดลองขยับแม่เหล็กไปมาเศษโลหะที่เป็นกลุ่มเหล็กก็จะขยับตาม



ภาพที่ 2-19 หลักการแผ่นสไลด์เฟอร์โรแกรม

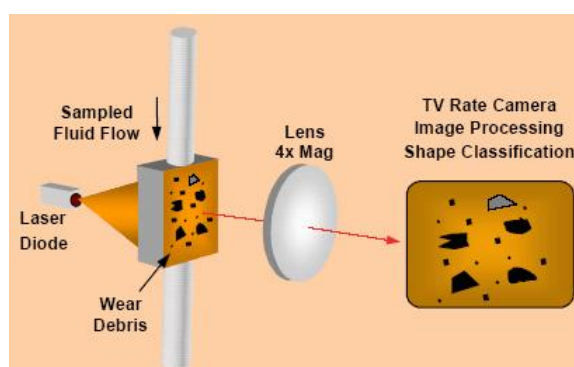
การใช้กระบวนการทางเคมีหรือทางความร้อนกับเศษโลหะต่างๆ บนสไลด์เฟอร์โรแกรมหรือบนฟิลเตอร์แกรม ทำให้พอจะทราบถึงองค์ประกอบทางโลหะวิทยาของโลหะนั้นๆ และยังสามารถใช้แสงส่องเศษโลหะทางด้านล่างของกล้องจุลทรรศน์เพื่อแยกชนิด ซึ่งเพราะสารของอินทรีย์หรือออกไซด์บางชนิดยอมให้แสงผ่านได้ อนุภาคที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็นสีใสสว่าง ในขณะที่เศษโลหะเป็นกลุ่มที่ทึบแสง จะเห็นอนุภาคมีเงายู่อ้อมรอบ กลุ่มที่ยอมให้แสงผ่านได้บางส่วน เช่น ทราย ผุ่นผง บางส่วนของอนุภาคจะเห็นมุมการสะท้อนแสงอีกด้วย

2.4.3 เลเซอร์เน็ตไฟน์ (LNF: LaserNet Fines)

เป็นอุปกรณ์ในการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว มีหลักการคือ นำตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านท่อแล้วส่งแสงเลเซอร์ผ่าน แสงเลเซอร์จะรวมกันส่องผ่านไปยังอนุภาคการสึกหรอที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่น อนุภาคการสึกหรอจะถูกขยายด้วยเลนส์ และบันทึกภาพที่ได้เป็นภาพดิจิทัลด้วยกล้องอิเล็กตรอนิกส์ ภาพของอนุภาคการสึกหรอที่ได้จัดเก็บในคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing) ซึ่งค่าวัดที่ได้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด พื้นที่ เส้นรอบรูป สี อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ฯลฯ ข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้จะถูกประมวลผลข้อมูลด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์ก

(Neural Network) ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการจำแนกชนิดอนุภาคการสึกหรอจากตัวอย่างน้ำมันที่นำมาตรวจสอบว่าเป็นลักษณะการชำรุดแบบไหนและเกิดจากกลไกการสึกหรอแบบใด

ทำให้สามารถนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรได้อย่างเหมาะสม อุปกรณ์นี้เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในการบำรุงรักษาอากาศยานในต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมากและยังไม่มีในประเทศไทย



ภาพที่ 2-20 หลักการของเลเซอร์เน็ตไฟน์

2.4.4 การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Image Analysis) การรวมเอาวิธีการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ภาพ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาคการสึกหรอเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข (Quantitative Data) ในการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสึกหรอ ถ้ามีปัจจัยที่นำมาใช้วิเคราะห์ยิ่งมาก ก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ข้อมูลเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอมีดังนี้ [1], [8], [9], [10], [12], [17]

- 2.4.4.1 พื้นที่ (Area)
- 2.4.4.2 เส้นรอบรูป (Perimeter)
- 2.4.4.3 อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (Aspect Ratio)
- 2.4.4.4 ความกลม (Circularity)
- 2.4.4.5 วงกลมเฟอร์เร่ (Ferret Diameter)
- 2.4.4.6 ลักษณะพื้นผิว (Surface Texture)
- 2.4.4.7 สีของอนุภาค (Particle Color)

ฯลฯ

ตารางที่ 2-4 คุณลักษณะของวิธีการติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องกลแบบต่างๆ

คุณลักษณะ	การวัดสัญญาณความ สั่นสะเทือนและคลื่น เสียงความถี่สูง	การวัดอุณหภูมิ สมรรถนะ	การวิเคราะห์สาร หล่อลื่นใช้แล้ว	การวิเคราะห์ กระแสไฟฟ้าของ มอเตอร์
ราคาและค่าใช้จ่าย	เครื่องมือมีราคาสูงมาก ตั้งแต่หลักหมื่นจนถึง หลักล้าน	เครื่องมือมีราคาสูง พอสมควรประมาณ 500,000 บาทขึ้นไป	ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ ต้องการทราบ ค่าใช้จ่ายจะไม่คงที่ ลงทุนครั้งแรกต่ำ	ไม่สูงมาก ขึ้นอยู่กับ รายละเอียดของ ข้อมูลที่ต้องการ
ความไว	ขึ้นอยู่กับราคาเครื่องมือ และสภาพแวดล้อม	สูง	สูงมาก	พอสมควร
ความง่ายในการ วิเคราะห์ผล	ต้องอาศัยผู้ที่มีความ เชี่ยวชาญสูง	วิเคราะห์ง่ายไม่ต้อง อาศัยผู้เชี่ยวชาญ	ต้องอาศัย ห้องปฏิบัติการและ ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ วิเคราะห์	ต้องอาศัยการเก็บ ข้อมูลและโปรแกรม ช่วย
ระยะเวลาวิเคราะห์ ผล	ใช้เวลาไม่นานมาก	ทราบผลทันที	ใช้เวลาในการ วิเคราะห์นานหลาย วัน	ใช้เวลาประมวลผล ไม่นาน
ความสามารถใน การวิเคราะห์	ทราบถึงการเยื้องศูนย์ ของเพลาดำแหน่งชำรุด ในร่องลื่น และความหนา สารหล่อลื่น	ทราบถึงความผิดปกติ ของการหล่อลื่นในร่อง ลื่น และสภาพการใช้ งาน	ทราบถึงสภาพของ สารหล่อลื่น สิ่ง สกปรกที่ปนเปื้อน และการสึกหรอของ ร่องลื่น	สามารถใช้วิเคราะห์ เครื่องจักรที่ใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าเป็น อุปกรณ์ต้นกำลัง เท่านั้น

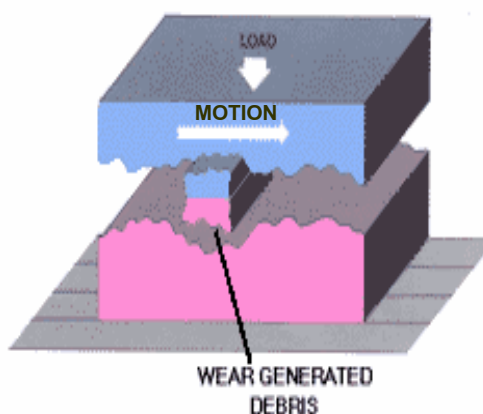
ที่มา : พงษ์เผ่า กลัดเนียม. วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,2546

ในการพิจารณาเลือกวิธีการเฝ้าระวังติดตามสภาพชิ้นส่วนเครื่องกล นั้นต้องอาศัยองค์ประกอบ
หลายๆ อย่างรวมกันในการพิจารณา อาทิเช่น ระดับความสำคัญของเครื่องจักรกล งบประมาณ
ระยะเวลา เป็นต้น หากเลือกได้เหมาะสมแล้วจะทำให้การลงทุนในการบำรุงรักษาได้ผลตอบแทนอย่างคุ้มค่า

2.5 กลไกการสึกหรอของวัสดุ (Wear mechanisms of material) [19]

2.5.1 กลไกการสึกหรอแบบยึดติดแบบปกติ/แบบรุนแรง (Mild and Severe Adhesive Wear Mechanism) การสึกหรอแบบนี้เกิดจากผิวสัมผัสของโลหะชิ้นส่วนทางกลถูกเสียดสีกันโดยมีหรือไม่มีสารหล่อลื่นเลยก็ได้ ซึ่งผิวคู่สัมผัสที่สัมผัสกันพิจารณาในระดับจุลภาค ความเค้นที่เกิดขึ้นเกินจุดครากของวัสดุ หากแม้ว่าภาระทางกลที่ได้รับจะไม่มากก็ตามก็ยังสามารถเกิดการเกาะยึดตัวกันระหว่างโมเลกุลขึ้น โดยมีผลทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนย้ายถ่ายเท (Diffusion) ระหว่างผิวคู่สัมผัส และในที่สุดก็จะหลุดแยกออกมาเนื่องจากการล้าตัวของวัสดุ การสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นโดยปกติในขณะที่ยึดติดกันที่เริ่มต้นใช้งาน หรือขณะจะหยุดการใช้งาน ชิ้นส่วนเครื่องกลทุกครั้ง เนื่องจากลักษณะดังกล่าวจะเกิดรูปแบบการหล่อลื่นแบบบาว์นดารี ซึ่งมีผลทำให้เกิดโอกาสการสัมผัสตัวกันของผิวหยาบในระดับจุลภาค (Asperity contact) นอกจากนี้หากมีการใช้งานที่ภาระและความเร็วรอบที่สูงผิดปกติ จะทำให้เกิดการสูญเสียภาวะการหล่อลื่นแบบสมบูร์ณ์ (Hydrodynamic or Elastohydrodynamic Lubrication) อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีขนาดโตกว่า 50 ไมครอนและมีลักษณะผิวหน้าที่มีรอยขูดขีด รวมถึงลักษณะเป็นแผ่นแนวยาว (Striation and Elongated Wear Particles) และในบางส่วนของอนุภาคการสึกหรอที่เกิดการยึดติดจะมีผิวหน้าตะปุ่มตะป่ำและมีสีน้ำเงินแกมม่วง สีนํ้าตาล หรือเป็นสีดำ ทั้งนี้เกิดจากการยึดติดอย่างรุนแรงทำให้มีการเยิ้มตัวของเนื้อโลหะ และมักเกิดขึ้นในรูปแบบการหล่อลื่นแบบแห้ง (Dry Lubrication) โดยเฉพาะการเริ่มต้นเครื่องครั้งแรกของการทำงาน

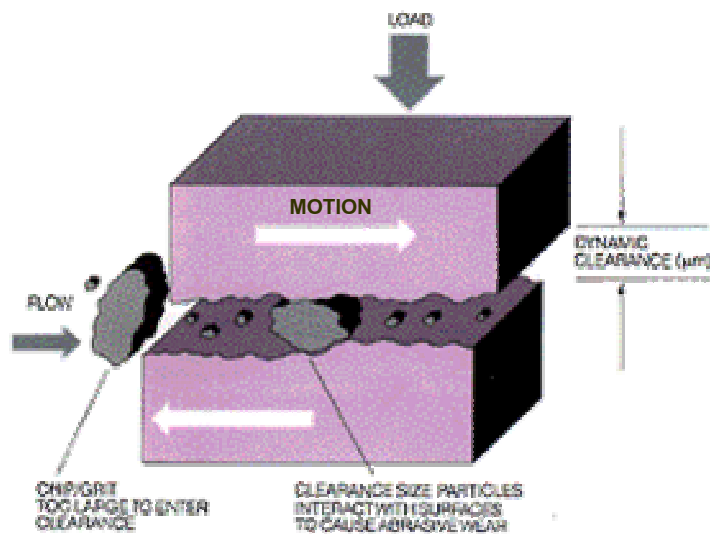
อนุภาคการสึกหรอจากการยึดติดแบบปกติ (Rubbing Wear Particles) มักมีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน รูปร่างเป็นแผ่นบาง มีสีสว่างสดใส และมีอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของอนุภาคการสึกหรอจากการสึกหรอจากการยึดติดแบบรุนแรง (Severe Adhesive Wear) จะมีขนาดอนุภาคโตกว่า 25 ไมครอน และมีสีน้ำเงินแกมม่วง สีนํ้าตาล หรือสีดำ และมีผิวหน้าเป็น รอยขูดขีดตามแนวการเคลื่อนที่ เนื่องจากการเกิดการยึดติดแบบรุนแรงที่อุณหภูมิสูงและความเร็วรอบที่สูงมากกว่าปกติ



ภาพที่ 2-21 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด

2.5.2 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear Mechanism)

การสึกหรอแบบนี้เกิดจากการที่มีสิ่งสกปรก อาทิเช่น เม็ดฝุ่น เม็ดทราย หรือสิ่งแปลกปลอมที่มีความแข็งสูงแทรกตัวเข้าไปอยู่ในระหว่างผิวคู่สัมผัสภายใต้ภาระทางกล (ภาพที่ 2-22) อีกรูปแบบของกลไกการสึกหรอแบบนี้คือ การที่ชิ้นส่วนเคลื่อนไหวยาวสองชิ้นที่มีความแข็งแตกต่างกันมากๆ มีการสัมผัสและการเคลื่อนที่สวนทางกัน ด้วยความเร็วและมีภาระทางกล ซึ่งชิ้นส่วนที่มีความแข็งมากกว่าจะไปขูดขีดชิ้นส่วนที่มีความแข็งน้อยกว่าให้เป็นร่อง อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นๆ (Cutting Wear Particles) โดยทั่วไปจะมีขนาดความยาวตั้งแต่ 5 ถึง 10 ไมครอน และมีความกว้างตั้งแต่ 2 ถึง 5 ไมครอน มีสีน้ำเงิน หรือน้ำตาล เนื่องจากการเกิดความร้อนสูงบริเวณผิวสัมผัส

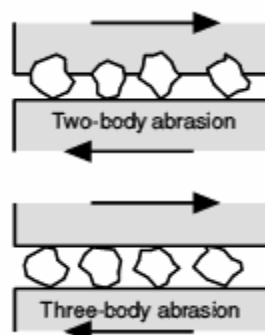


ภาพที่ 2-22 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด

กลไกการสึกหรอแบบขูดขีดสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะ ดังนี้

2.5.2.1 การขูดขีดแบบสองเนื้อ (Two Body Abrasion) เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนสองชิ้นส่วนมีการขัดถูกันซึ่งชิ้นที่แข็งมากกว่าจะเป็นเสมือนตะไบขูดผิวชิ้นที่นิ่มกว่าทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น

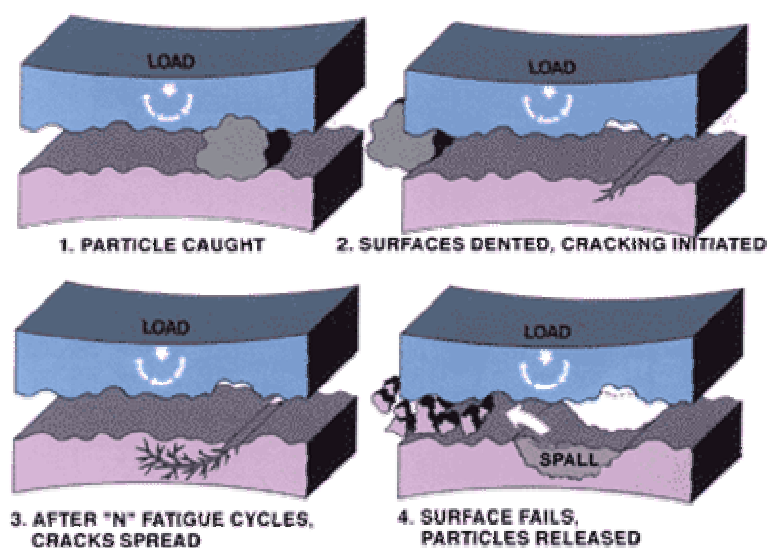
2.5.2.2 การขูดขีดแบบสามเนื้อ (Three Body Abrasion) เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนที่เป็นคู่สัมผัสมีอนุภาคของสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมแทรกตัวเข้าขัดถูผิวสัมผัส (ดังภาพที่ 2-23)



ภาพที่ 2-23 ลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด

2.5.3 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear Mechanism)

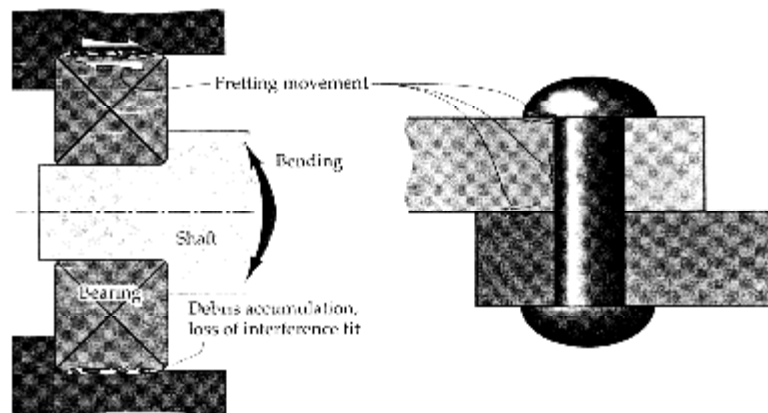
การสึกหรอแบบนี้เกิดจากการที่ผิวสัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องกลได้รับการกระทบทางกลแบบสลับหรือแบบเป็นวงรอบ เป็นระยะเวลานาน ทำให้วัสดุเกิดการล้าตัวและเกิดรอยแตกบนผิวหน้าวัสดุบริเวณที่เกิดการล้าตัว ส่งผลให้ผิววัสดุหลุดออกไป เหลือเพียงหลุมที่บนผิวชิ้นส่วน หรือเกิดจากสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีความแข็งในสารหล่อลื่นและทำให้เกิดรอยกดบนผิวชิ้นส่วน เมื่อใช้งานผ่านไประยะเวลานานๆ น้ำมันเข้าไปอัดตัวในรอยกด รอยกดจะค่อยๆ ขยายใหญ่ขึ้น และแตกหลุดออกมาในที่สุด ตัวอย่างของกลไกการสึกหรอแบบนี้ อาทิเช่น ลูกกลิ้งที่ใช้รีดโลหะ ร่องล้อเม็ดลูกกลิ้งแบบเม็ดกลม พื้นเพื่องตรง ฯลฯ อนุภาคการสึกหรอจะมีรูปร่างหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนนั้นๆ เช่นร่องล้อเม็ดลูกกลิ้ง อนุภาคจะมีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 ไมครอน หรือถ้าเป็นอนุภาคการสึกหรอของเพื่อง อนุภาคจะมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเป็นก้อน และอาจมีรูปร่างแปลกไม่สมมาตร ขนาดโตกว่า 15 ไมครอน



ภาพที่ 2-24 กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว

2.5.4 กลไกการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribochemical Reaction Mechanism)

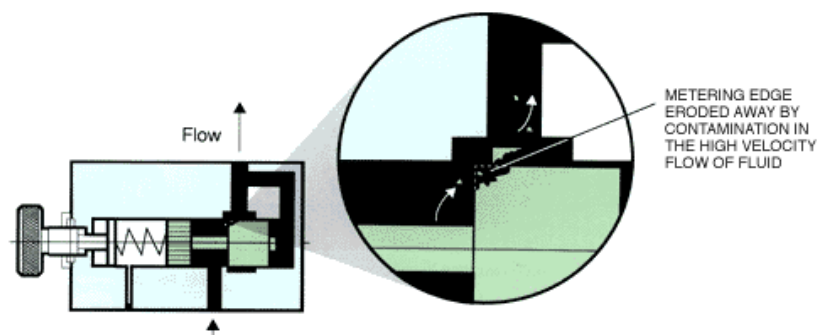
การสึกหรอแบบนี้เกิดจากการขัดถูที่ผิวคู่สัมผัสจากการขยับตัวไปมาเพียงเล็กน้อยของชิ้นส่วน ซึ่งเรียกได้อีกอย่างว่า การสึกหรอแบบเฟรตติง (Fretting Wear) ภายใต้สภาวะหยุดนิ่งและมีแรงมากระทำ เช่น ความสั่นสะเทือน มาทำให้ขยับตัวเล็กน้อยเพียงระดับไมครอนและเกิดความร้อน รวมทั้ง ความชื้น เศษโลหะ จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อสิ่งเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการกัดกร่อน (Corrosive Wear) ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสนิมเหล็ก สนิมที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนยังทำให้เกิดกลไกการสึกหรอแบบชุดขัดอีกด้วย ชิ้นส่วนเครื่องจักรมีจุดที่มีโอกาสที่จะเกิดการสึกหรอแบบนี้ได้ อาทิเช่น การประกอบรองลื่นแบบกลิ้งไม่แน่นกับแหวนนอก หมุดย้ำที่ยึดเข้ากับโครงสร้างของเรือบป เพลสไปน์



ภาพที่ 2-25 ลักษณะการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี

2.5.5 กลไกการสึกหรอแบบพ่นปะทะ (Erosive Wear Mechanism)

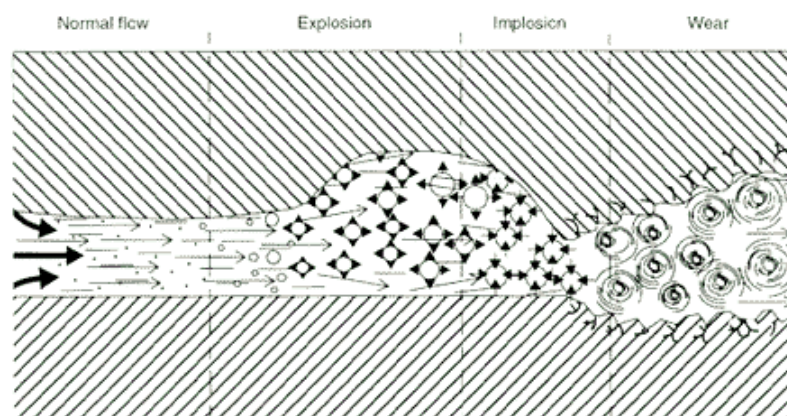
การสึกหรอแบบนี้เกิดจากการที่ผิวหน้าของชิ้นส่วนเครื่องกล ถูกอนุภาคของแข็ง อาทิเช่น เม็ดฝุ่น เม็ดทราย เศษโลหะ ฯลฯ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความดันสูงพุ่งปะทะด้วยความเร็ว โดยมีลักษณะเป็น หลุมเล็กๆ บนผิวหน้าสัมผัส ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอประเภทนี้ ความแรงของการปะทะ ขนาดของอนุภาค มุมและทิศทางในการปะทะ ชิ้นส่วนเครื่องกลที่มีการเกิดการสึกหรอแบบนี้ อาทิเช่น ใบพัดของปั๊มไฮดรอลิกแบบใบกวาด หลอดวาล์วของอุปกรณ์ไฮดรอลิกและนิวแมติกส์ ชิ้นส่วนภายในปั๊มน้ำแรงดันสูง เป็นต้น



ภาพที่ 2-26 ลักษณะการสึกหรอแบบพ่นปะทะในอุปกรณ์วาล์วนิวแมติกส์

2.5.6 กลไกการสึกหรอแบบโพรงอากาศ (Cavitation Wear Mechanism)

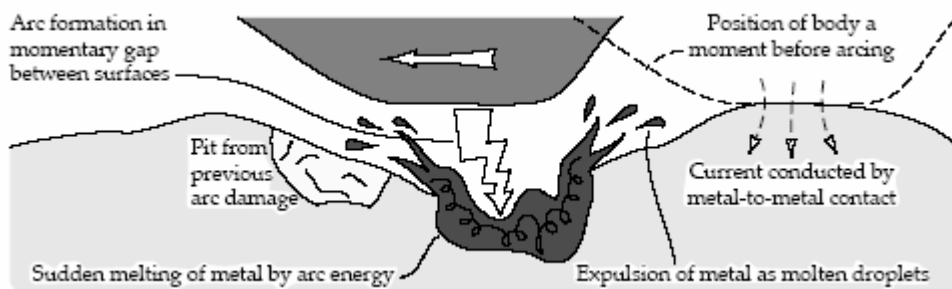
การสึกหรอแบบคavititeชันมักจะเกิดขึ้นในระบบไฮดรอลิก จากการที่ลดความดันของของไหลในระบบรวดเร็วเกินไป อาทิเช่น การผ่านวาล์วคอคคอด การลดขนาดท่อ ข้อต่อ ฯลฯ สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดลักษณะการไหลแบบไม่ราบเรียบ (Turbulent Flow) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโพรงอากาศในน้ำมัน หรือเกิดจากการที่สารปรุงแต่งที่ทำหน้าที่ต่อต้านการเกิดฟองในน้ำมันไฮดรอลิกเสื่อมสภาพ รวมทั้งถังพักไม่มีแผ่นกั้นน้ำมันระหว่างท่อทางดูดกับท่อทางกลับ จากการที่อากาศอัดตัวได้ดีกว่าน้ำมัน ทำให้ปั๊มไฮดรอลิกอัดอากาศเข้าไปแทนน้ำมันซึ่งอากาศจะแตกตัวทำให้ของเหลวที่อยู่รอบๆ ชักพาเอาสิ่งสกปรกฟุ้งปะทะผิววัสดุด้วยความดันประมาณ 15 กิโลปาสกาลและความเร็วสูงทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวของวัสดุ โดยมีลักษณะเป็นหลุมบ่อเล็ก ๆ



ภาพที่ 2-27 กลไกการสึกหรอแบบโพรงอากาศ

2.5.7 กลไกการสึกหรอเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (Electrical Erosion Wear Mechanism)

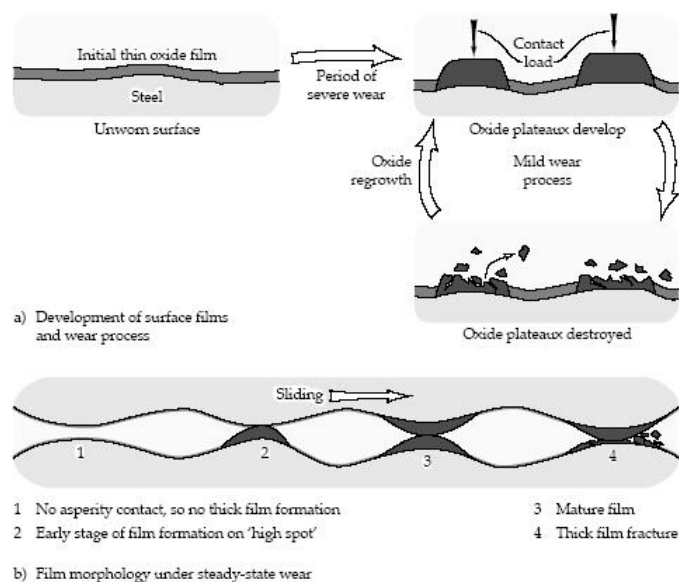
ชิ้นส่วนทางกลที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่มีความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสูง มีผลให้ความหนาของฟิล์มอากาศมีมากระหว่างผิวคู่สัมผัส ทำให้ค่าไดอิเล็กตริกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลง นำไปสู่การอาร์คของไฟฟ้า ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าที่สูงประมาณ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางมิลลิเมตร เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง [20] ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นเป็นสาเหตุให้มีการระเบิดของประจุไอออนจากพลังงานพลาสมาบนผิววัสดุ มีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ คล้ายกับการถูกพ่นปะทะด้วยของแข็ง แต่ผิวของหลุมจะมีลักษณะหลอมละลายเนื่องจากความร้อน [19] โดยส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับพื้นเฟืองและรองลื่นที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตลอดอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น รถไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ที่ผิวพื้นเฟืองและรองลื่นจะมีสีคล้ำและอาจมีรอยไหม้ โดยเฉพาะในรองลื่นแบบกลิ้งถ้าการสึกหรอมีความรุนแรงจะเห็นรอยกดยาวเป็นลูกระนาด (Washboard effect) ที่ผิวมีการหลอมละลายของโลหะ [21] วิธีการที่ช่วยยืดอายุจากการสึกหรอแบบนี้ควรจะลดช่องว่างระหว่างผิวคู่สัมผัส ซึ่งจะช่วยให้มีค่าไดอิเล็กตริกที่ดีขึ้นด้วยการออกแบบพิคังงานสวมให้เป็นแบบสวมแน่น (Press-fit) และใช้จาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติป้องกันการอาร์คของไฟฟ้า [20]



ภาพที่ 2-28 กลไกการสึกหรอเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

2.5.8 กลไกการสึกหรอจากการเกิดออกไซด์ (Oxidative Wear Mechanism) [19],[20]

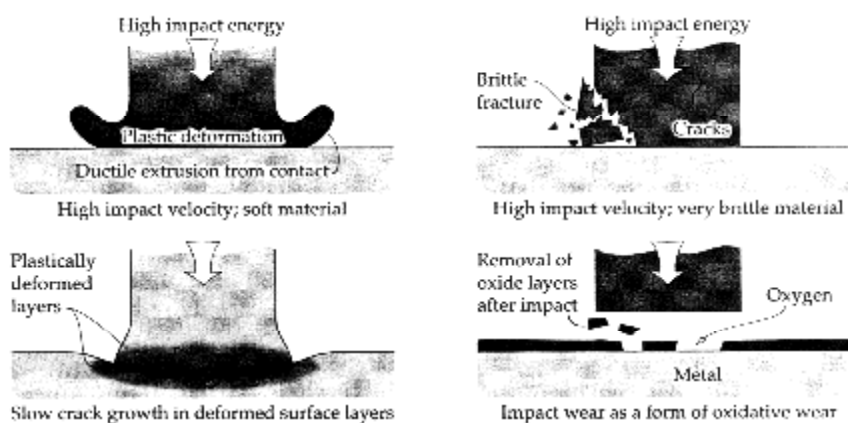
การสึกหรอจากการเกิดออกไซด์ เป็นการสึกหรอเนื่องจากการลื่นไถลภายใต้สภาวะการหล่อลื่นที่ไม่เพียงพอหรือการขาดสารหล่อลื่น ซึ่งบริเวณผิวคู่สัมผัสมีความร้อนสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อสัมผัสกับอากาศ ส่งผลให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์หนาหลายไมครอนเกาะยึดผิวหน้าของวัสดุ เมื่อผิวคู่สัมผัสเคลื่อนที่ด้วยความเร็วทำให้เกิดการยึดติดของฟิล์มออกไซด์ ชั้นฟิล์มออกไซด์จะเสียรูปและดึงเอาผิวหน้าวัสดุให้หลุดล่อนออกมาบางส่วนเป็นอนุภาคการสึกหรอ ความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์มีผลต่อความรุนแรงในการสึกหรอ ถ้าความหนาฟิล์มออกไซด์มีมากเพียงพอเป็นการสึกหรอแบบลื่นไถลปกติ (Mild Wear) และความหนาของฟิล์มออกไซด์มีน้อยจะทำให้เกิดการสึกหรอแบบรุนแรง (Severe Wear)



ภาพที่ 2-29 กลไกการสึกหรอจากการเกิดออกไซด์

2.5.9 กลไกการสึกหรอจากการกระแทก (Impact Wear Mechanism) [19]

การสึกหรอเนื่องจากการชนปะทะกันของผิววัสดุสองชิ้นซ้ำๆ กัน ที่เห็นการสึกหรอนี้ได้ชัดเจนคือ บริเวณผิวหน้าของหัวค้อนโลหะ ลักษณะของการสึกหรอแบบนี้ผิวหน้าจะเรียบเมื่อเปรียบเทียบกับร่องรอยของการสึกหรอที่บ่งชี้ความโค้งงอของผิว จากลักษณะที่เกิดขึ้นทำให้สามารถแยกประเภทจากการสึกหรอแบบพ่นปะทะได้ การกระแทกกันของวัสดุแบบซ้ำๆ ไปมาทำให้เกิดความเค้นสูงที่ผิวสัมผัสส่งผลให้เกิดการยุบตัวหรือการเสียรูป นอกจากนั้นอาจทำให้เกิดการล้าตัวที่ผิววัสดุจากการกระแทกของเศษโลหะที่แตกออกไปก่อนหน้านี้ ผิววัสดุที่มาจากจากการล้าตัวเป็นการขยายตัวของรอยร้าวใต้ผิวเกิดเศษโลหะที่มาจากกรหลุดร่อนออกของผิวหน้า

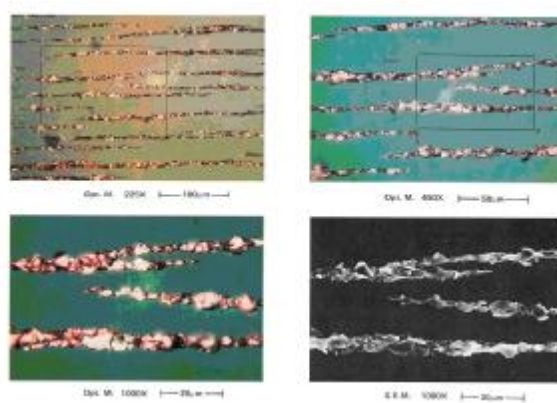


ภาพที่ 2-30 กลไกการสึกหรอจากการกระแทก

2.5.10 ชนิดของอนุภาคการสึกหรอ [9], [16]

2.5.10.1 อนุภาคการสึกหรอแบบปกติ (Normal Rubbing Wear Particle)

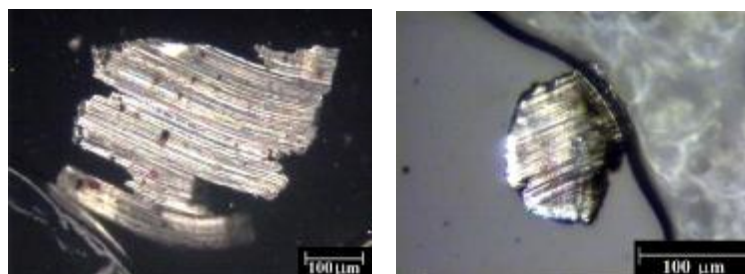
อนุภาคการสึกหรอประเภทนี้เป็นการสึกหรอน้อยมาก ซึ่งถือว่าเกิดขึ้นเป็นปกติสำหรับเครื่องจักรที่ใช้ น้ำมันเป็นสารหล่อลื่น ลักษณะของอนุภาคการสึกหรอจะมีอัตราส่วนความยาวกับความหนาสูง โดยทั่วไปจะมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 15 ไมครอน ถ้าหากระบบหล่อลื่นมีความสกปรกจะทำให้อัตราของอนุภาคการสึกหรอเพิ่มขึ้นทันที รวมถึงขนาดของอนุภาคที่อาจจะเพิ่ม ขึ้นถึง 50 ไมครอน



ภาพที่ 2-31 อนุภาคการสึกหรอแบบปกติ

2.5.10.2 อนุภาคการสึกหรอจากการยึดติดแบบรุนแรง (Severe Sliding Wear Particle)

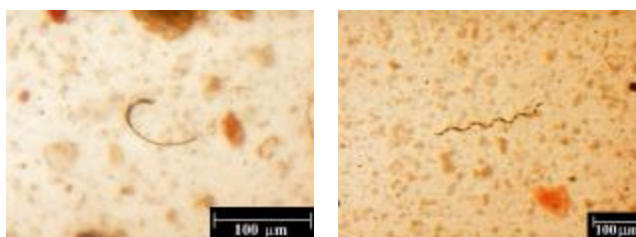
อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียความสมดุลในชิ้นส่วนเครื่องกล ซึ่งอาจเกิดจาก ภาระที่สูง ความเร็วรอบสูงเกินไป ความร้อนสูง การขาดสารหล่อลื่น สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการ ยึดติดของเนื้อวัสดุอย่างรุนแรง ทั้งไปจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 15 ถึง 100 ไมครอน และที่ผิวของอนุภาคจะมีร่องรอยการขีดตามแนวการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องกล ลักษณะเป็นแผ่นแนวยาว อนุภาคจะมีสีน้ำเงิน แกมม่วง สีนํ้าตาล สีดำ อันเนื่องมาจากความร้อนสูง



ภาพที่ 2-32 อนุภาคการสึกหรอจากการยึดติดแบบรุนแรง

2.5.10.3 อนุภาคการสึกหรอแบบขูดขีด (Cutting Wear particle)

อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากกลไกการสึกหรอแบบขูดขีด เนื่องมาจากมีสิ่งสกปรกหรือฝุ่นละอองในสารหล่อลื่น แทรกตัวเข้าไประหว่างผิวคู่สัมผัส ขูดผิวเป็นรอยทำให้เกิดเศษโลหะเป็นเส้นๆ อนุภาคการสึกหรอจะมีความยาวประมาณ 5 ถึง 100 ไมครอน และมีความกว้างตั้งแต่ 2 ถึง 15 ไมครอน และมีขนาดตั้งแต่ 40 ถึง 200 ไมครอน อนุภาคที่เกิดขึ้นจะมี สีน้ำเงิน สีม่วง สีน้ำตาล การพบอนุภาคชนิดนี้ทำให้ทราบว่า มีสิ่งแปลกปลอม เข้ามาในระบบการหล่อลื่นของเครื่องจักร

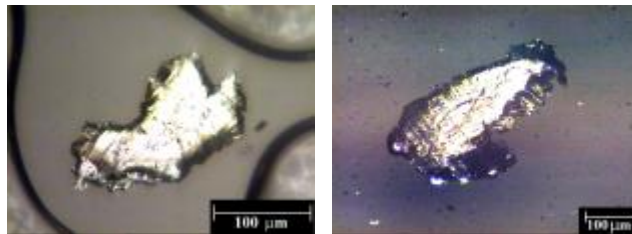


ภาพที่ 2-33 อนุภาคการสึกหรอแบบขูดขีด

2.5.10.4 อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear Particle)

อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการหลุดออกของผิวโลหะ เนื่องมาจากที่ชิ้นส่วนเครื่องจักรรับภาระเป็นวงรอบจนไม่สามารถทนความเค้นได้ ทำให้โลหะเกิดการร้าวขึ้น เมื่อรอยร้าวมีสารหล่อลื่นเข้าไปอัดตัว ทำให้รอยร้าวขยายใหญ่ขึ้นจนเกิดการแตกหลุดของผิวโลหะและเป็นหลุมๆทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่มีรูปร่างเป็นสามมิติ ซึ่งกลไกการสึกหรอแบบล้าตัวจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การล้าตัวจากการลื่นไถลและการล้าตัวจากการสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นเฉพาะกับพื้นผิวชนิดต่างๆ และการล้าตัวจากการลื่นไถล การสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นกับร่องลื่นชนิดกลิ้ง

อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัวที่เกิดจากการลื่นไถลและการลื่นไถล เป็นอนุภาคที่เกิดจากการลื่นไถล และลื่นไถลของพื้นผิวโดยเฉพาะพื้นผิวตรง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของพื้นผิวที่มีการลื่นไถลบริเวณเหนือเส้นสัมผัส (Addendum) และบริเวณใต้เส้นสัมผัส (Dedendum) แต่บริเวณเส้นสัมผัส (Line of contact) จะมีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งตัวโดยสมบูรณ์ โดยอนุภาคการสึกหรอจะเกิดเนื่องจากการรับภาระสูง และขาดสารหล่อลื่น ทำให้เกิดการยึดติด โดยจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 10 ถึง 100 ไมครอน และมีอัตราส่วนขนาดกับความหนาประมาณ 4 ต่อ 1 ส่วน มีลักษณะเป็นก้อนสามมิติมีผิวหน้าค่อนข้างเรียบหรืออาจมีรอยบั้งเล็กน้อยจากการยึดติด มีสีน้ำเงิน สีน้ำตาลทั้งนี้เนื่องมาจากการได้รับความร้อนสูงจากการขาดสารหล่อลื่น



ภาพที่ 2-34 อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัวจากการล้าและการลื่นไถล

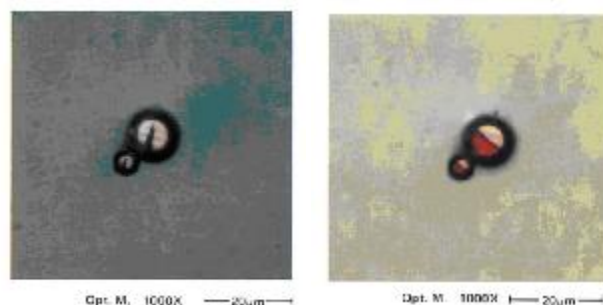
อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัวจะมีด้วยกัน 3 ลักษณะด้วยกันคือ ลักษณะเป็นก้อน (Fatigue Chunk Wear) ลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical Particle) ลักษณะเป็นแผ่นบาง (Laminar Particle)

1. อนุภาคการสึกหรอจากการล้าตัวที่มีลักษณะเป็นก้อนจะมีขนาดโตที่สุดประมาณ 100 ไมครอนและอัตราส่วนระหว่างขนาดกับความหนาประมาณ 10 ต่อ 1 ส่วน อนุภาคการสึกหรอแบบนี้จะมีรูปทรงเป็นสามมิติ ผิวเป็นลักษณะเรียบและมีรูปร่างไม่แน่นอน



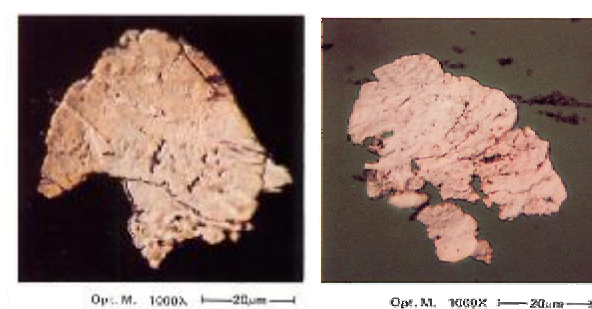
ภาพที่ 2-35 อนุภาคการสึกหรอจากการล้าตัวแบบเป็นก้อน

2. อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัวที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งเกิดจากรอยร้าวแล้วหลุดออกมา จะมีขนาดประมาณ 5 ถึง 15 ไมครอน นอกจากนี้อนุภาคลักษณะทรงกลมนี้ ยังเกิดจากการได้รับความร้อนสูง เช่น กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน กระบวนการเชื่อมและจากการสึกหรอจากการฟ่นปะทะ การเกิดพองอากาศในน้ำมัน ซึ่งขนาดของอนุภาคจะมีขนาดโตถึง 100 ไมครอน



ภาพที่ 2-36 อนุภาคการสึกหรอจากการล้าตัวแบบทรงกลม

3. อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัวที่เกิดจากการกลิ้งตัว ซึ่งเกิดการรอยร้าวบนผิวขยายตัวขนานไปกับผิวหน้าของรางวิ่งรถล้อ ทำให้ผิวโลหะแตกหลุดออกมา และจะมีลักษณะแบนเรียบจากการวิ่งผ่านเข้าไปใต้จุดสัมผัสของการกลิ้งตัว โดยปกติอนุภาคจะมีขนาด 20 ถึง 50 ไมครอนและมีอัตราส่วนระหว่างขนาดกับความหนาประมาณ 30 ต่อ 1 ส่วน



ภาพที่ 2-37 อนุภาคการสึกหรอจากการล้าตัวแบบแผ่น

2.5.10.5 อนุภาคการสึกหรอที่ไม่ใช่เหล็ก (Non- Ferrous Wear Particle)

อนุภาคการสึกหรอที่ไม่ใช่เหล็ก มาจากธาตุที่เป็นโลหะหรือโลหะซึ่งเป็นส่วนผสมของวัสดุชิ้นส่วนเครื่องกล หรือเป็นสิ่งแปลกปลอมที่เข้ามาในระบบการหล่อลื่น

การแยกชนิดอนุภาคทำได้จากการพิจารณาสีของอนุภาค

1. อนุภาคของทองเหลือง สีของอนุภาคเมื่อสะท้อนแสงจะปรากฏเป็นสีเหลืองและอนุภาคของทองเหลืองสัมฤทธิ์ จะมีสีมืดกว่าจะเป็นสีเหลืองชมพู

2. อนุภาคของทองแดง สีของอนุภาคเมื่อสะท้อนแสงจะปรากฏเป็นสีชมพูซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 2 ถึง 100 ไมครอน รูปร่างของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับกลไกการสึกหรอ

3. อนุภาคของอลูมิเนียม สีของอนุภาคเมื่อสะท้อนแสงจะปรากฏเป็นสีเทาเงิน ลักษณะผิวหน้าของอนุภาคจะหยาบไม่เรียบซึ่งจะมีขนาดประมาณ 25 ถึง 500 ไมครอน

4. อนุภาคของนิกเกิล สีของอนุภาคเมื่อสะท้อนแสงจะปรากฏเป็นสีเงิน ลักษณะผิวของอนุภาคจะเรียบ และมีขนาดไม่ต่ำกว่า 50 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคของนิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก จึงพบได้ในร่องล้อแบบกบ

5. อนุภาคของโครเมียม สีของอนุภาคเมื่อสะท้อนแสงจะปรากฏเป็นสีเงิน ลักษณะผิวของอนุภาคจะเรียบ และมีขนาดไม่ต่ำกว่า 50 ไมครอน

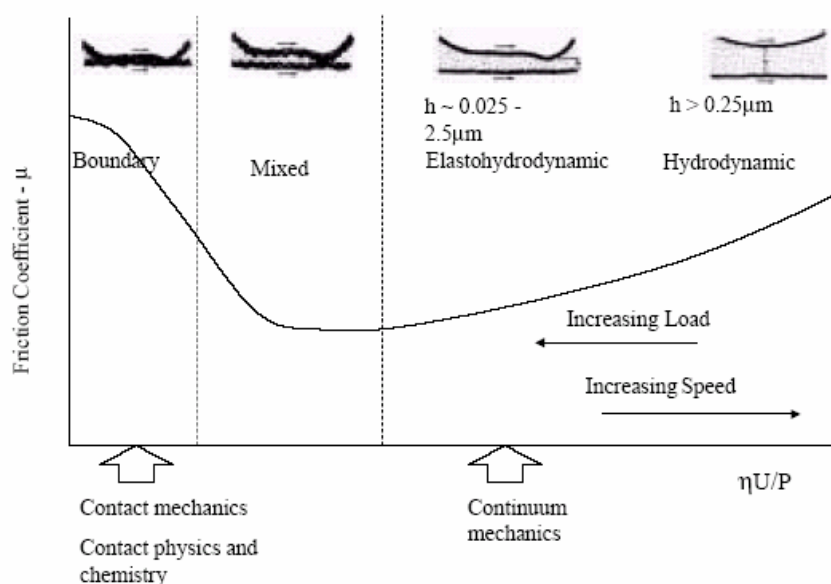
กลไกการสึกหรอที่ต่างกันทำให้เกิดอนุภาคการสึกหรอที่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันจาก ขนาดของอนุภาค ลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว ลักษณะสีของอนุภาค ไม่ลักษณะใดก็ลักษณะหนึ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่าง ดังที่กล่าวมา

ตารางที่ 2-5 แสดงแหล่งที่มาของธาตุในการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว [15]

วัสดุ	แหล่งที่มา	วัสดุ	แหล่งที่มา
เหล็ก	เสื้อสูบ,แหวนลูกสูบ,เพลารางวิ่งรองลิ้น,เม็ดลูกกลิ้ง	โซเดียม	สารประกอบจาระบี
เงิน	ผิวรองลิ้น,การบัดกรีเงิน สลักก้านสูบรถไฟ รองลิ้นเพลาช้อเหวี่ยง	นิกเกิล	น้ำทะเล ,น้ำมันหล่อเย็น ผิวรองลิ้นแบบกาบ ไบพัตเทอร์ไบน์
อลูมิเนียม	ลูกสูบ,อ่างช้อเหวี่ยง วังของรองลิ้นแบบกลิ้ง	ซิลิกอน	เม็ดทราย , ฝุ่นผง สารปรุงแต่งต่อต้านฟอง
โครเมียม	แหวนลูกสูบ,เสื้อสูบ ปลอกสลักช้อต่อก้านสูบ	ดีบุก	ก้านสูบ,ปลอกก้านสูบลูกสูบ, แหวนและสลัก
ทองแดง	เทอร์โบชาร์จเจอร์บูช ลิ้นไอดีไอเสีย	ไททาเนียม	ชิ้นส่วนเครื่องยนต์เจ็ท ไบพัตเทอร์ไบน์
แมกนีเซียม	ชิ้นส่วนเครื่องกลอากาศยาน สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น	ตะกั่ว	จาระบี,ลี น้ำมันช้อเพลิง วัสดุรองลิ้น ,โลหะบัดกรี
โบรอน	ฝุ่นผง, ซีล น้ำมันหล่อเย็น	แบเรียม	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น จาระบี,น้ำที่รั่วเข้ามา
โคบอลต์	บ่าวาล์ว, แหวนลูกสูบ	สังกะสี	รองลิ้นแบบกาบ,ซีลยาง สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น
โมลิบดีนัม	แหวนลูกสูบ, สารปรุงแตงน้ำมัน	แคลเซียม	รองลิ้น, จาระบี สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น
แอนติโมนี	รองลิ้นแบบกาบที่ทำจากโลหะขาว , จาระบี	ฟอสฟอรัส	สารปรุงแตงน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันหล่อเย็น

2.6 การหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่น [22]

การเลือกใช้สารหล่อลื่นให้เหมาะสมกับชนิดของเครื่องจักรนั้นๆ มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยยืดอายุของเครื่องจักร ทั้งนี้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานของขอบเขตการหล่อลื่นที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ ของเครื่องจักร ซึ่งมีกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของขอบเขตการหล่อลื่นที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุด เรียกว่า เส้นโค้งสไตรเบ็ค (STRIECK Curve) โดยมีหลักในการแบ่งขอบเขตเป็น 4 ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงจะต้องมีชนิดและปริมาณสารหล่อลื่นที่เหมาะสม



ภาพที่ 2-38 เส้นโค้งสไตรเบ็ค [22]

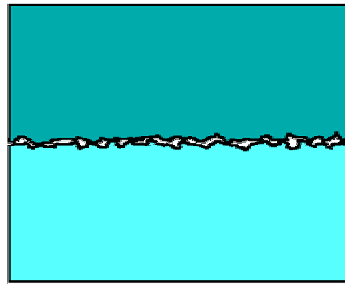
ซึ่ง η = ความหนืดพลวัต, U = ความเร็วรอบ, P = ภาระ

จากภาพที่ 2-28 เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความหนืดของสารหล่อลื่น หรือความเร็วรอบที่ใช้จนรวมถึงการลดลงของภาระ จะมีผลทำให้ค่าผลลัพธ์ $\eta U/P$ ซึ่งบางครั้งเรียกว่าซัมเมอร์ฟิลด์นัมเบอร์ (Summerfield Number) มีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีโอกาสที่ฟิล์มน้ำมันจะหนามากขึ้น นั่นหมายถึงระยะเวลาที่จะเข้าสู่การหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์มหรือแบบไฮโดรไดนามิกใช้เวลาน้อยลง

2.6.1 ขอบเขตการหล่อลื่น (Lubrication Regime)

2.6.1.1 การหล่อลื่นแบบแห้ง (Dry Lubrication)

ในสภาวะของการหล่อลื่นแบบแห้ง ผิวคู่สัมผัสจะสัมผัสกันโดยตรง เกิดการขัดถูเมื่อมีการเคลื่อนที่ และมีการเกาะมากระทำ มีผลให้เกิดการสึกหรอบนผิวคู่สัมผัสของวัสดุ และเกิดความร้อนสูง สภาวะนี้เรียกว่า ได้อีกอย่างว่า สภาวะไร้สารหล่อลื่น

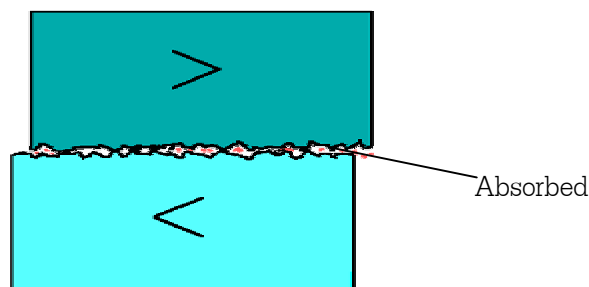


ภาพที่ 2-39 การหล่อลื่นแบบแห้ง

2.6.1.2 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี (Boundary Lubrication Regime)

ขอบเขตของการหล่อลื่นนี้จะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวหน้าของวัสดุที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดจากการดูดกลืนอะตอมในระหว่างการขัดถู ในระหว่างการใช้งานชั้นผิวหน้านี้จะถูกขัดถูแทนเนื้อวัสดุ เนื่องจากด้วยความต้านทานวัสดุที่ต่ำกว่าวัสดุคู่สัมผัส ทำให้ผิวหน้าเหล่านี้สึกหรอออกไปก่อน การใช้สารหล่อลื่นจะช่วยให้เกิดชั้นผิวหน้าใหม่ขึ้นมาใหม่ที่อาจจะเกิดขึ้นตามกระบวนการดังกล่าว ขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมที่หายไป ผิวหน้าเหล่านี้มีหน้าที่ในการปกป้องเนื้อวัสดุของคู่สัมผัสจากการสึกหรอและอุณหภูมิที่เป็นร่องหลุมบนผิวหน้าของคู่สัมผัส ทำให้สามารถรับภาระได้สูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ในการรับภาระ โดยทั่วไปขอบเขตของการหล่อลื่นแบบนี้มักเกิดเนื่องจาก ก. เมื่อมีความหนาของฟิล์มน้ำมันมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานที่เป็นคู่สัมผัส ข. เมื่อมีการใช้งานแบบเดินๆ หยุดๆ หรือมีภาระกระแทก หรือมีความเร็วรอบต่ำๆ ภาระสูง ค. เมื่อมีเงื่อนไขที่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำๆ

การหล่อลื่นชิ้นส่วนเครื่องกลในขอบเขตของการหล่อลื่นนี้อาจจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งต่ำๆ เพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทานและการสึกหรอให้น้อยลงในการใช้งาน และต้องมีการใช้สารปรุงแต่งที่ผสมในน้ำมันหล่อลื่นที่ทำให้เกิดฟิล์มของปฏิกิริยาเคมีมาเคลือบผิววัสดุ โดยที่ฟิล์มนี้จะมีสมบัติการเสียดทานที่ต่ำกว่าผิววัสดุ หรืออาจจะใช้วิธีการเติมสารปรุงแต่งประเภทผงของแข็งลงในน้ำมันหล่อลื่น เช่น ผงกราไฟท์ ผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ เพื่อเข้าไปช่วยลดการเสียดทานและการสึกหรอที่ผิวคู่สัมผัส

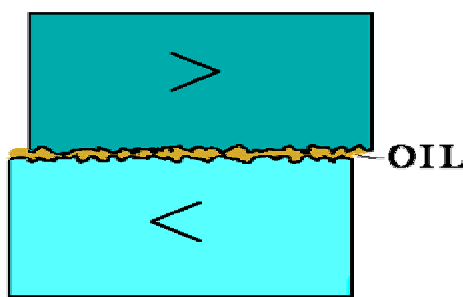


ภาพที่ 2-40 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี

2.6.1.3 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสม (Mixed Lubrication Regime)

ขอบเขตของการหล่อลื่นนี้เกิดจากการที่ปริมาณสารหล่อลื่นเพียงเล็กน้อย ในบริเวณจุดสัมผัสขณะเคลื่อนที่ เพื่อช่วยในการปกป้องผิวคู่สัมผัสไม่ให้สัมผัสกันโดยตรงในบางส่วน ขอบเขตการหล่อลื่นนี้เรียกได้อีกอย่างว่า การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะของการหล่อลื่นแบบนี้ผิวคู่สัมผัสที่ลื่นไถลไป จะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกได้เพียงบางส่วนและมีบางส่วนที่เนื้อวัสดุ (Asperities) ซึ่งจะสัมผัสกันโดยตรง ทำให้กำลังที่ถ่ายทอดไปยังเครื่องจักรกลบางส่วนสูญเสียไป ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสมจะเกิดขึ้นในร่องลื่นในระหว่างการเริ่มต้นทำงานและก่อนหยุดทำงาน รวมถึง ลูกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ฯลฯ

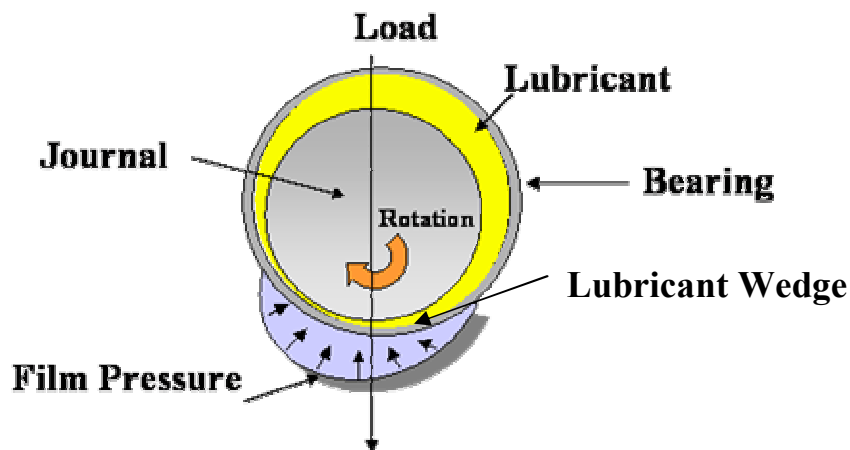
การสึกหรอที่เกิดขึ้นซึ่งมาจากการเสียดสีของเนื้อวัสดุบริเวณผิวสัมผัสที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกกันว่า การเชื่อมเย็น (Cold Weld) ในที่สุดจะเกิดเป็นอนุภาคการสึกหรอแบบยึดติด



ภาพที่ 2-41 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสม

2.6.1.4 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic Lubrication Regime)

ขอบเขตการหล่อลื่นนี้เป็นการแยกผิวของคู่สัมผัสที่มีการเคลื่อนที่ออกจากกัน โดยใช้หลักของการเกิดลิมน้ำมัน ซึ่งเกิดขึ้นจากการไหลของน้ำมันเข้าสู่ช่องแคบด้วยความเร็วสูง สภาวะการหล่อลื่นแบบนี้เรียกได้อีกอย่างว่า การหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์ม ในการก่อตัวของฟิล์มน้ำมันแบบไฮโดรไดนามิก ขึ้นอยู่กับหลายลักษณะประกอบกัน อันได้แก่ ปริมาณสารหล่อลื่นที่มากพอ คู่ผิวสัมผัสที่มีการเคลื่อนที่ที่ต้องมีการเหนียวในแนวรัศมี สารหล่อลื่นต้องถูกบีบเข้าสู่ช่องแคบ ชิ้นส่วนเครื่องกลที่มีการหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์ม อาทิเช่น ร่องลื่นแบบกาน ฯลฯ



ภาพที่ 2-42 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก

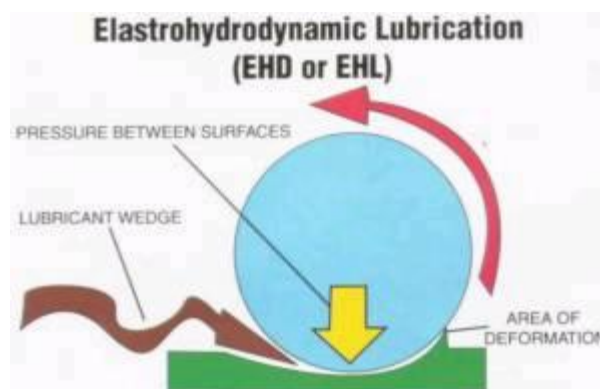
2.6.1.5 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

(Elastohydrodynamic

Lubrication Regime)

ขอบเขตการหล่อลื่นนี้เกิดขึ้นในชั้นส่วนคู่สัมผัสที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งตัว และมีลักษณะของผิวคู่สัมผัสที่มีการถ่ายทอดแรงเป็นจุดสัมผัสหรือเป็นเส้นสัมผัส ซึ่งจะมีพื้นที่ในการรับภาระที่น้อยมากมีผลให้วัสดุที่อยู่ในช่วงใช้งานรับภาระในช่วงการยืดหยุ่น เกิดการยุบตัวในช่วงที่รับภาระก่อให้เกิดพื้นที่ขนาดเล็กขึ้น น้ำมันหล่อลื่นที่ไหลผ่านพื้นที่ดังกล่าวอาจมีแรงกดสูงถึง 10,000 บาร์ ในช่วงเวลาสั้นๆ จะส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนสภาพไปเป็นของแข็งภายในเสี้ยววินาทีก่อให้เกิดการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก (ภาพที่ 2-43) ความหนาของฟิล์มน้ำมันในขอบเขตการหล่อลื่นแบบนี้จะบางมากๆ อยู่ในช่วงความหนาเพียงประมาณไม่ถึงหนึ่งไมครอน เมื่อผ่านช่วงที่รับภาระไปแล้วน้ำมันหล่อลื่นจะคืนสภาพเป็นของเหลวดังเดิม

ชิ้นส่วนเครื่องกลที่มีการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก อาทิเช่น ร่องลื่นแบบเม็ดลูกกลิ้ง ร่องลื่นแบบเม็ดทรงกระบอก ฟันเฟืองตรง ลูกเบี้ยว เป็นต้น

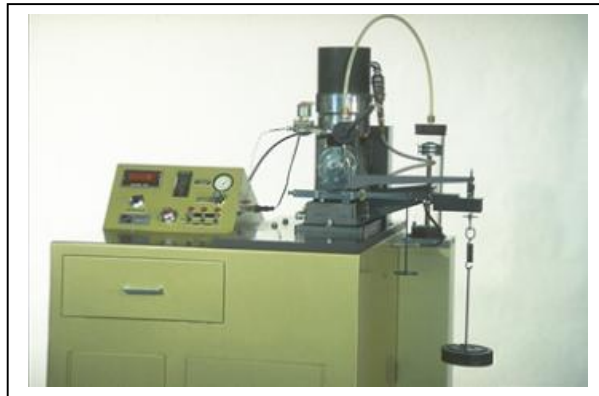


ภาพที่ 2-43 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิก

2.7 เครื่องทดสอบทางไทรโบโลยี (Tribo - Tester) [14]

ในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องกล ถ้าเป็นไปได้จะต้องทดสอบบนเครื่องจักรที่ใช้งาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง แต่เนื่องจากข้อจำกัดหลายๆ อย่าง เช่น ค่าใช้จ่าย ระยะเวลา เป็นต้น เป็นเหตุผลที่ทำให้ต้องทดสอบการสึกหรอด้วยการจำลองการสึกหรอบนเครื่องทดสอบ ซึ่งเครื่องทดสอบได้มีการพัฒนาให้มีการจำลองกลไกการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องกลที่ใช้ในงานจริง โดยมีมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับ อาทิเช่น ASTM, IP, DIN เป็นต้น เครื่องทดสอบการสึกหรอที่ใช้จำลองการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องกล ได้แก่ เครื่องทดสอบทิมเคน (Timken Wear Tester) เครื่องทดสอบแบบโฟร์บอล (Four Ball Wear Tester) เครื่องทดสอบแบบฟาแลกซ์ (Falex Wear Tester) เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disc Wear Tester) เป็นต้น ซึ่งเครื่องทดสอบแต่ละแบบใช้กลไกการเคลื่อนที่และการสัมผัสแตกต่างกัน เพื่อให้ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องกลจริง

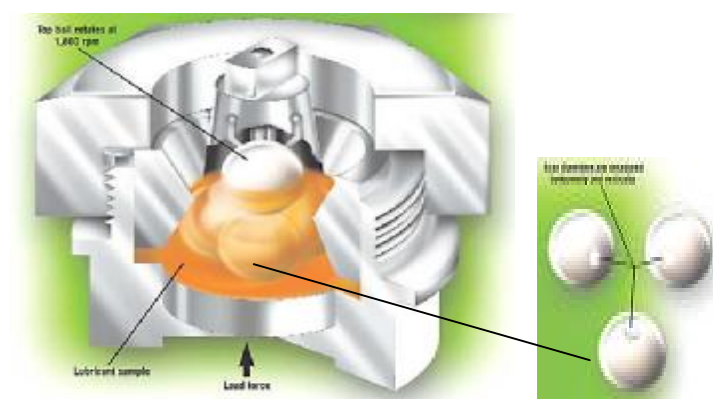
2.7.1 เครื่องทดสอบแบบทิมเคน ทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดสูง (Timken Extreme Pressure Tester) เครื่องทดสอบแบบทิมเคนแบบนี้ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของสารต้านทานการสึกหรอและหาประสิทธิภาพของสารในการรับแรงกดสูงในสารหล่อลื่น มีหลักการโดยการหมุนแท่งเหล็กทรงกระบอกด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที บนก้อนเหล็กที่มีน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่างหล่อลื่นอยู่ ซึ่งภาระระหว่างก้อนเหล็กและแท่งเหล็กจะสามารถลดหรือเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วง การวัดผลจะใช้การวัดความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังทดสอบ ค่าวัดที่ได้เป็นค่าน้ำหนักสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการสึกหรอแบบยึดติดอย่างรุนแรง ระหว่างก้อนเหล็กกับแท่งทดสอบ



ภาพที่ 2-44 การทดสอบแบบทิมเคน

2.7.2 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบโฟร์บอลล์ (Four-Ball Wear Tester)

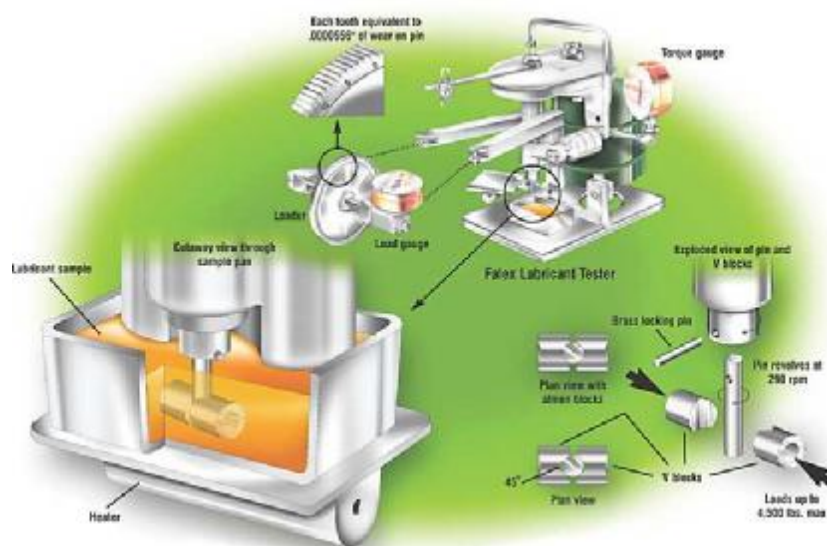
เครื่องทดสอบแบบโฟร์บอลล์ ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติการรับแรงกดสูงและการต่อต้านการสึกหรอของสารหล่อลื่น เครื่องทดสอบนี้จะใช้เม็ดลูกปืนทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 4 เม็ด โดยให้เม็ดลูกปืนหนึ่งลูกอยู่ด้านบนยึดเข้ากับแกนหมุนที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1760 รอบต่อนาที มีการเคลื่อนที่แบบลิ้นไถและกลิ้งตัวบนเม็ดลูกปืน 3 เม็ด ที่ถูกยึดแน่นอยู่ภายในถ้วยด้านล่างที่ใส่สารหล่อลื่นสำหรับทดสอบ ภาระระหว่างเม็ดลูกปืนสามารถลดหรือเพิ่มขึ้นได้ ด้วยการใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วง การทดสอบจะหาค่าภาระที่เรียกว่า LWI (Load Wear Index) โดยการแปลค่าน้ำหนักหรือภาระเป็นค่าเฉพาะตามมาตรฐาน และค่าภาระที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดของเม็ดลูกปืนทั้งสี่เม็ด (Weld Load) และการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกหรอบนเม็ดลูกปืนสามเม็ดด้านล่าง (MWS : Mean Wear Scar Diameter) เครื่องทดสอบแบบนี้สามารถทดสอบสารหล่อลื่นได้หลายชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น จาระบี เป็นต้น



ภาพที่ 2-45 การทดสอบแบบโฟร์บอลล์

2.7.3 เครื่องทดสอบฟาเล็กซ์แบบวีบล็อก (Falex Pin-on-V Block Tester)

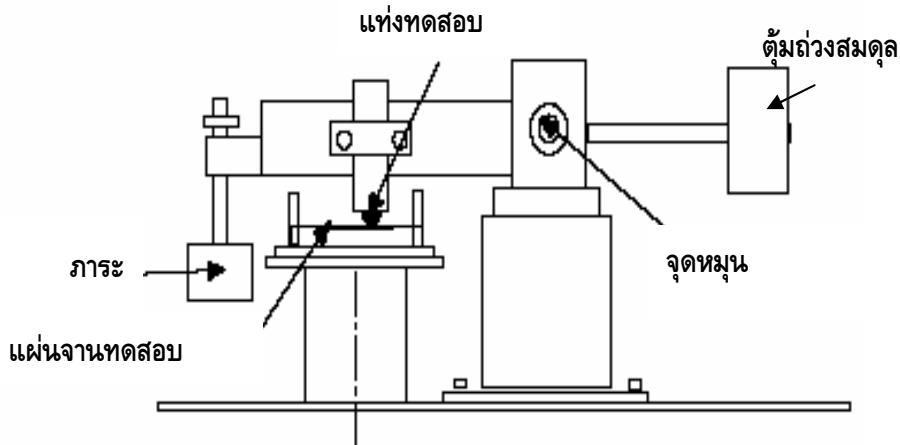
เครื่องทดสอบฟาเล็กซ์แบบวีบล็อก ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่อต้านการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่น โดยการหมุนแท่งเหล็กด้วยความเร็วรอบ 290 รอบต่อนาที ในลักษณะเส้นไถไปบนวีบล็อกที่จมอยู่ในน้ำมันที่ทดสอบ ภาระจะถูกเพิ่มค่าขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยกลไกแบบเรทเช็ต (Ratchet) มีค่าเพิ่มขึ้นทีละประมาณ 1,112 นิวตัน จนกระทั่งสลักจำกัดการหมุนขาด (Brass Locking Pin) เนื่องจากเกิดการยึดติดแบบรุนแรงบนแท่งเหล็กและวีบล็อก



ภาพที่ 2-46 การทดสอบฟาเล็กซ์แบบวีบล็อก

2.7.4 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin-on-Disc Wear Tester)

เครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ ใช้จำลองกลไกการสึกหรอแบบชุด ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในห้องทดสอบมากที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างขึ้นเองได้ หลักการของเครื่องทดสอบนี้คือการใช้แท่งวัสดุ (Pin) กดลงบนแผ่นจาน (Disc) ซึ่งเป็นวัสดุต่างชนิดหรือชนิดเดียวกันเพื่อให้เกิดกลไกการเคลื่อนที่แบบเส้นไถ โดยสามารถปรับ แรงกด ความเร็วรอบของแผ่นจานและเวลาในการทดสอบให้เหมาะสมได้ หลังการทดสอบอาจจะชั่งน้ำหนักที่หายไปของแท่งวัสดุและแผ่นจานเพื่อพิจารณาวัสดุคู่สัมผัสว่าวัสดุชนิดใดสึกหรอก่อนกันหรือนำเอาเศษโลหะจากการสึกหรอ ไปประเมินวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาคการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์

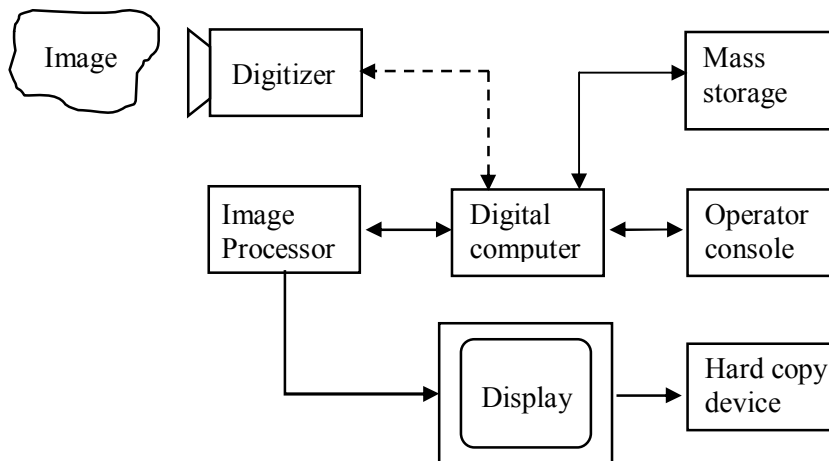


ภาพที่ 2-47 การทดสอบแบบพินฮอล

2.8 การวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Image Analysis) [23], [24], [25]

2.8.1 มูลฐานของภาพแบบดิจิทัล (Digital Image Fundamentals)

รูปภาพ (image or monochrome image) หมายถึงความเข้มของแสง (light intensity) ฟังก์ชัน $f(x,y)$ ในสองมิติ โดยที่ x และ y เป็นจุดพิกัดในสเปซ (spatial coordinate) และค่าของ f ที่จุด (x,y) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสว่างหรือค่าระดับสีเทา (gray level) ของรูปภาพที่จุดนั้น ภาพดิจิทัลคือรูปภาพ $f(x,y)$ ที่จุด spatial coordinate (x,y) และสเกลสีเทาได้ถูกแบ่งเป็นช่วง (discretized) เราสามารถแบ่งรูปภาพออกเป็นส่วนๆ เหมือนเมทริกซ์ โดยตำแหน่งเฉพาะของแต่ละเอลิเมนต์บนรูปภาพ ที่นิยมเรียกว่ากันทั่วไปว่าจุดภาพ หรือ พิกเซล (pixel) หรือ “pels” ค่าของแต่ละพิกเซลแสดงโดยใช้ค่า สเกลสีเทา โดยทั่วไปเราจะแบ่งรูปภาพเป็น สแควร์ อาร์เรย์ (square array) ซึ่งมีขนาดและจำนวน สเกลสีเทาเป็นค่าที่ได้จากเลข 2 ยกกำลัง เช่นภาพขนาด 512×512 อาร์เรย์ ที่มี 256 gray levels เป็นต้น



ภาพที่ 2-48 ส่วนประกอบของระบบกระบวนการวิเคราะห์ภาพดิจิทัล [23]

ระบบกระบวนการวิเคราะห์ภาพดิจิทัล ประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ 5 ส่วนคือ

2.8.1.1 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

การประมวลผลภาพ (Image Processing) ทำหน้าที่ 4 ประการคือ image acquisition, storage, low-level (fast) processing, และ display การทำงานของโมดูลกระบวนการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing Module) คือการจับภาพซึ่งมักอยู่ในรูปของสัญญาณทีวี (TV Signal) โดยในอเมริกาเป็นระบบ NTSC คือ 1 เฟรม ในเวลา 1/30 วินาที (ระบบ PAL ที่ประเทศไทยใช้เป็นภาพ 1 เฟรม ในเวลา 1/25 วินาที) ที่ทำหน้าที่จับภาพจึงมักถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเฟรมแกร็บเบอร์ (frame grabber) หลังจากรูปภาพแต่ละเฟรมถูกจับโดยเฟรมแกร็บเบอร์แล้ว ก็จะถูกเก็บชั่วคราวในส่วนคลังเก็บข้อมูลที่เรียกว่าเฟรมบัฟเฟอร์ (frame buffer) ซึ่งมีความสามารถในการเก็บภาพได้รวดเร็วเท่ากับจำนวนเฟรมต่อหน่วยเวลาของเฟรมแกร็บเบอร์

2.8.1.2 อุปกรณ์แปลงข้อมูลแบบแอนะล็อกเป็นข้อมูลแบบดิจิทัล (Digitizer)

ดิจิทัลाइเซอร์ (Digitizer) ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปภาพให้อยู่ในลักษณะของตัวเลข ซึ่งสามารถเก็บได้โดยคอมพิวเตอร์ (digital computer) ได้ หน้าที่สำคัญของคอมพิวเตอร์ในระบบก็คือขยายความสามารถในการวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรมซึ่งมีความยุ่งยากสลับซับซ้อน เพื่อจัดการกับรูปภาพซึ่งเกินขีดความสามารถของโปรเซสซึ่งมอดูลในอิมเมจโปรเซสซึ่ง

2.8.1.3 คอมพิวเตอร์ (Digital Computer)

2.8.1.4 คลังเก็บข้อมูล (Storage Device)

2.8.1.5 จอแสดงผลและอุปกรณ์บันทึกผล (Display and Recording Device)

ในกระบวนการอิมเมจโปรเซสซึ่งมีความต้องการในการเก็บข้อมูลที่หน่วยเก็บข้อมูล (Storage device) ที่ค่อนข้างใหญ่ ตัวอย่างเช่นรูปภาพขนาด 512 x 512 พิกเซล ซึ่งมี gray level 256 ระดับ (8 บิต) ต้องการหน่วยความจำขนาด 0.25 เมกกะไบต์ ดังนั้นขนาดของหน่วยเก็บข้อมูลขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ เช่นในระบบขนาดเล็กเราใช้หน่วยความจำที่มีอยู่ในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เก็บรูปภาพได้

2.8.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติรูปภาพ (Image Transforms)

รูปภาพที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่นการปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพ (image enhancement) การรักษาคุณภาพรูปภาพ (restoration) และการกำหนดคุณลักษณะของรูปภาพ (description) กระทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปภาพ (transforms) ด้วยวิธีการต่างๆ อาทิเช่น ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fourier Transform), ฮัก์ทรานสฟอร์ม (Hough Transform), วอลซ์ทรานสฟอร์ม (Walsh transform) และ ฮาเดเมียร์ทรานสฟอร์ม (Hadamare transform) เป็นต้น

2.8.3 การคำนวณวิเคราะห์ทางภาพ (Computational Image Analysis)

การพิจารณาจำแนกรูปร่างรูปทรงของอนุภาคการสีกหรือ โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ดังต่อไปนี้

2.8.3.1 การประมวลผลรูปร่างเบื้องต้น (Shape Pre -Processing) เป็นขั้นตอนแรกที่เป็นจุดเริ่มต้นในกระบวนการวิเคราะห์ภาพ เริ่มตั้งแต่การจัดการชนิดของไฟล์ภาพ การจัดลึ่รบกวนภาพและการนอมอลไลซ์ภาพ เป็นต้น

2.8.3.2 การวิเคราะห์รูปทรงสัณฐาน (Shape Transformation) การวิเคราะห์ค่าเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพ ซึ่งเรียกว่า อิมเมจเทรลโชดิง (Image Thresholding) ซึ่งเป็นวิธีการแยกภาพในสิ่งที่สนใจ (Object) ออกจากพื้นหลัง (Background) ด้วยการเปลี่ยนคุณสมบัติของภาพจากภาพสีเทา (Gray Image) ไปเป็นภาพขาวดำ (Binary Image or Monochrome Image) ภาพขาวดำซึ่งแสดงระดับสีแต่ละระดับเป็นค่าสีเทา (gray value) โดยพื้นหน้าที่เป็นวัตถุที่เราสนใจเป็นสีดำที่มีค่าเท่ากับ 1 และส่วนที่เป็นพื้นหลังเป็นสีขาวมีค่าเท่ากับ 0

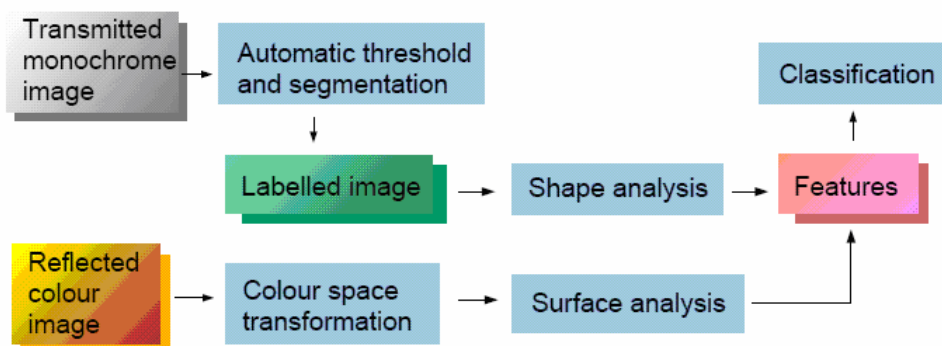
ตารางที่ 2-6 ค่าเชิงตัวเลขของพิกเซล [24]

ภาพระดับสีเทา	ภาพไบนารี
0 (มืด)	0 = ขาว = พื้นหลัง
255 (สว่าง)	1 = ดำ = พื้นหน้า

ซึ่งค่าจุดภาพของพื้นหน้า (Foreground) วัตถุที่เราสนใจจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 240 พิกเซล ส่วนค่าจุดภาพของพื้นหลังจะอยู่ในช่วง 250 ถึง 255 พิกเซล
อัลกอริทึมของกระบวนการอิมเมจเทรลโชดิง [24]

For each pixel in the image do If (pixel_value < threshold) then label the pixel as an object pixel ; else label the pixel as a background pixel;	(2-1)
---	-------

ผลการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากอัลกอริทึมนี้แสดงภาพขาวดำที่มีพื้นหน้าเป็นวัตถุที่เราสนใจมีค่าเท่ากับ 1 และพื้นหลังมีค่าเท่ากับ 0



ภาพที่ 2-49 ขั้นตอนของกระบวนการวิเคราะห์ภาพทั่วไป [17]

คุณลักษณะที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์รูปร่าง อาทิเช่น พื้นที่ เส้นรอบรูป ความกลม สัดส่วน ความกว้างต่อความยาว วงกลมเฟอเร่ เป็นต้น พื้นที่เป็นจำนวนจุดภาพที่อยู่ภายในขอบเขตที่เราต้องการ อัลกอริทึมของกระบวนการวิเคราะห์พื้นที่ [24]

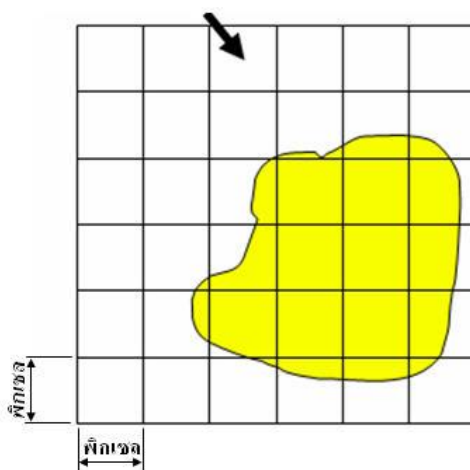
```

area = 0 ;
For p = 1 to MAX_P do
  For q = 1 to MAX_Q do
    Area = area + g (p, q) ;
  
```

(2-2)

เมื่อ $g(p, q) = 1$ พิกเซลที่ต้องการ

$g(p, q) = 0$ พิกเซลที่เป็นพื้นหลัง



ภาพที่ 2-50 หลักการวิเคราะห์พื้นที่

เส้นรอบรูป (Perimeter) เป็นความยาวของเส้นขอบรูปของวัตถุ ในกระบวนการทางภาพภาพต้องเป็นภาพสเกลสีเทา

อัลกอริทึมของกระบวนการวิเคราะห์เส้นรอบรูป [24]

1. Read the input binary image;
2. Apply the binary image edge detection algorithm;
3. Perimeter = number of edge points detected in step 2;

(2-3)

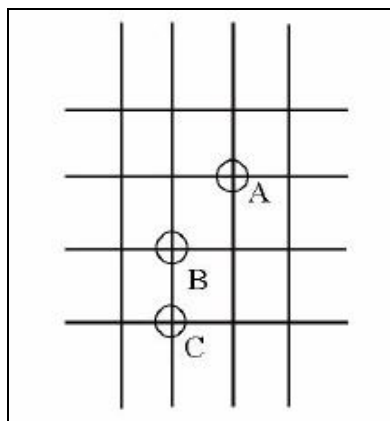
การวิเคราะห์เส้นรอบรูปใช้อัลกอริทึมของการวิเคราะห์ขอบภาพ (Edge Detection) เหมาะกับจุดที่สนใจมีพิกเซล 4 จุด จุดภาพมีระยะระหว่างจุดอยู่ในแนวนอนหรือแนวตั้ง มีค่าเท่ากับ 1 อัลกอริทึมของกระบวนการวิเคราะห์ขอบภาพ [24]

```

For each pixel p (x,y) do
    h (x,y) = 0
    If p (x,y) = 1
        If (p (x,y +1) = 0 OR p (x,y -1) = 0
            OR p (x +1,y) = 0 OR p (x -1,y) = 0
                h (x,y) = 1
  
```

(2-4)

ในกรณีที่จุดภาพที่สนใจมีพิกเซล 8 จุดล้อมรอบ (8 - neighborhood) ทำให้ระยะระหว่างจุดไม่คงที่ โดยมีค่าประมาณ $\sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{ij}$ เมื่อจุดเป็นเส้นทแยงมุม จะมีเส้นเป็นส่วนโค้ง ดังได้แสดงตามภาพที่ 2-51



ภาพที่ 2-51 หลักการจุดภาพทแยงมุม [24]

จากภาพที่ 2-51 ระยะระหว่าง A ถึง B มีระยะประมาณ $\sqrt{2}$ และระยะระหว่าง B ถึง C มีระยะเท่ากับ 1

วงกลมเฟอร์รี (Ferret Diameter) การหมุนจุดโคออดิเนตไปรอบๆ วัตถุเพื่อหาระยะของจุดสองจุดที่กว้างที่สุดบนวัตถุแล้ววาดเป็นวงกลม แสดงถึงขนาดของวัตถุที่สนใจ

อัลกอริทึมของกระบวนการวิเคราะห์ห้วงกลมเฟอร์รี [24]

Calculate the edge of g and form the complex signal

$u = b + cj$, where b and c are the coordinate of the edge points ;

$n = \text{length}(u)$; / * number of points of u */

$d_{\max} = 0$;

For $i1 = 1$ to $(n-1)$ **do**

For $i2 = (i1+1)$ to n **do**

If $(|u(i1) - u(i2)| > d_{\max})$

$d_{\max} = |u(i1) - u(i2)|$;

$lm = i1$;

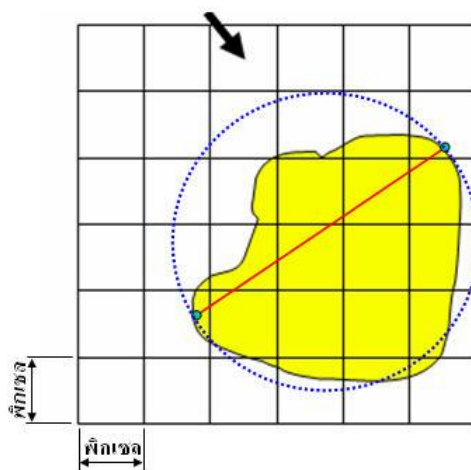
$cm = i2$;

(2-5)

เมื่อ g = ภาพไบนารี

$g(p, q) = 1$ พิกเซลที่ต้องการ

$g(p, q) = 0$ พิกเซลที่เป็นพื้นหลัง



ภาพที่ 2-52 หลักการวิเคราะห์ห้วงกลมเฟอร์รี

พื้นที่นูน (Convex Area) เป็นการหาพื้นที่ที่หน้าตัดจากวงกลมเฟอร์เรต์ [17]

$$\pi/4(\text{Ferret Diameter})^2 \quad (2-6)$$

สัดส่วนพื้นที่ (Fullness Ratio) เป็นการหาความสัมพันธ์ของสัดส่วนพื้นที่นูนกับพื้นที่วัตถุที่สนใจ ถ้ามีค่าเป็น 1 แสดงว่ามีรูปทรงสมมาตร ถ้ามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีลักษณะเป็นเส้นยาว [17]

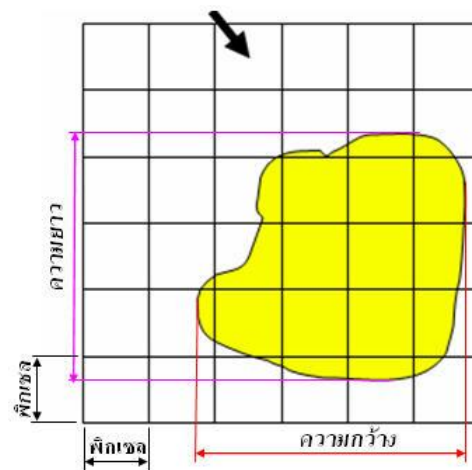
$$\sqrt{\frac{\text{Convex_Area}}{\text{Area}}} \quad (2-7)$$

เส้นรอบรูปนูน (Convex Perimeter) เป็นการหาความสัมพันธ์ของเส้นรอบรูปวัตถุที่สนใจ โดยการดึงเส้นรอบรูปให้ตึงเป็นเส้นตรง ถ้ามีค่ามากแสดงว่าวัตถุที่ขนาดใหญ่ [17]

$$2 * \tan(\pi/2)(\text{Ferret Diameter}) \quad (2-8)$$

อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (Aspect Ratio) เป็นระยะที่มากที่สุดที่ได้จากการลากผ่านจุดสองจุดในแนวระนาบหารด้วยระยะที่มากที่สุดที่ได้จากการลากผ่านจุดสองจุดในแนวตั้งฉาก ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของวัตถุที่สนใจ ถ้าวัตถุมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าวัตถุมีรูปทรงที่สมมาตร [25]

$$\frac{\text{width}}{\text{high}} \quad (2-9)$$

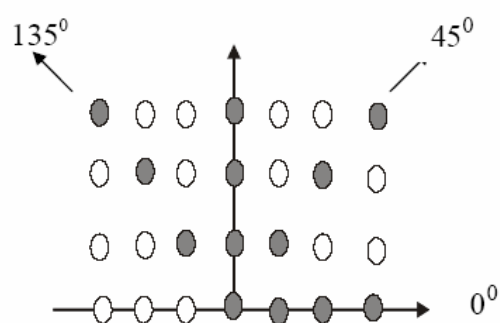


ภาพที่ 2-53 หลักการวิเคราะห์อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว

ความกลม (Circularity) หรือบางทีเรียกว่า ฟอर्मแฟคเตอร์ (Form Factor) เป็นค่าเชิงปริมาณที่แสดงถึงรูปทรงของวัตถุที่สนใจ จากความสัมพันธ์ของพื้นที่และเส้นรอบรูป ถ้ารูปทรงมีค่าความกลมเท่ากับ 1 หมายความว่าวัตถุมีลักษณะเป็นทรงกลม [1], [25]

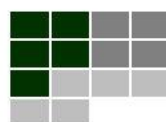
$$\text{Circularity} = 4\pi \cdot \text{Area} / \text{perimeter}^2 \quad (2-10)$$

2.8.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface Texture Analysis) เป็นการวัดค่าเชิงปริมาณสี ขาวและสีดำจัด (Contrast) ของพิกเซลบนวัตถุที่สนใจ ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้กันมากเรียกว่า การวิเคราะห์ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ของระดับสีเทา (GLCM: Gray - Level Co - occurrence Matrix) เมตริกซ์จัตุรัส ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนของระดับสีเทา โดยการใช้การเปรียบเทียบพิกเซลที่ละคู่ซึ่งเรียกว่าพิกเซลอ้างอิง (reference pixel) และพิกเซลใกล้เคียง(neighbor pixel) แสดงความน่าจะเป็นของคู่พิกเซลที่เป็นไปได้สี่ทิศทางคือ 0 ,45 ,90 ,135 องศา ค่าเฉลี่ยของ GLCM คำนวณเป็นรูปแบบเดียวกัน ค่าในเมตริกซ์แต่ละค่าแสดงความเป็นไปได้ของการเกิดความสัมพันธ์ (Co- occurrence) [4], [7], [18], [26], [27]



ภาพที่ 2-54 ทิศทางในการวิเคราะห์จีแอลซีเอ็ม

การกำหนดค่าของระดับสีของภาพสเกลสีเทา จะมีการกำหนดเป็นค่าเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการคำนวณ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ของระดับสีเทาซึ่งขึ้นอยู่กับการแปลงภาพ เช่นภาพขนาด 2 บิต จะมีระดับสี 4 ระดับ ตั้งแต่ 0 ถึง 3 และภาพขนาด 8 บิต จะมีระดับสี 256 ระดับตั้งแต่ 0 ถึง 255



0	0	1	1
0	0	1	1
0	2	2	2
2	2	3	3

ภาพที่ 2-55 การกำหนดค่าระดับสีเทา 2 บิต [27]

จากภาพที่ 2-55 เป็นตัวอย่างในการกำหนดค่าระดับสีเทา ซึ่งเป็นการกำหนดระดับสีที่ 4 ระดับจากสีดำ ถึงสีขาว

เมตริกซ์ความสัมพันธ์ของระดับสีเทา (GLCM) มีตัวแปรที่ใช้พิจารณาลักษณะของพื้นผิวของวัตถุที่สนใจ ประกอบไปด้วยค่าวัดต่างๆ ดังนี้

นอมอลไลซ์เซชัน (Normalization equation) เป็นสมการถ่ายทอดความน่าจะเป็นของค่าระดับสีเทา

$$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}} \quad (2-11)$$

เอนโทรปี (Entropy) เป็นค่าวัดเชิงปริมาณความขรุขระของพื้นผิว

$$\text{Entropy} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j}) \quad (2-12)$$

คอนทราสต์ (Contrast) หรือเรียกว่า ผลรวมของค่าความแปรปรวน (Sum of Square variance) เป็นค่าวัดเชิงปริมาณที่แสดงความมืดและสว่างของพื้นผิวบนพิกเซลที่สนใจ

$$\text{Contrast} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (1 - j)^2 \quad (2-13)$$

โมเมนต์ความแตกต่างย้อนกลับ (Inverse Difference Moment) หรือเรียกว่า ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) เป็นค่าวัดเชิงปริมาณความเรียบของพื้นผิว

$$\text{IDM} = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2} \quad (2-14)$$

โมเมนต์อันดับสองเชิงมุม (Angular Second Moment) เป็นค่าเชิงปริมาณทางฟิสิกส์ของโมเมนต์เชิงมุมในการหมุนของวัตถุด้วยความเร็ว

$$\text{ASM} = \sum_{i,j=0}^{N-1} (P_{i,j})^2 \quad (2-15)$$

ความเกี่ยวพันกัน (Correlation) เป็นค่าวัดความเป็นเชิงเส้นของระดับสีเทานพิกเซลที่อยู่ใกล้เคียง

$$\text{Correlation} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2) + (\sigma_j^2)}} \quad (2-16)$$

$$\mu_i = \sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{i,j} \quad (2-17)$$

μ_i = ค่าเฉลี่ยระดับสีเทาพิกเซลอ้างอิง

$$\mu_j = \sum_{i,j=0}^{N-1} jP_{i,j} \quad (2-18)$$

μ_j = ค่าเฉลี่ยระดับสีเทาพิกเซลใกล้เคียง

$$\sigma_i^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - \mu_i)^2 \quad (2-19)$$

σ_i^2 = ความแปรปรวนค่าระดับสีเทาพิกเซลอ้างอิง

$$\sigma_j^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (j - \mu_j)^2 \quad (2-20)$$

σ_j^2 = ความแปรปรวนค่าระดับสีเทาพิกเซลใกล้เคียง

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_i^2} \quad (2-21)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_j^2} \quad (2-22)$$

σ_i = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าระดับสีเทาพิกเซลอ้างอิง

σ_j = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานระดับสีเทาพิกเซลใกล้เคียง

$P_{i,j}$ = ความน่าจะเป็นของพิกเซล ตำแหน่งแถวที่ i และ ตำแหน่งหลักที่ j

$V_{i,j}$ = ผลรวมของค่าเมตริกซ์กับทรานส์โพสเมตริกซ์ ตำแหน่งแถวที่ i และ ตำแหน่งหลักที่ j

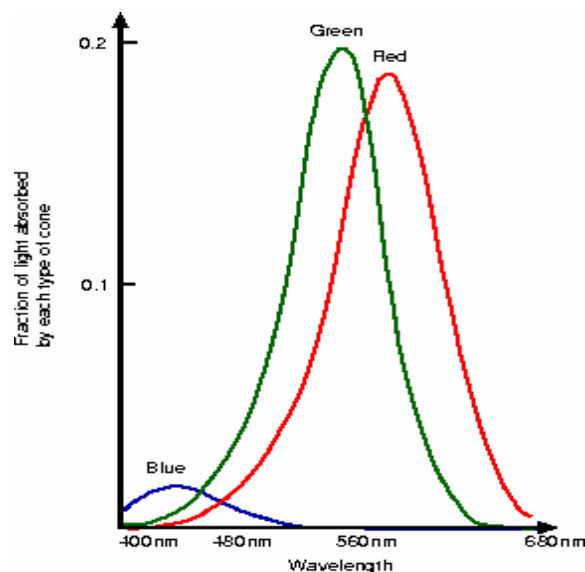
i = ระดับสีเทา ตั้งแต่ 0 ถึง 255 (พิกเซลอ้างอิง)

j = ระดับสีเทา ตั้งแต่ 0 ถึง 255 (พิกเซลไกล์เคียง)

N = จำนวนของระดับสีเทานวตฤที่สนใจ

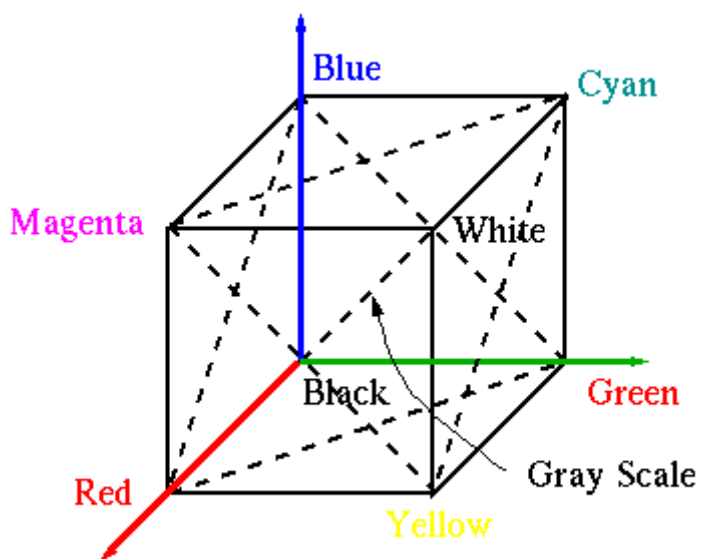
2.8.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะสี (Color Image Analysis) [6], [28]

สายตามนุษย์สามารถมองเห็นแม่สี (Primary colors) อันได้แก่สีแดง (Red) สีเขียว (Green) สีนํ้าเงิน (Blue) หรือที่นิยมเรียกว่า อาร์จีบี (RGB) ประสาทมนุษย์มีความไวต่อการมองเห็นสีแดงได้ประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ สีเขียวประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ สีนํ้าเงินประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ สีที่มองเห็นอยู่ในรูปของแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของแมสีในตามนุษย์

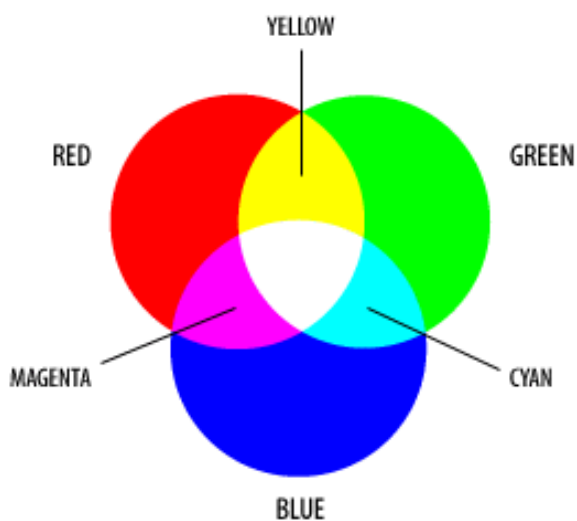


ภาพที่ 2-56 การดูดกลืนแสงของแมสีในตามนุษย์

โมเดลสีอาร์จีบี (RGB Color Model) เป็นรูปแบบสีที่อยู่บนโคออดิเนตแบบคาร์ทีเซียน ดังได้แสดงในภาพที่ 2-57 ซึ่งค่าอาร์จีบีจะอยู่ที่มุมปลายแกนโคออดิเนต ส่วนที่เกิดจากการทับซ้อนกันของแมสี เรียกว่า สีลำดับรอง (Secondary Color) อันได้แก่สีฟ้า สีม่วง สีเหลือง จะอยู่บนมุมที่เหลือ และตรงจุดโคออดิเนตจะเป็นสีดำ

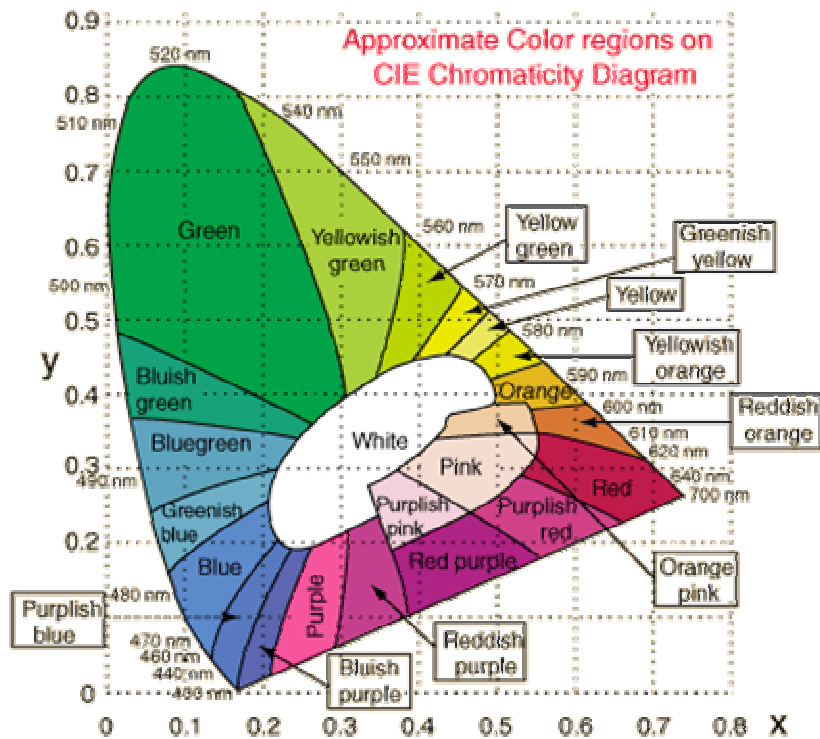


ภาพที่ 2-57 ระบบโคออดิเนตของสี



ภาพที่ 2-58 โมเดลสี

ค่าเชิงตัวเลขของสีจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 ระดับ ค่าของสีมีค่าเท่ากับ 0 แสดงถึงเป็นสีดำและค่า 255 เป็นระดับสูงสุดของสีแสดงถึงความเป็นสีขาว การผสมของสีจะทำให้เกิดเป็นสีต่างๆมากมาย



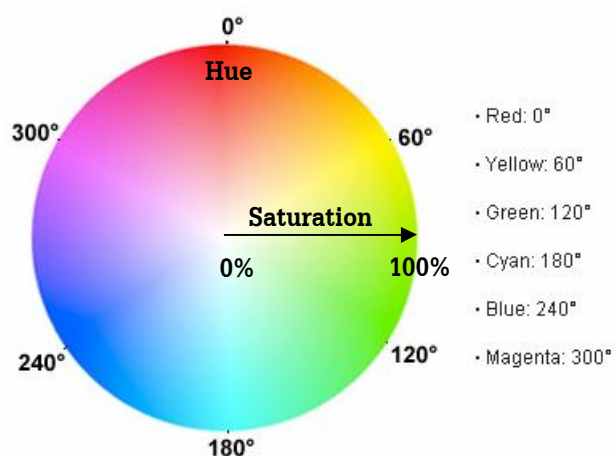
ภาพที่ 2-59 ไดอะแกรมโครเมติการดูกลืนสี [28]

ในการแยกสีด้วยคอมพิวเตอร์จะไม่ใช้ค่าอาร์จีบีเนื่องจากจะเกิดความผิดพลาดได้เมื่อมีโทนสีใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปจะมีการแปลงค่าอาร์จีบีไปเป็นค่า เอชเอสไอ (HSI: Hue, Saturation, Intensity)

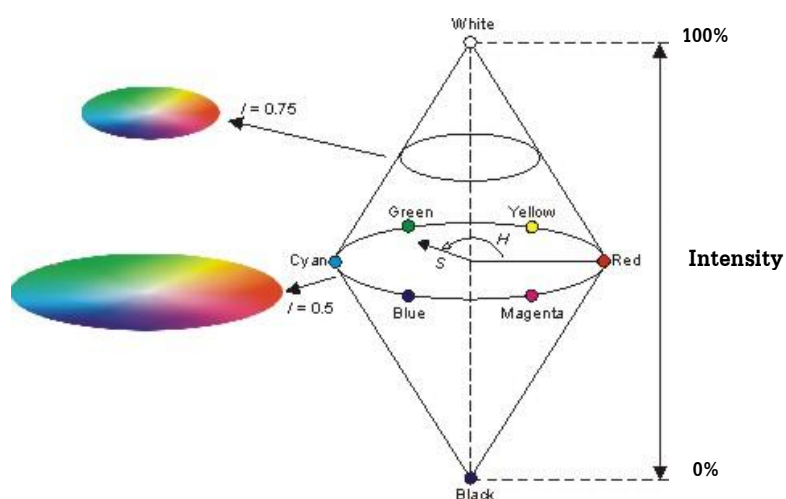
ค่าสีล้วน (Hue) เป็นสีบริสุทธิ์ที่สะท้อนหรือปล่อยผ่านของวัตถุ การวัดสีตามตำแหน่งบนแผนภูมิวงกลมสีล้วนมาตรฐาน แสดงเป็นมุมตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยมุมที่ได้จะเป็นการระบุชื่อของสี

ความอิ่มตัวของสี (Saturation) เป็นค่าความบริสุทธิ์ของสี หรือบางที่เรียกว่า โครมา (Chroma) ค่าเชิงปริมาณสัดส่วนของระดับสีเทา ตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ 0 เปอร์เซ็นต์เป็นสีเทาและที่ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นความอิ่มตัวของสีล้วนมากที่สุด จากการวัดค่าในแผนภูมิวงกลมสีมาตรฐานจากจุดศูนย์กลางถึงขอบของวงกลม ดังภาพที่ 2-60

ความเข้มข้นของสี (Intensity) หรือบางที่เรียกว่า ความสว่าง (Brightness) เป็นค่าปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างและมืดที่สุดของสี มีค่าวัดตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ 0 เปอร์เซ็นต์เป็นค่าสีที่มืดที่สุดและที่ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นค่าความสว่างที่สุดของสี



ภาพที่ 2-60 แผนภูมิวงกลมสีเส้นมาตรฐาน [28]



ภาพที่ 2-61 โมเดลสีเอชเอสไอ [28]

การแปลงค่าเอชเอสไอ หาได้จากค่าความสัมพันธ์ของค่าสีอาร์จีบีดังนี้

$$H = \frac{0.5[(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \quad (2-23)$$

$$S = 255 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B) \quad (2-24)$$

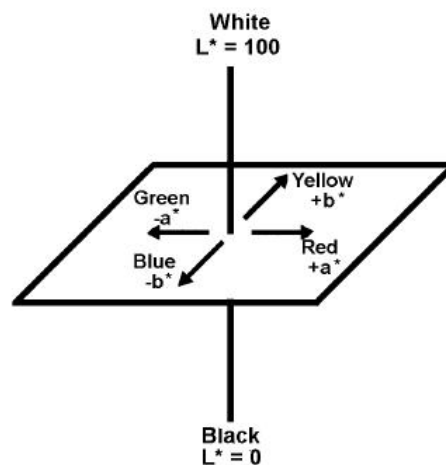
$$I = \frac{(R + G + B)}{3} \quad (2-25)$$

การลดความผิดพลาดในการแยกสีด้วยคอมพิวเตอร์นิยมใช้โมเดลสีอีกโมเดลหนึ่ง เรียกว่า โมเดลสีแอลเอบี (LAB : $L^*a^*b^*$) ซึ่งพัฒนาโดย R.S. Hunter โมเดลสีแอลเอบีมีส่วนประกอบอยู่บนลูกบาศก์ซึ่งมีค่าวัดสามค่าดังนี้ ดังภาพที่ 2-62

ค่าแอลสตาร์ (L^* : Luminance) เป็นค่าสีอยู่บนด้านบนและด้านล่างของลูกบาศก์ในแนวแกน Z แสดงถึงค่าเชิงตัวเลขของความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 โดยค่าเป็นศูนย์แสดงถึงความมืด (สีดำ) และค่าหนึ่งร้อยแสดงถึงความสว่าง (สีขาว)

ค่าเอสตาร์ (a^*) เป็นค่าเชิงปริมาณของสีที่อยู่บนระนาบตรงกลางลูกบาศก์ในแนวแกน X แสดงถึงค่าเชิงตัวเลขของระดับสีในช่วงระหว่างค่าสีเขียวถึงค่าสีแดง โดยมีค่าอยู่ในช่วง -120 ถึง 120 ระดับ

ค่าบีตาร์ (b^*) เป็นค่าเชิงปริมาณของสีที่อยู่บนระนาบตรงกลางลูกบาศก์ในแนวแกน Y แสดงถึงค่าเชิงตัวเลขของระดับสีในช่วงระหว่างค่าสีน้ำเงินถึงค่าสีเหลือง โดยมีค่าอยู่ในช่วง -120 ถึง 120 ระดับ



ภาพที่ 2-62 โมเดลสีแอลเอบี

2.9 การวิเคราะห์ทางสถิติหลายตัวแปร [5], [29], [30]

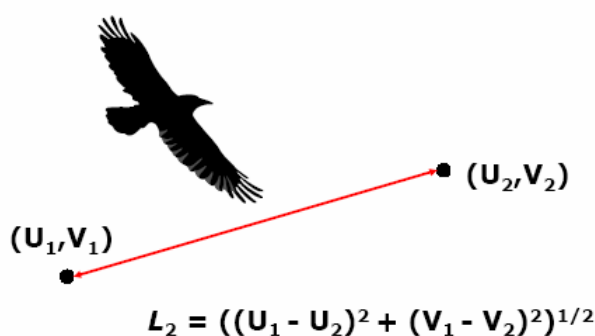
การวิเคราะห์แบ่งกลุ่ม (Classification) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกกลุ่มของข้อมูลตัวอย่างได้ การวิเคราะห์ทางสถิติหลายตัวแปร (Multivariate Statistical Analysis) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่มากกว่า 2 ตัวแปร ซึ่งวิธีการแบ่งกลุ่มมีด้วยกันหลายวิธี ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี

2.9.1 การวิเคราะห์ด้วยการจัดกลุ่ม (CA:Cluster Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อจัดกลุ่มสิ่งต่างๆให้เป็นหมวดหมู่ โดยการจัดเข้าพวกหรือหาสิ่งที่เข้าพวกไม่ได้ จากการพิจารณาค่าของตัวแปรโดยที่ไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนกลุ่มของข้อมูล และข้อมูลตัวอย่างอยู่กลุ่มใดมาก่อนความเป็นไปได้ที่จะมีจำนวนกลุ่มหลังการจัดกลุ่มของข้อมูลเกิดขึ้นมากมาย ในทางปฏิบัติคงต้องประสบปัญหา มากเพราะมีการแยกย่อยเกินไป วิธีการกำหนดแนวทางเพื่อให้ได้จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับได้ คงเพียงพอกับการวิเคราะห์

วิธีการที่ใช้สำหรับการจัดกลุ่มมีเทคนิคที่นิยมใช้กันมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ ได้แก่ การจัดกลุ่มแบบเป็นลำดับชั้น และการจัดกลุ่มแบบค่าเฉลี่ยหลายกลุ่ม

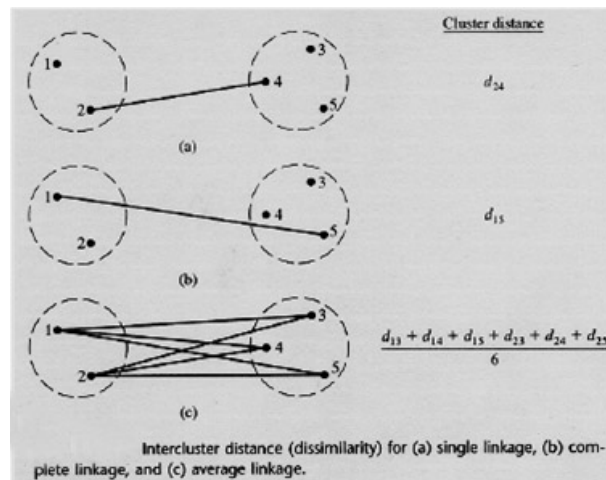
2.9.1.1 การจัดกลุ่มแบบเป็นลำดับชั้น (Hierarchical Clustering)

การจัดกลุ่มเป็นลำดับชั้นเป็นการพิจารณาระยะทางระหว่างกลุ่มที่เรียกว่าระยะยูคลิด (Euclidean Distance) เหมาะกับตัวอย่างข้อมูลที่มีไม่เกิน 200 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถเลือกวิธีการจัดกลุ่มได้หลายวิธี เรียกว่าวิธีการโยงเส้น (Linkage Method) เป็นการโยงเส้นตรงระหว่างคู่ของกลุ่มที่มีความคล้ายคลึงกันเข้าเป็นพวกหรือกลุ่มเดียวกัน ซึ่งสร้างความสัมพันธ์ด้วยกราฟเดนโดแกรม (Dendrogram) โดยที่จำนวนของกลุ่มขึ้นอยู่กับระดับของระยะ (Distance Level) ของกราฟเดนโดแกรม การวัดระยะยูคลิดด้วยการโยงเส้น มี 3 ลักษณะที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ การโยงเส้นจากการวัดระยะที่ใกล้กันที่สุด (Single Linkage) การโยงเส้นจากการวัดระยะที่ไกลที่สุด (Complete Linkage) การโยงเส้นจากการวัดระยะเฉลี่ยทุกคู่เส้นทางของกลุ่ม (Average Linkage)



$$L_2 = ((u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2)^{1/2}$$

ภาพที่ 2-63 ระยะยูคลิด



ภาพที่ 2-64 การโยงเส้นด้วยระยะยุคลิด

2.9.1.2 การจัดกลุ่มแบบค่าเฉลี่ยหลายตัวอย่าง (K-Means Clustering)

การจัดกลุ่มแบบค่าเฉลี่ยหลายตัวอย่าง เป็นการจัดกลุ่มที่เหมาะสมกับตัวอย่างข้อมูลที่มีตั้งแต่ 200 ตัวอย่างขึ้นไป เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากวิธีการนี้จะช่วยให้ง่ายและสะดวก ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการจัดแบบลำดับขั้น แต่วิธีการนี้จะต้องกำหนดจำนวนกลุ่มที่แน่นอนไว้ล่วงหน้า เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีประสิทธิภาพ หากไม่ทราบจำนวนกลุ่มที่แท้จริง อาจใช้วิธีวิเคราะห์ซ้ำหลายๆ ครั้งด้วยจำนวนกลุ่มที่แตกต่างกันแล้วพิจารณาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมกับปัญหา หรืออาจใช้ข้อมูลบางส่วนวิเคราะห์ด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นเพื่อหาจำนวนกลุ่มก่อนจากนั้นกลับมาใช้เทคนิคการจัดกลุ่มแบบค่าเฉลี่ยหลายประชากรเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด วิธีการจัดกลุ่มแบบค่าเฉลี่ยหลายตัวอย่าง พิจารณาความสัมพันธ์ด้วยการวัดระยะยุคลิด เช่นเดียวกับการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น

2.9.2 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (DA: Discriminant Analysis) เป็นการจัดข้อมูลเข้าพวกที่ทราบจำนวนกลุ่มจริงที่มีอยู่แล้ว โดยจะบ่งชี้ลักษณะด้วยค่าตัวแปรหรือสมการทางพีชคณิตให้เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นเมื่อมีตัวอย่างข้อมูลเข้ามาเพิ่มเติมก็จะเป็นหน้าที่ของการแบ่งกลุ่มที่จะนำเอาข้อมูลที่ถูกเพิ่มเติมเข้าพวกกับกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งที่ DA ได้แบ่งไว้ให้ ซึ่งความถูกต้องของกลุ่มที่ได้จะแม่นยำก็เมื่อมีการกำหนดกลุ่มด้วยค่าของตัวแปรตัวอย่างที่สามารถแบ่งแยกกลุ่มได้อย่างชัดเจนและถูกต้อง วิธีการนี้พัฒนาขึ้นโดยฟิชเชอร์ (Fisher.R.A.,1938) ซึ่งพัฒนาหลักเกณฑ์ของการจำแนกกลุ่ม 2 กลุ่มประชากรและหลายกลุ่มประชากร

สมการที่สร้างขึ้นใน DA ตัวแปรตามจะต้องเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม (Categorical Variable) ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรที่ทำให้กลุ่มแตกต่างกันเป็นตัวแปรจำแนกกลุ่ม (Discriminator Variable) ซึ่งมีข้อมูลเชิงปริมาณ

เครื่องมือที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มของวิธีการนี้มีวิธีหลายวิธีที่ใช้ในการพยากรณ์กลุ่มให้กับข้อมูลตัวอย่าง

2.9.2.1 วิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น (Probability Method)

การคำนวณหาความน่าจะเป็นของข้อมูลว่าควรอยู่ในกลุ่มใดจากการพิจารณาข้อมูลที่มืออยู่จริง ซึ่งวัดค่าความน่าจะเป็นที่มีค่ามากที่สุด

2.9.2.2 ฟังก์ชันการจำแนกกลุ่ม (Linear Discriminant Function)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปสมการเชิงเส้น โดยการพิจารณาจำแนกกลุ่มจากค่าคะแนนจำแนกกลุ่ม (Discriminant Score) ที่มีค่ามากที่สุด จากสมการดังต่อไปนี้

$$D^2 = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (2-26)$$

เมื่อ D^2 = คะแนนจำแนกกลุ่ม

b_i = สัมประสิทธิ์สมการจำแนกกลุ่ม $i = 1, 2, \dots, p$

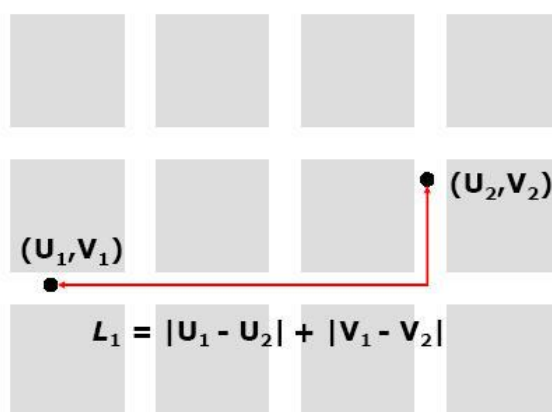
X_i = ตัวแปรจำแนกกลุ่ม $i = 1, 2, \dots, p$

a = ค่าคงที่ของการจำแนกกลุ่ม

2.9.2.3 ฟังก์ชันระยะห่างระหว่างชนิดกลุ่ม (Distance Function)

การหาระยะห่างจากชนิดกลุ่มที่ต้องการไปยังค่ากลางของกลุ่ม (Group Centroid) ที่มีระยะน้อยที่สุด โดยการพิจารณาระยะทางจากระยะสแควร์ยูคลิด (Squared Euclidean Distance) เพื่อจัดข้อมูลเข้ากลุ่ม

การวิเคราะห์ตัวอย่างข้อมูลจำนวนมากด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติหลายตัวแปรสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ทางด้านสถิติทั่วไป ทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายและสะดวก และได้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว แต่ควรต้องทราบโครงสร้างสมการของโปรแกรมเพื่อลดความผิดพลาดและทำให้ผลการวิเคราะห์มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 2-65 ระยะสแควร์ยูคลิด

2.10 โครงข่ายประสาทเทียม [31], [32]

โครงข่ายประสาทเทียม หรือนิยมเรียกกันว่า นิวรอลเน็ตเวิร์ก (Neural Network) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอ้างอิงโครงสร้างมาจากระบบประสาท (Neuron System) โดยที่นิวรอลเน็ตเวิร์กมีหน่วยประมวลผลแบบแจกแจงและขนานขนาดใหญ่ คุณสมบัติของนิวรอลเน็ตเวิร์กมีความคล้ายกับสมองมนุษย์ สามารถสอนตัวอย่างและเก็บไว้เป็นประสบการณ์ สามารถอนุมานจากสิ่งที่สอนไปสู่สิ่งที่ไม่เคยสอนมาก่อนได้เป็นความสามารถในการบ่งชี้ลักษณะ

2.10.1 การเรียนรู้ (Learning) นิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถเรียนรู้ด้วยการสอน (Train) ที่ป้อนให้เกิดการเรียนรู้จากชุดการสอน การเรียนรู้แบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.10.1.1 การเรียนรู้แบบเสริมสร้าง (Reinforcement Learning) เป็นการเรียนรู้ที่ให้คำตอบจากการเรียนรู้ว่าผิดหรือถูกต้อง แต่ไม่ได้บอกว่าคำตอบที่ถูกต้องนั้นคืออะไร

2.10.1.2 การเรียนรู้แบบไม่กำหนดเป้าหมายการเรียนรู้ (Unsupervised Learning) เป็นการสอนโดยไม่ต้องมีข้อมูลที่เป็นเป้าหมายของการเรียนรู้ มีแต่เพียงชุดการสอนเท่านั้นโดยที่โครงข่ายจะมีการปรับตัวเองเพื่อหาเป้าหมายของการเรียนรู้เอง

2.10.1.3 การเรียนรู้แบบกำหนดเป้าหมายการเรียนรู้ (Supervised Learning) เป็นการสอนแบบมีข้อมูลที่เป็นเป้าหมายของการเรียนรู้ นิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถเก็บรวบรวมความรู้โดยใช้สัญญาณในการสอนภายนอกมาประมวลกับเป้าหมายที่ต้องการ ถ้ายังข้อมูลในการสอนมีตัวอย่างจำนวนมากและสามารถกำหนดเป้าหมายได้อย่างถูกต้องชัดเจนความเป็นไปได้ที่ผลลัพธ์จากนิวรอลเน็ตเวิร์กจะแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

2.10.2 แบบจำลองนิวรอล (Neural Model) การจำลองโครงข่ายที่ประกอบด้วยแหล่งข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการสอนนิวรอลให้เกิดการเรียนรู้

2.10.2.1 ข้อมูลเข้า (Neural Inputs) นิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถประมวลผลข้อมูลเชิงปริมาณที่มีลักษณะเป็นตัวเลขเท่านั้น ถ้าข้อมูลเข้าเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ ต้องทำการแปลงค่าให้เทียบเท่าที่เป็นตัวเลข

2.10.2.2 ข้อมูลออก (Neural Outputs) เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการสอนนิวรอลเน็ตเวิร์ก

2.10.2.3 ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (Connection Weights) หรือเรียกว่าตัวถ่วงน้ำหนักไซแนปส์ (Synapse Weights) เป็นส่วนที่เก็บความรู้ที่ได้มาจากการสอนนิวรอลเน็ตเวิร์ก เมื่อตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงไปประมวลผลร่วมกับข้อมูลของนิวรอลด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้นี้เรียกว่าระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ (Net Internal Activity Level) ระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-Forward Neural Network) ส่วนใหญ่จะมีรูปแบบการดังต่อไปนี้

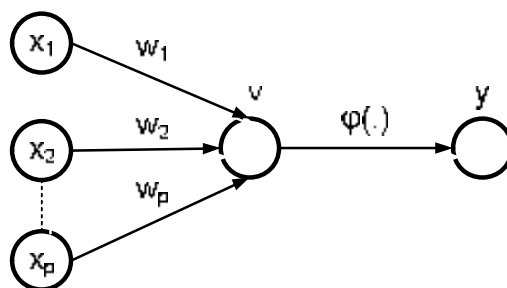
$$v = \sum_{i=1}^p w_i x_i \quad (2-27)$$

เมื่อให้ v เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ w_i คือตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงระหว่างระดับการกระตุ้นภายในสุทธิและข้อมูลเข้าที่ i ของนิวรอน x_i คือข้อมูลเข้าที่ i ของนิวรอนและ p คือจำนวนปมของข้อมูลเข้า (Input Node)

2.10.3.4 ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation Function) เป็นฟังก์ชันในนิวรอนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับการกระตุ้นภายในสุทธิเป็นข้อมูลออกนิวรอน (Neural Outputs) ฟังก์ชันการกระตุ้นอาจเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ก็ได้ ตามปกติแล้วนิวรอนเน็ตเวิร์กที่มีฟังก์ชันไม่เชิงเส้นมีคุณลักษณะเป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างระดับการกระตุ้นภายในสุทธิและข้อมูลออกของนิวรอนจะมีลักษณะตามสมการดังนี้

$$y = \varphi(v) \quad (2-28)$$

โดยให้ y คือข้อมูลออกของนิวรอน v คือระดับการกระตุ้นภายในสุทธิและ $\varphi(.)$ คือฟังก์ชันการกระตุ้น กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงจากข้อมูลเข้าของนิวรอนไปเป็นข้อมูลออกนิวรอนซึ่งเกิดขึ้นภายในนิวรอนแสดงตามภาพที่ 2-66

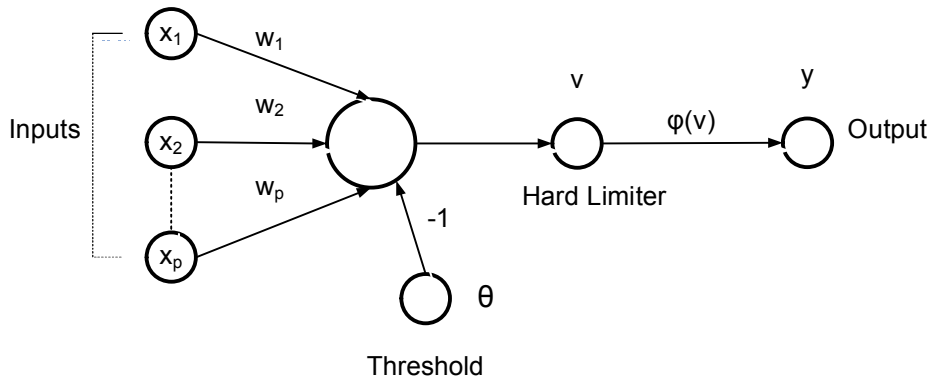


ภาพที่ 2-66 การเปลี่ยนแปลงสถานะของสัญญาณภายในนิวรอน

จากภาพที่ 2-66 ข้อมูลเข้าของนิวรอน (x) จะเปลี่ยนไปเป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ (v) โดยผ่านการใช้ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (w) และกระบวนการทางคณิตศาสตร์กระบวนการหนึ่ง จากนั้นเมื่อให้ระดับการกระตุ้นภายในสุทธิเป็นข้อมูลเข้าของฟังก์ชันการกระตุ้น ได้ผลลัพธ์เป็นข้อมูลออกของนิวรอน (y)

2.10.3 นิวรอนเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน

โครงข่ายงานของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนมีสถาปัตยกรรมโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed-Forward Network) มีนิวรอนที่เรียกว่า เพอร์เซ็ปตรอน (Perceptron) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของนิวรอนเน็ตเวิร์กที่สามารถใช้ในการจำแนกชนิดของรูปแบบซึ่งมีลักษณะเป็นรูปแบบที่แยกกันได้ง่ายเชิงเส้น (Linearly Separable Patterns) เพอร์เซ็ปตรอนประกอบด้วยนิวรอนตั้งแต่หนึ่งนิวรอนที่มีตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงและมีค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) โครงสร้างของเพอร์เซ็ปตรอนได้แสดงในภาพที่ 2-67



ภาพที่ 2- 67 โครงสร้างของเพอร์เซ็ปตรอน

จากภาพที่ 2-67 เพอร์เซ็ปตรอนมีสัญญาณข้อมูลเข้าจำนวน p สัญญาณ ซึ่งสัญญาณเข้าจะถูกนำมาใช้ในการหาผลรวมถ่วงน้ำหนัก (w) จากนั้นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะถูกนำมาหักล้างจากผลรวมถ่วงน้ำหนัก ได้ผลลัพธ์เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิที่ใช้เป็นข้อมูลเข้าฮาร์ดลิมิเตอร์ หาได้จากสมการดังนี้

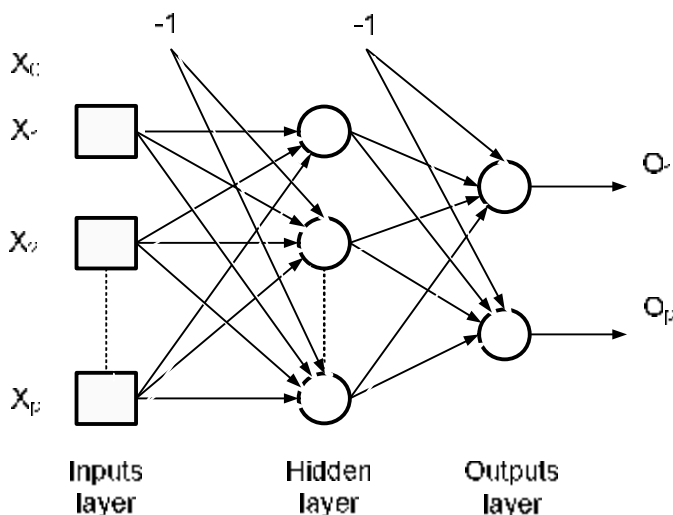
$$v = \sum_{i=0}^p w_i x_i \quad (2-29)$$

เมื่อให้ w_i มีค่าเท่ากับขีดเริ่มเปลี่ยน (θ) และ $x_0 = -1$ เป็นข้อมูลออกจากเพอร์เซ็ปตรอนโดยที่ข้อมูลออกของฮาร์ดลิมิเตอร์มีค่าเป็น

$$y = \phi(v)=z \quad (2-30)$$

โดยที่ $z = 1$ ถ้า v มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และ $z = 0$ ถ้า V น้อยกว่าศูนย์ และ y เป็นข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน $\phi(.)$ คือฟังก์ชันการกระตุ้น กรณีนี้เป็นฮาร์ดลิมิเตอร์ ในการปรับค่าพารามิเตอร์อิสระหรือตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงของเพอร์เซ็ปตรอน เรียกว่า วิธีเพอร์เซ็ปตรอน (Perceptron Algorithm) ได้รับการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์แล้วว่า ถ้ารูปแบบทั้งหมดที่นำมาใช้ในการฝึกสอนเพอร์เซ็ปตรอนเป็นรูปแบบที่แยกกันได้เชิงเส้นที่สามารถแยกเป็น 2 กลุ่มแล้ว ขั้นตอนวิธีเพอร์เซ็ปตรอนจะลู่เข้า (Converge) และจะสามารถสร้างขอบการตัดสินใจ (Decision Boundary) ซึ่งทำให้เกิดระนาบเกิน (Hyper-plane) ระหว่างรูปแบบทั้งสอง การลู่เข้าของขั้นตอนนี้เรียกว่าทฤษฎีบทการลู่เข้าของเพอร์เซ็ปตรอน

โครงข่ายมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนสร้างได้จากการนำเพอร์เซ็ปตรอนมาต่อกันเป็นโครงข่าย ดังแสดงในภาพที่ 2-68



ภาพที่ 2-68 โครงสร้างของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน

จากภาพที่ 2-68 ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นซ่อนที่หนึ่ง (First Hidden Layer) เป็นข้อมูลเข้าสำหรับเพอร์เซ็ปตรอนในชั้นซ่อนที่สอง ทำนองเดียวกันข้อมูลออกของชั้นซ่อนที่สองป้อนให้กับชั้นข้อมูลออก เพอร์เซ็ปตรอนเป็นผลลัพธ์ของการประมวลผล ในตัวอย่างนี้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะอยู่ในรูปของตัวถ่วงน้ำหนัก การเชื่อมโยงต่ออยู่กับข้อมูลเข้าที่มีค่าเท่ากับ -1

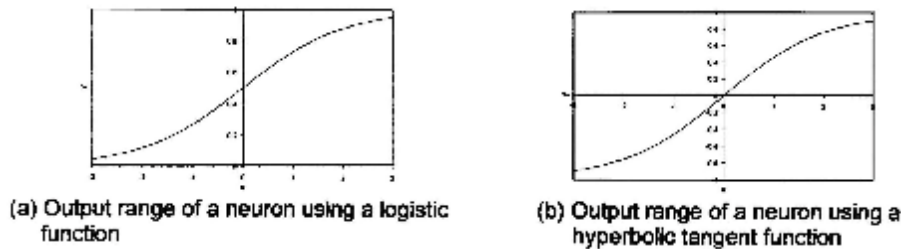
โดยปกติแล้วฮาร์ดลิมิเตอร์จะไม่นำมาใช้เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นในมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน แต่นำฟังก์ชันเชิงตรรกะ เช่น ฟังก์ชันโลจิสติก (Logistic Function) ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent Function) มาใช้แทน การใช้ฟังก์ชันโลจิสติก มาเป็นฟังก์ชันการกระตุ้น มีสมการดังนี้

$$Y = \varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-v)} \quad -\infty < v < \infty \quad (2-31)$$

โดยที่ v เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ และ y เป็นข้อมูลออกของนิวรอน จากการใช้ฟังก์ชันเชิงตรรกะเป็นฟังก์ชันการกระตุ้น ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีพิสัย (Range) เป็น $0 < v < 1$ พิสัยข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจากฟังก์ชันการกระตุ้นเชิงตรรกะ แสดงตามภาพที่ 2-69 ในกรณีที่ฟังก์ชันการกระตุ้นเป็นฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ ค่าของข้อมูลออกเพอร์เซ็ปตรอนมีค่าตามสมการดังนี้

$$y = \varphi(v) = \frac{1 - \exp(-v)}{1 + \exp(-v)} \quad -\infty < v < \infty \quad (2-32)$$

ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนมีพิสัยเป็น $-1 < v < 1$ ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนเมื่อใช้ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์เป็นฟังก์ชันการกระตุ้น แสดงตามภาพที่ 2-69



ภาพที่ 2-69 พิสัยข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน

เมื่อเปลี่ยนฟังก์ชันการกระตุ้นในเพอร์เซ็ปตรอน แล้วเอานำเพอร์เซ็ปตรอนมาประกอบรวมกันเป็น มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน คุณสมบัติในการจำแนกชนิดของโครงข่ายก็จะขยายใหญ่ขึ้นจากเดิมที่สามารถใช้ เพอร์เซ็ปตรอนในการจำแนกชนิดรูปแบบที่แยกกันได้เชิงเส้นเท่านั้น โดยที่มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนจะสามารถสร้างระนาบเกินแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Hyper-plane) เพื่อใช้ในการจำแนกชนิดรูปแบบที่แยกกันได้ไม่เชิงเส้น (Non-linearly Separable Pattern)

ในขั้นตอนการเรียนรู้แบบกำหนดเป้าหมายการเรียนรู้ (Supervised Learning) ที่สามารถใช้ในการ ปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงในมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนมีชื่อเรียกว่า ขั้นตอนวิธีการแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-Propagation Algorithm) [33]

2.10.4 มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนชนิดขั้นตอนวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ [32]

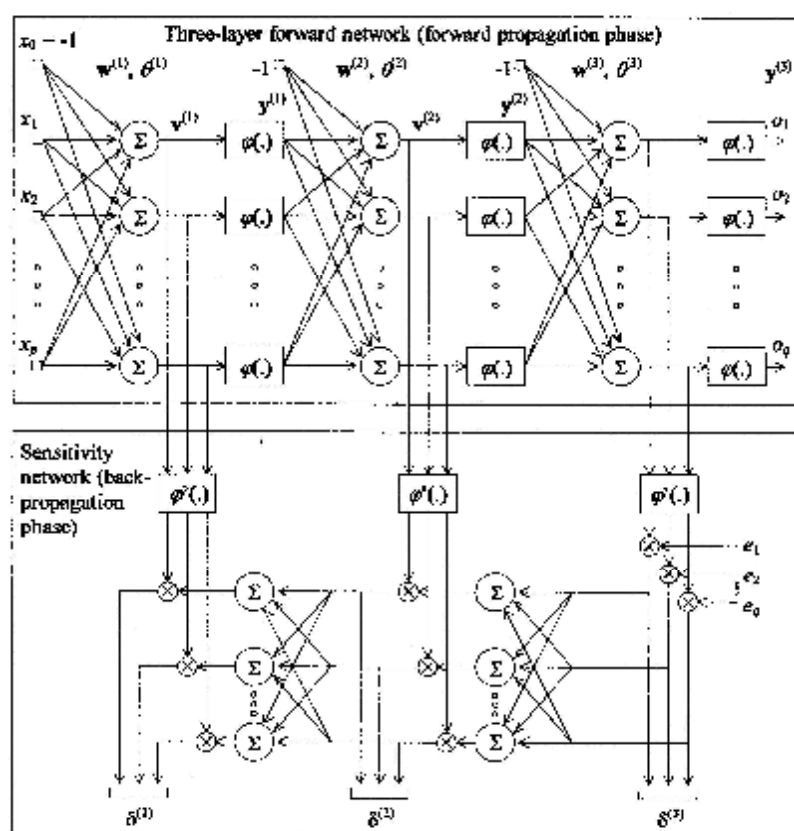
นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนด้วยวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-Propagation) ซึ่งเป็นโครงข่ายงานของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน สถาปัตยกรรมโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed-Forward Network) ได้รับความนิยมอย่างมากเป็นเน็ตเวิร์กที่ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ แก้ปัญหาในงานด้านต่างๆ มากที่สุดในปัจจุบัน [34]

วิธีแพร่กระจายย้อนกลับเป็นโครงข่ายที่มีชั้นไม่ต่ำกว่า 3 ชั้นคือ ชั้นข้อมูลเข้า ชั้นข้อมูลซ่อนและชั้น ข้อมูลออก การเชื่อมโยงชั้นเป็นแบบไปข้างหน้าตามลำดับชั้น ในการกำหนดขนาดเน็ตเวิร์กแต่ละชั้นมี ข้อกำหนด โดยที่ในส่วนของชั้นข้อมูลเข้าขึ้นอยู่กับจำนวนหลักของข้อมูลที่ต้องการป้อนเข้าสู่โครงข่าย ส่วนชั้น ข้อมูลออกก็ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่ต้องการให้เกิดการรู้จำ (Recognition) และในส่วนของชั้นซ่อนจะกำหนดตาม ความสามารถของโครงข่ายและความเร็วในการเรียนรู้และรู้จำ จำนวนของนิวรอลมีผลต่อความผิดพลาด (Error) ของการประมวลผลนิวรอลเน็ตเวิร์ก จึงต้องอาศัยการทดลองที่เหมาะสม

การสอนนิวรอลเน็ตเวิร์กด้วยวิธีแพร่กระจายย้อนกลับมีขั้นตอน 3 ขั้นตอนคือ การป้อนรูปแบบการ สอนข้อมูลเข้าไปข้างหน้า การคำนวณและการแพร่กระจายของค่าความผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง และการปรับ

ค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (Connection Weights) หลังจากการสอนจนได้ค่าน้ำหนักที่เหมาะสมแล้ว การประมวลผลจะอยู่ในส่วนของการป้อนไปข้างหน้าเท่านั้น

โครงสร้างขั้นตอนวิธีแพร่กระจายย้อนกลับในส่วนของเฟสไปหน้า (Forward Phase) และเฟสย้อนกลับ (Backward Phase) แสดงในภาพที่ 2-70



ภาพที่ 2-70 โครงสร้างมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนชนิดวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ

กำหนดให้ $w^{(l)}$ เป็นตัวถ่วงน้ำหนักเชื่อมโยงของนิวรอนในชั้นที่หนึ่ง, $\theta^{(l)}$ เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของนิวรอนในชั้นที่หนึ่ง, $v^{(l)}$ เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ, $y^{(l)}$ เป็นเวกเตอร์ของฟังก์ชันสัญญาณของนิวรอนในชั้นที่หนึ่ง, $\delta^{(l)}$ เป็นเวกเตอร์ของค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนในชั้นที่หนึ่ง, e เป็นเวกเตอร์ของความผิดพลาด ที่ $e_1, e_2, \dots, e_p$ ตามอิลิเมนต์

ดัชนีของชั้น (l) จะครอบคลุมจากชั้นข้อมูลเข้า ($l = 0$) ไปถึงชั้นข้อมูลออก ($l = L$) ในกรณีนี้ $L = 3$ โครงข่ายที่อยู่ในส่วนด้านบนของภาพจะเป็นส่วนเฟสไปข้างหน้าและส่วนด้านล่างของภาพที่ 2-70 จะเป็นส่วนเฟสย้อนกลับ เรียกว่า โครงข่ายความไหว (Sensitivity Network) ซึ่งมีหน้าที่คำนวณค่าความชันเฉพาะที่ (Local Gradient) ในขั้นตอนวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ

ขั้นตอนวิธีการแพร่ย้อนกลับจะใช้กฎการปรับค่าที่ละรูปแบบ (Pattern-by-Pattern Updating Rule)

ในการปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงภายในโครงข่าย อีกนัยหนึ่ง ในการทำซ้ำ (Iteration) 1 ครั้ง โดยขั้นตอนวิธีรูปแบบหนึ่งรูปแบบจะเป็นข้อมูลเข้าของโครงข่าย และขั้นตอนวิธีการแพร่กระจายย้อนกลับจะทำการปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงภายในแต่ละชั้นของโครงข่ายตามกฎการเรียนรู้มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน จะถูกฝึกสอนโดยการใช้เซตของรูปแบบสำหรับฝึกสอน (Training Pattern) ข้อมูลสำหรับผู้ฝึกสอน (Training Data) จะสามารถแสดงในรูปของ $\{[x(n), d(n)]; n = 1, 2, \dots, N\}$ โดยที่ $x(n)$ เป็นตัวอย่างที่ n ของรูปแบบข้อมูลเข้าซึ่งจะเป็นสัญญาณเข้าสู่โครงข่ายที่ $d(n)$ เป็นตัวอย่างที่ n ของรูปแบบข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการ Desired Response Output Pattern) จากนิวรอลเน็ตเวิร์ก และ N เป็นจำนวนรูปแบบทั้งหมดในเซตสำหรับการฝึกสอน เมื่อทำการฝึกสอนนิวรอลเน็ตเวิร์กโดยการทำซ้ำครบ N ครั้ง กล่าวได้ว่านิวรอลเน็ตเวิร์กได้รับการฝึกสอนหนึ่งรอบเวลา (Epoch)

ขั้นตอนวิธีการแพร่กระจายย้อนกลับจะสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.10.3.1 การเริ่มต้นเลือกโครงสร้าง (Initialization) หรือจุดเริ่มต้นจากการเลือกสถาปัตยกรรมของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน ซึ่งรวมถึงจำนวนปมข้อมูลเข้า (Input Node) จำนวนชั้นซ่อน และจำนวนปม (Hidden Node) ในแต่ละชั้นซ่อน และจำนวนปมของข้อมูลออก (Output Node) จำนวนปมของข้อมูลเข้าและข้อมูลออกจะถูกกำหนดด้วยคุณลักษณะของงานที่นิวรอลเน็ตเวิร์กต้องทำ ในขณะที่จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของปมซ่อนในแต่ละชั้นซ่อนจะเป็นปัญหาเชิงออกแบบ เมื่อได้กำหนดสถาปัตยกรรมของนิวรอลเน็ตเวิร์กแล้ว ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงและค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในโครงข่ายก็จะถูกกำหนดค่าขึ้นแบบสุ่ม โดยการแจกแจงค่าที่สุ่มขึ้นเป็นการแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform Distribution)

2.10.3.2 การป้อนข้อมูลรูปแบบการฝึกสอนเข้าโครงข่าย (Presentation of Training Examples) ซึ่งปกติแล้วลำดับก่อนหลังของรูปแบบในเซตของการฝึกสอนจะถูกจัดลำดับใหม่ (Reshuffle) หลังจากการเรียนรู้ในหนึ่งรอบเวลาได้เสร็จสิ้น สำหรับแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการฝึกสอนนิวรอลเน็ตเวิร์กในแต่ละการทำซ้ำ ให้ทำการคำนวณไปข้างหน้า (Forward Computation) และคำนวณย้อนกลับ (Backward Computation)

2.10.3.4 การคำนวณไปข้างหน้า (Forward Computation) การกำหนดรูปแบบการฝึกสอนที่ถูกป้อนเข้านิวรอลเน็ตเวิร์กเป็น $[x(n), d(n)]$ โดยที่ $x(n)$ เป็นเวกเตอร์ข้อมูลเข้าซึ่งถูกป้อนเข้าสู่ปมข้อมูลเข้าของโครงข่ายและ $d(n)$ เป็นเวกเตอร์ข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการแสดงว่าไว้ที่ปมข้อมูลออกของโครงข่าย ทำการคำนวณไปข้างหน้าโดยที่ระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอนที่ j ในชั้นที่ l จะมีค่าเป็น

$$v^{(l)}(n) = \sum_{i=0}^p w_{ji}^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (2-33)$$

โดยที่ $y^{(l-1)}$ เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่ i ในชั้นก่อน (Previous Layer) ที่ $l-1$ ทำซ้ำครั้งที่ n $w_{ji}^{(l)}(n)$ เป็นตัวถ่วงน้ำหนักระหว่างนิวรอนที่ j และ ในชั้นที่ l และนิวรอนที่ i ในชั้นที่ $l-1$ $v_j^{(l)}(n)$ เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอนที่ j และ p เป็นจำนวนของนิวรอนในชั้นที่ $l-1$ ในกรณีที่ $i = 0$ $y_0^{(l-1)}(n)$ จะมีค่าเท่ากับ -1 และ $w_{j0}^{(l)}(n)$ จะมีค่าเท่ากับ $\theta_j^{(l)}(n)$ ซึ่งเป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของนิวรอนที่ j ในชั้นที่ l โดยใช้ฟังก์ชันเชิงตรรกะเป็นฟังก์ชันการกระตุ้นในแต่ละนิวรอนที่ j ในชั้นที่ l จะมีค่าเป็น

$$y_j^{(l)}(n) = \frac{1}{1 + \exp(-v_j^{(l)}(n))} \quad (2-34)$$

โดยที่ $y_j^{(l)}(n)$ เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่ i ในชั้นที่ l ที่การทำซ้ำครั้งที่ n ถ้านิวรอนที่ j อยู่ในชั้นซ่อนที่หนึ่ง ($l=1$) ให้จัดข้อมูลเข้าที่ j เป็น

$$y_j^{(0)}(n) = x_i(n), \quad i=1,2,\dots,p \quad (2-35)$$

โดยที่ $x_i(n)$ เป็นสมาชิกที่ i ของเวกเตอร์ข้อมูล $x(n)$ p เป็นจำนวนของปมข้อมูลเข้าในโครงข่าย และ $y_j^{(0)}(n)$ เป็นข้อมูลเข้าสู่นิวรอนที่ j จากปมข้อมูลเข้าที่ในชั้นที่ i ในทางตรงกันข้ามถ้านิวรอนที่ j อยู่ในชั้นข้อมูลออก ($l=L$) ให้จัดข้อมูลข้อมูลออกของนิวรอนที่ j เป็น

$$y_j^{(l)}(n) = o_j(n), \quad j=1,2,\dots,q \quad (2-36)$$

โดยที่ $o_j(n)$ เป็นข้อมูลออกของปมข้อมูลออกที่ j q เป็นจำนวนของปมข้อมูลออกและ $y_j^{(l)}(n)$ เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่ j ในชั้นข้อมูลออก L จึงสามารถคำนวณค่าสัญญาณข้อผิดพลาดได้จาก

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n), \quad j=1,2,\dots,q \quad (2-37)$$

โดยที่ $d_j(n)$ เป็นสมาชิกที่ j ของเวกเตอร์ข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการ $d(n)$ และ $e_j(n)$ เป็นสัญญาณข้อผิดพลาดจากนิวรอนข้อมูลออกที่ j

2.10.3.5 การคณยาย้อนกลับ (Backward Computation) การคำนวณความชันเฉพาะที่ (δ) ของโครงข่ายโดยการคณยาย้อนกลับจากชั้นหนึ่งถอยหลังกลับไปยังชั้นก่อน ถ้านิวรอนที่ j อยู่ในชั้นข้อมูลออก ค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่ j จะมีค่าเป็น

$$\delta_j^{(l)}(n) = y_j^{(l)}(n) \left[1 - y_j^{(l)}(n) \right] \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) w_{kj}^{(l+1)}(n) \quad (2-38)$$

โดยที่ $\delta_k^{(l+1)}(n)$ เป็นค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่ k ในชั้นที่ $l+1$ $w_{kj}^{(l+1)}(n)$ เป็นตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอนที่ k ในชั้นที่ $l+1$ กับนิวรอนที่ j ในชั้นที่ l เมื่อกำหนดค่าความชันเฉพาะที่ได้แล้ว การปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงโดยใช้การเรียนรู้แบบแก๊ซผิดพลาดสามารถทำได้โดยให้

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + \alpha \left[w_{ji}^{(l)}(n) - w_{ji}^{(l)}(n-1) \right] \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (2-39)$$

โดยที่ η เป็นค่าพารามิเตอร์อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate Parameter) และ α เป็นค่าคงตัวโมเมนตัม (Momentum Constant)

2.10.3.6 การคำนวณผลซ้ำ (Iteration) การคำนวณซ้ำโดยการป้อนโครงข่ายด้วยรูปแบบฝึกสอนเป็นจำนวน m รอบเวลาจนกระทั่งตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงลู่เข้า ซึ่งการลู่เข้าของค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงสังเกตได้จากการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean of Sum of Squared Errors: MSE) จากปมข้อมูลออก ซึ่งคำนวณโดยค่าผิดพลาดระหว่างการเรียนรู้ในหนึ่งรอบเวลา ค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสองนี้สามารถคำนวณได้โดย

$$MSE = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^q (e_i(j))^2}{N} \quad (2-40)$$

โดยที่ $e_i(j)$ เป็นสัญญาณค่าผิดพลาดจากปมข้อมูลออกที่ i ของการทำซ้ำครั้งที่ j ของรอบเวลา

บทที่ 3

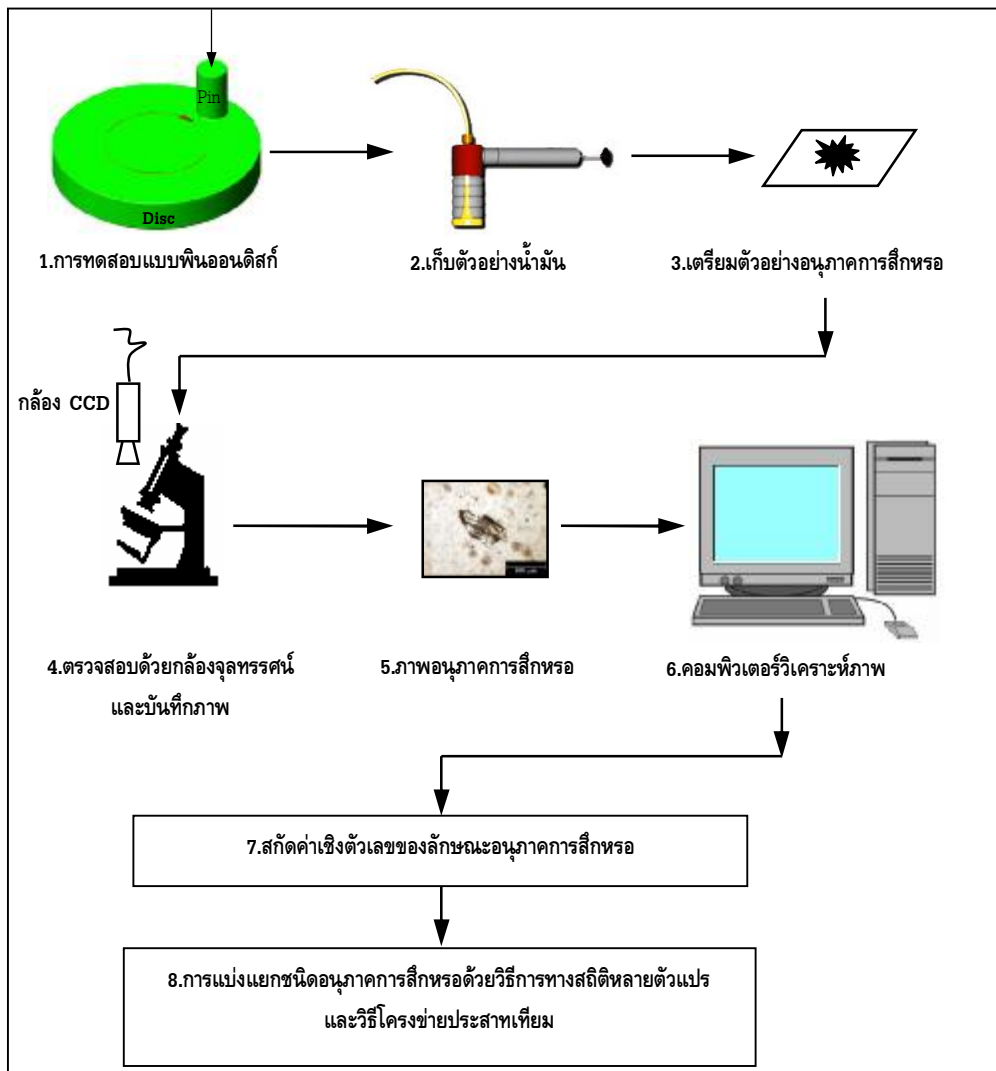
ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการสร้างเชื้อโลหะจากชิ้นส่วนเครื่องกล ที่เกิดจากกลไกการสึกหรอแบบต่างๆ ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ รวมถึงการนำตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงกับชิ้นส่วนเครื่องกลในเครื่องจักรอุตสาหกรรม เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาคการสึกหรอด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดีเอ็นเอ ที่พัฒนาโดย Dr.Wayne Rasband สถาบันสุขภาพแห่งชาติสหรัฐอเมริกา ซึ่งใช้วัดค่าความสัมพันธ์ของอนุภาคการสึกหรอ ได้แก่ พื้นที่ (Area) เส้นรอบรูป (Perimeter) ความกลม (Circularity) ลักษณะพื้นผิว (Texture) และสีของอนุภาค (Particle color) แล้วนำข้อมูลเชิงตัวเลขที่มีความสัมพันธ์กันไปหาความสัมพันธ์ตัวแปรอีกจำนวนหนึ่ง ได้แก่ พื้นที่นูน (Convex Area) สัดส่วนพื้นที่ (Fullness Ratio) เส้นรอบรูปนูน (Convex Perimeter) ที่ได้ไปวิเคราะห์ประเมินผลด้วยกระบวนการทางสถิติหลายตัวแปรและกระบวนการโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพิจารณารูปแบบการสึกหรอ กลุ่มของข้อมูลเหล่านี้เป็นหนึ่งในหลายปัจจัยที่สามารถบ่งบอกถึงรูปร่างลักษณะ หรือรูปพรรณสัณฐาน ได้แก่ ลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และลักษณะสีของอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากกลไกการสึกหรอของวัสดุชิ้นส่วนเครื่องกล

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้เป็นการทดลอง ในการจำลองกลไกการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องกล จึงต้องใช้เครื่องทดสอบ อุปกรณ์ เครื่องมือ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิสก์ (Pin on Disc Wear Tester)
2. กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40-600 เท่า พร้อมกล้องซีซีดี (CCD)
3. เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพ
4. กระดาษไล่ได้, ปีกเกอร์, แท่งกวนสารละลาย, สารทำละลายโทลูอีน
5. เทปกาวยาส
6. กระดาษกรอง
7. เม็ดลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. ยี่ห้อ SKF RB 12.7
8. แผ่นเหล็กวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 * 10 มม. เกรด AISI 52100
9. น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ SAE 40



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการวิจัยการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ

งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการจำลองการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM เพื่อควบคุมตัวแปรที่ทำให้เกิดการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องกล ขั้นตอนการทดลองได้เริ่มจากขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 (ภาพที่ 3-1) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดวิธีการไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 ในขั้นตอนที่ 5 (ภาพที่ 3-1) การบันทึกภาพอนุภาคการสึกหรอ เป็นการเตรียมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 ถึง 3.3.2 ในขั้นตอนที่ 6 (ภาพที่ 3-1) คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพ เป็นเครื่องมือวัดค่าเชิงตัวเลขของอนุภาคการสึกหรอได้แสดงวิธีการทั้งหมดไว้ในภาพที่ 3-4 และมีรายละเอียดตามหัวข้อที่ 3.3.3 ถึง 3.3.5 ส่วนขั้นตอนที่ 7 (ภาพที่ 3-1) การสกัดค่าเชิงตัวเลขของอนุภาคการสึกหรอ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.6 ถึง 3.3.9 ขั้นตอนสุดท้ายขั้นตอนที่ 8 (ภาพที่ 3-1) การแบ่งแยกชนิดอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีการทางสถิติและโครงข่ายประสาทเทียม ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.8 ถึง 3.3.9



ภาพที่ 3-2 เครื่องทดสอบการล้าหรือแบบพินออนดิสก์



ภาพที่ 3-3 กล้องจุลทรรศน์พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วงกับเครื่องคอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 การจำลองการล้าหรือบนเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ เป็นการจำลองกลไกการล้าหรือแบบลื่นไถล เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่นิยมใช้ในห้องทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยจานหมุนและเข็มกด โดยจานที่ใช้ทดสอบจะมีความหนา 15 ไมครอนและลูกบอลที่ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม.วัสดุของลูกบอลทดสอบและจานทดสอบ คือเหล็กเกรด AISI 52100

ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3 -1 ส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ทดลองเป็นน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เกรด SAE 40 มีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3- 2 ในการทดลองกำหนดจานหมุนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาทดลอง 20 นาที ในขณะที่ทดลอง หยดน้ำมันหล่อลื่นบนจานทดสอบอย่างต่อเนื่อง ภายหลังการทดลอง นำแผ่นจานจุ่มล้างในสารทำละลายโทลูอีนแล้วกรองเอาเศษโลหะด้วยกระดาษกรอง ส่วนการทดลองแบบไร้สารหล่อลื่น เก็บตัวอย่างเศษโลหะด้วยการใช้เทปกาวใสติดลงบนแผ่นจานที่มีเศษโลหะแล้วดึงมาติดบนกระจกสไลด์ แล้วนำกระจกสไลด์และกระดาษกรองที่กรองเศษโลหะแล้ว นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์และเก็บบันทึกภาพถ่ายเศษโลหะด้วยคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของลูกบอลที่ใช้ทดลอง RB 12.7 ยี่ห้อ SKF (AISI 52100)

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.):	12.70 มม.
ความหยาบผิว (Ra):	0.04 ไมครอน
ความแข็ง (VHN kg mm-2):	900-985 HV
ส่วนผสมทางเคมี (%):	
คาร์บอน (C):	0.95-1.10
ซิลิกอน (Si):	0.10-0.35
แมงกานีส (Mn):	0.40-0.70
โครเมียม (Cr):	1.20-1.60

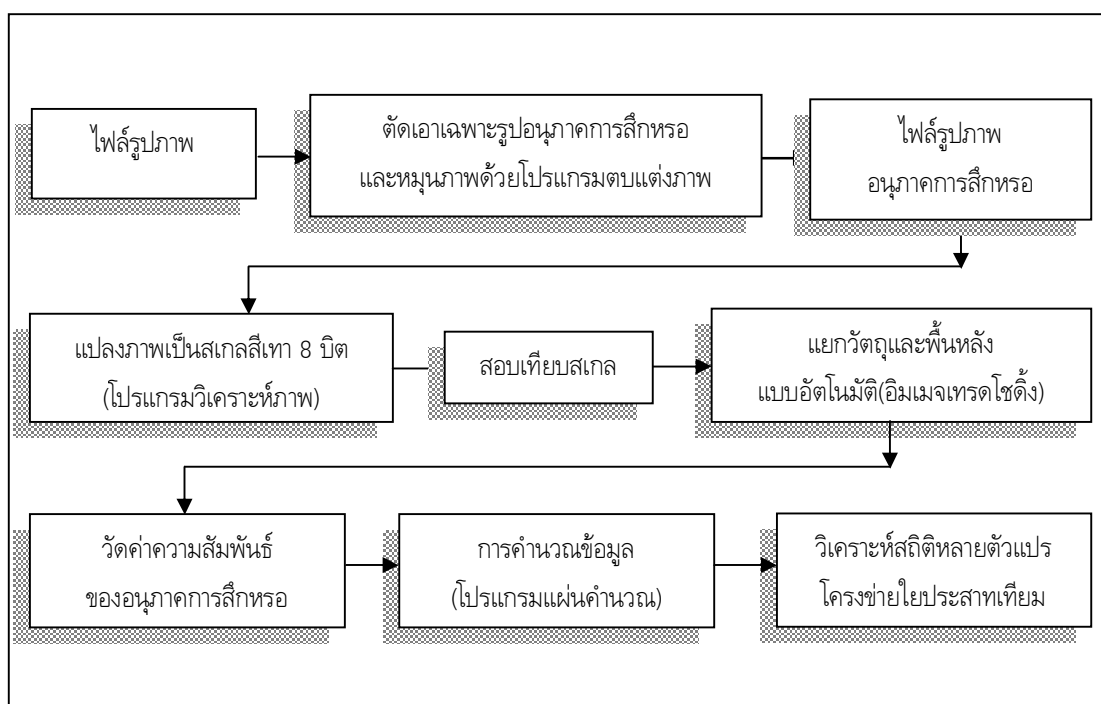
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

เอ.พี.ไอ กราวิตี้ :	27.8
ความหนืด (Cst), 40 °C:	134.5
ความหนืด (Cst), 100 °C:	14.0
ดัชนีความหนืด:	102
จุดวาบไฟ °C :	224
จุดไหลเท °C:	-12

ตารางที่ 3-3 การทดลองการสึกหรอบนเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์

การทดลอง	ภาระ (กิโลกรัม)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	ประเภทการหล่อลื่น
เครื่องทดสอบการสึกหรอ แบบพินออนดิสก์	10	100	5	ไร้สารหล่อลื่น
			15	น้ำมัน SAE 40
			25	

การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาคการสีกหรือ ด้วยการใช่วิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ เริ่มจากการรับข้อมูลภาพจากกล้องซีซีดี ที่มาจากการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ หรือรับข้อมูลภาพจากการสแกนภาพ แล้วบันทึกให้เป็นไฟล์ภาพ หลังจากนั้นใช้วิธีการตามขั้นตอนดังภาพที่ 3-4 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-4 กระบวนการทางภาพของการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือ

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือ

3.3.1 ไฟล์รูปภาพ (อนุภาคการสีกหรือ) ชนิดของไฟล์ที่สามารถนำมาใช้ได้แก่ บิตแมป (.BMP) เจเพ็ก (.JPEG) จีฟ (.GIF) ทิฟฟ์ (.TIFF) ในโหมด อาร์จีบี (RGB) สีที่แสดงออกมาได้ โดยการผสมสีแดง (R) เขียว (G) น้ำเงิน (B) ที่เป็นแม่สีเข้าด้วยกัน ค่าอาร์จีบีแสดงพารามิเตอร์เป็นตัวเลขมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 เช่น สีแดง อาร์จีบี (255,0,0) สีเขียว อาร์จีบี (0,255,0) เป็นต้น สีที่สามารถแสดงออกมาได้มากที่สุดคือ $256 \times 256 \times 256$ ซึ่งมีมากกว่า 16 ล้านสี ทำให้มีความยุ่งยากที่จะนำค่าข้อมูลจุดภาพ (pixel) มาใช้งาน โดยทั่วไปโปรแกรมวิเคราะห์ภาพในปัจจุบันจะทำการแปลงภาพจากภาพสีไปเป็นภาพสเกลสีเทา เนื่องจากมีค่าของจุดภาพที่น้อยกว่าและไม่สูญเสียข้อมูลของภาพเดิม



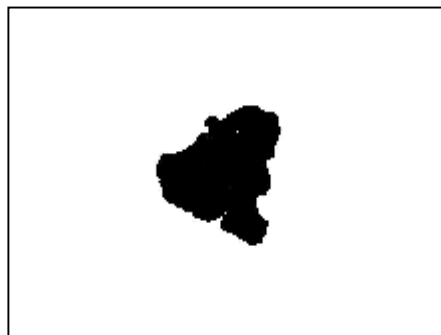
ภาพที่ 3-5 ตัวอย่างไฟล์รูปภาพที่นำมาวิเคราะห์

3.3.2 การตัดภาพ เป็นกระบวนการขจัดสิ่งรบกวน (Noise) ในการแยกภาพจุดที่สนใจกับพื้นหลัง หากสีของจุดที่สนใจ (อนุภาคการสึกหรอ) มีค่าอาร์จีบีใกล้เคียงกับพื้นหลังทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้ ดังนั้น จำเป็นต้องตัดภาพและลบส่วนที่เป็นพื้นหลังออก ส่วนในกรณีที่ภาพอนุภาคการสึกหรอมีค่าอาร์จีบีออกโทนสีขาว ต้องเติมสีพื้นหลังให้เป็นสีดำด้วยโปรแกรมตกแต่งภาพ ให้เหลือไว้เฉพาะจุดที่สนใจ (อนุภาคการสึกหรอ)



ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างการตัดภาพ

3.3.3 การแปลงภาพสีเป็นภาพสเกลสีเทา ภาพสีเป็นภาพที่มีค่าข้อมูลจุดภาพมากทำให้มีความยุ่งยากในการนำเอาข้อมูลไปประยุกต์ใช้งาน จึงจำเป็นต้องแปลงข้อมูลจากภาพสีอาร์จีบีไปเป็นภาพสเกลสีเทา (Gray image) ขนาด 8 บิต



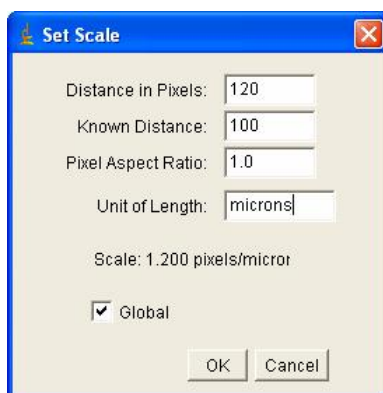
ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างการแปลงภาพ

3.3.4 การสอบเทียบสเกล (Scale Calibration) เป็นการวัดหรือการกำหนดจำนวนจุดภาพต่อหน่วยความยาวจริงบนภาพเพื่อใช้คำนวณค่าความสัมพันธ์ของรูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพที่ได้ ดังนี้

3.3.4.1 เมื่อภาพมีสเกลติดมากับภาพหาได้จากจำนวนของจุดภาพที่มีพิภักที่จุดปลายทั้งสองข้างของสเกล

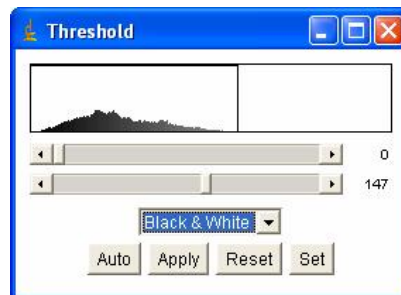
3.3.4.2 เมื่อภาพไม่มีสเกลแต่ทราบอัตรากำลังขยาย สามารถกำหนดหน่วยความยาวในภาพได้จากความกว้างของภาพหารด้วยอัตราขยายจะได้ความยาวจริง หลังจากนั้นสแกนภาพเพื่อหาจำนวนของจุดโดยใช้วิธีการตามหัวข้อที่ 3.3.4.1

3.3.4.3 เมื่อได้ภาพจากการบันทึกผ่านกล้องซีซีดี ที่เชื่อมต่อกับกล้องจุลทรรศน์สามารถกำหนดความยาวโดยการเปิดภาพสเกลที่ได้จากการบันทึกของไมโครมิเตอร์ ด้วยระบบอุปกรณ์และอัตรากำลังขยายเดียวกัน จากนั้นหาจำนวนจุดภาพ ตามหัวข้อที่ 3.3.4.1

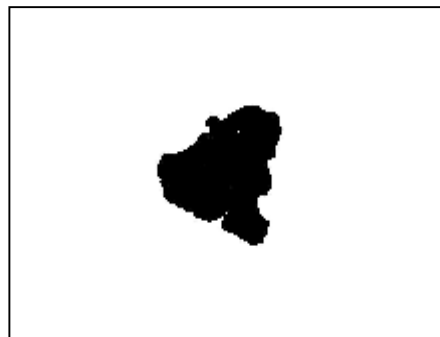


ภาพที่ 3-8 หน้าต่างเครื่องมือสำหรับการสอบเทียบสเกล

3.3.5 อิมเมจเทรชโธลดิ้ง(Image Thresholding) เป็นการแยกวัตถุและพื้นหลังออกจากกัน ด้วยการกำหนดค่าสเกลสีเทาอ้างอิง (threshold) โดยสามารถกำหนดช่วงของค่าสเกลสีเทาได้ ซึ่งสามารถกำหนดให้ข้อมูลจุดภาพที่มีสเกลสีเทาในช่วง 0 ถึง 100 เป็นภาพสีดำ อาร์จีบี (0,0,0) จุดภาพที่มีสเกลสีเทาในช่วง 101 ถึง 255 เป็นภาพสีขาว อาร์จีบี (255,255,255) ผลจากการกระบวนการตัดภาพทำให้สามารถแยกวัตถุและพื้นหลังได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อลดความผิดพลาดจากการปรับค่าสเกลสีเทาด้วยมือ (Manual adjustment)



ภาพที่ 3-9 หน้าต่างอิมเมจเทรชโฮลด์



ภาพที่ 3-10 ตัวอย่างภาพจากการอิมเมจเทรชโฮลด์

3.3.6 การวัดค่าความสัมพันธ์ของรูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือ ได้แก่ พื้นที่ (Area) เส้นรอบรูป (Perimeter) อัตราส่วนพื้นที่ (Fullness ratio) ความกลม (Circularity) วงกลมเฟอร์เรต์ (Feret Diameter) กลุ่มของข้อมูลเหล่านี้เป็นหนึ่งในหลายๆ ปัจจัยที่สามารถนำไปพิจารณารูปร่างลักษณะของอนุภาคการสีกหรือที่เกิดขึ้นจากกลไกการสีกหรือของวัสดุชิ้นส่วนเครื่องกล

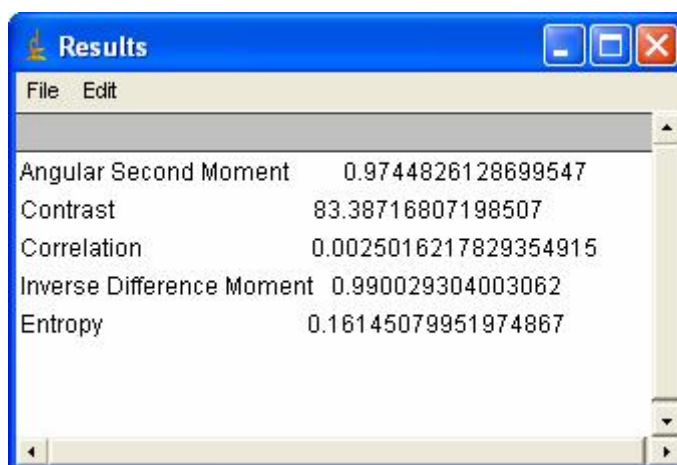
	Area	Perim.	Circ.	Feret	XStart	YStart
1	26303.47	793.54	0.52	223.10	427	162

ภาพที่ 3-11 หน้าต่างผลการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือ

3.3.7 การวัดค่าความสัมพันธ์ของลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยการวิเคราะห์เมตริกซ์ความสัมพันธ์ของระดับสีเทา (GLCM) โดยการแปลงภาพสีเป็นภาพระดับสีเทาขนาด 8 บิต ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3.3 และกำหนดทิศทางของพิกเซลแต่ละคู่ที่ศูนย์กลางเป็นแกนตั้ง ดังภาพที่ 3-12 ซึ่งใช้เมตริกซ์ขนาด 256×256 ในการวิเคราะห์ด้วยค่าวัดที่ประกอบด้วย เอนโทรปี (Entropy) คอนทราสต์ (Contrast) โมเมนต์ความแตกต่างย้อนกลับ (Inverse Difference Moment) โมเมนต์เชิงมุมอันดับสอง (Angular Second Moment) ความเกี่ยวพันกัน (Correlation) กลุ่มของข้อมูลเหล่านี้เป็นหนึ่งในหลายๆ ปัจจัยที่สามารถนำไปพิจารณาลักษณะพื้นผิวของอนุภาคการสีกหรือที่เกิดขึ้นจากกลไกการสีกหรือของวัสดุขึ้นส่วนเครื่องกล

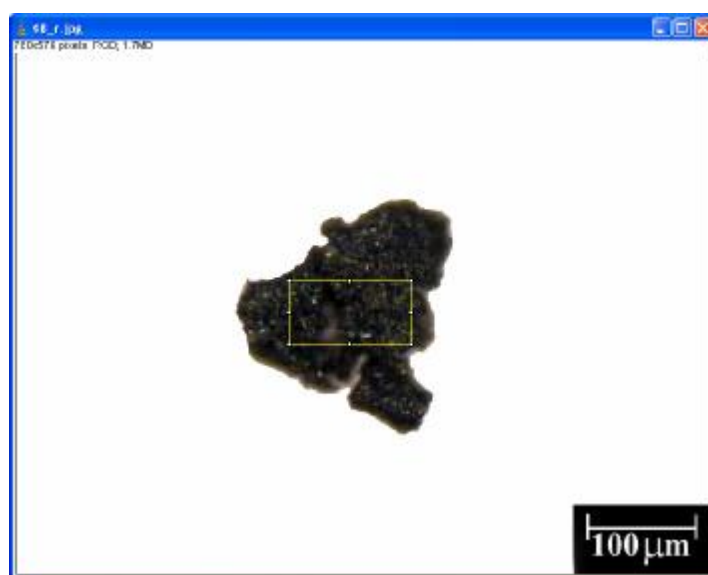


ภาพที่ 3-12 หน้าต่างเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือ



ภาพที่ 3-13 หน้าต่างผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือ

3.3.8 การวัดค่าความสัมพันธ์ของลักษณะสีอนุภาคการสึกหรอด้วยโมเดลสีเอชเอสไอ (HSI) ได้แก่ สีสัน (Hue) ความอิ่มตัวของสี (Saturation) ความเข้มของสี (Intensity) และโมเดลสีแอลเอบี ($L^*a^*b^*$) วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยการลากเส้นตรง (Line Selection) หรือสร้างขอบเขตสี่เหลี่ยม (Rectangle Boundary) บนอนุภาคการสึกหรอแล้ววิเคราะห์ด้วยการหาค่าเฉลี่ยของค่าเชิงปริมาณโมเดลสีอาร์จีบี แล้วนำไปแปลงเป็นค่าโมเดลสีเอชเอสไอ และโมเดลสีแอลเอบี จากการวัดซ้ำ 3 ครั้ง กลุ่มของข้อมูลเหล่านี้เป็นหนึ่งในหลายๆ ปัจจัยที่สามารถนำไปพิจารณาถึงลักษณะสีของอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากกลไกการสึกหรอของวัสดุชิ้นส่วนเครื่องกล



ภาพที่ 3-14 การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาคการสึกหรอ

Results			
File Edit			
channel	mean	std.dev.	
red	34.11	5.93	
green	33.20	5.57	
blue	30.96	4.49	

ภาพที่ 3-15 หน้าต่างผลการวิเคราะห์ลักษณะสีด้วยโมเดลสีอาร์จีบี

ในการแปลงค่าสีจากโมเดลสีอาร์จีบี ไปเป็นค่าสีของโมเดลสีเอชเอสไอ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-21 ถึง 2-23 หรือใช้ฟังก์ชันการแปลงค่าจากโปรแกรมตกแต่งภาพทั่วไป

3.3.9 การคำนวณข้อมูล การบันทึกและคำนวณข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพอนุภาคการสึกหรอ เนื่องจากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพสามารถบันทึกภาพเฉพาะแต่ละไฟล์เท่านั้น และไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของอนุภาคการสึกหรอบางข้อมูลได้ ดังนั้นการใช้โปรแกรมแผ่นคำนวณ ในการรวบรวมข้อมูล และหาความสัมพันธ์บางข้อมูลที่ขาดหายไป สามารถทำได้ง่าย และสะดวกต่อการนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางด้านสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านสถิติ

No. 1#	Sample	Area	Perim.	Circ.	Feret	Convex Area	Fullness ratio	Convex Perim.	Up trsh	Lo trsh
	1	2624.44	792.3	0.52	220.1	39157.3	1.22	12.26	0	137
	2	2624.44	792.3	0.52	220.4	39157.3	1.22	12.26	0	137
	3	2624.44	792.3	0.52	220.4	39157.3	1.22	12.26	0	137
	36344.44	792.8	4.52	218.4	39157.31	1.22	12.25	0	137	
										
No. 4#	Sample	Area	Perim.	Circ.	Feret	Convex Area	Fullness ratio	Convex Perim.	Up trsh	Lo trsh
	1	2851.94	299.25	1.5	30.99	6456.04	1.23	4.97	0	152
	2	2851.94	299.25	1.5	30.99	6456.04	1.23	4.97	0	152
	3	2851.94	299.25	1.5	30.99	6456.04	1.23	4.97	0	152
	3991.91	299.25	0.5	31.39	9196.31	1.23	4.97	0	152	
										

ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างการจัดเก็บข้อมูลภาพอนุภาคการสึกหรอ

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่แสดงลักษณะของอนุภาคการสึกหรอประกอบด้วยตัวแปร (สมการที่ 2-2 ถึง 2-11) นำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพมาเก็บไว้ในโปรแกรมแผ่นคำนวณเพื่อคำนวณค่าของตัวแปร กลุ่มของ พื้นที่นูน (Convex Area) สัดส่วนพื้นที่ (Fullness Ratio) เส้นรอบรูปนูน (Convex Perimeter) ซึ่งค่าของตัวแปรทั้งสามนี้ไม่สามารถหาได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ค่าตัวเลขที่อยู่ท้ายตารางแสดงค่าระดับสีของการแยกพื้นหลังกับพื้นหน้า (Thresholding) โดยมีค่าสองระดับ ค่า Up trsh (Upper Thresholding) เป็นการปรับค่าระดับสีของพื้นหน้าให้เป็นสีดำแสดงถึงการกำหนดขอบเขตของวัตถุที่สนใจ ค่า Lo trsh (Lower Thresholding) เป็นการปรับค่าระดับสีของพื้นหลังให้เป็นสีขาว ค่าตัวเลขของการแยกพื้นหลังกับพื้นหน้า (Thresholding) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 (สีดำถึงสีขาว) จากตารางการปรับค่าระดับสีของการแยกพื้นหลังกับพื้นหน้า (Thresholding) แบบอัตโนมัติทำให้ได้ค่าเท่ากันทุกครั้ง ซึ่งทำให้การวัดค่าอนุภาคการสึกหรอโดยการวัดซ้ำสามครั้ง (3 samples) ได้ค่าเท่ากันทุกครั้งเช่นเดียวกัน ส่งผลให้การวัดอนุภาคการสึกหรอมีความแม่นยำมากขึ้น

3.3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติหลายตัวแปร (Multivariate Statistical Analysis)

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติหลายตัวแปร 2 วิธี ประกอบด้วย

3.3.8.1 การจัดกลุ่ม (Cluster Analysis) แบบลำดับขั้นและใช้วิธีโยงเส้นแบบหาค่าเฉลี่ย (Average Linkage) โดยเบื้องต้นผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยีได้พิจารณาแบ่งกลุ่มของตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอจากอุตสาหกรรมและการทดลองทั้งหมด ซึ่งมีรูปร่างเป็น 3 ชนิด ได้แก่ รูปร่างผิดปกติ (Irregular shape), รูปร่างทรงกลม (Spherical), รูปร่างเป็นเส้น (Elongated) ได้แบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ผิวเรียบ (Smooth), ผิวหยาบ (Rough) ผิวเป็นรอยขีดข่วน (Striations) และได้แบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาค เป็น 5 ชนิด ได้แก่ สีผิวไหม้ (Heated Metal Color), สีของเหล็ก (Steel Color), สีทองแดง (Copper Color), สีสนิมแดง (Red Oxide Color), สีสนิมดำ (Black Oxide Color) สีของอนุภาคแสดงถึงวัสดุที่มาจากชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดการสึกหรอหรือเกิดความชำรุดเสียหาย รวมถึงสามารถแสดงสภาวะของเครื่องจักรในขณะนั้น เช่นสีผิวไหม้ทำให้ทราบได้ว่าการหล่อลื่นไม่เพียงพอหรือการขาดสารหล่อลื่น สีของเหล็ก ทำให้ทราบว่าได้เกิดการสึกหรอขึ้นที่เพลงาน ฟันเฟือง แหวนนอกของรอก ลื่นแบบกลิ้ง ฯลฯ สีของทองแดง ทำให้ทราบได้ว่าการสึกหรอขึ้นที่บูชทองแดง สลักล็อคตำแหน่งชิ้นส่วนเครื่องกล รอกลื่นแบบกบ ฯลฯ สีสนิมแดง ทำให้ทราบได้ว่ามีน้ำเข้าไปในระบบหล่อลื่น หรือสารหล่อลื่นมีการปนเปื้อนของน้ำ ฯลฯ ส่งผลให้โลหะจำพวกเหล็กเกิดออกไซด์เป็นสีแดง ส่วนสีสนิมดำ ทำให้ทราบได้ว่าระบบการหล่อลื่นหรือชิ้นส่วนเครื่องกล ได้รับความร้อนสูง ส่งผลให้โลหะจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกเกิดออกไซด์เป็นสีดำ งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์จากการจำลองทางโทรโบโลยีและจากอุตสาหกรรม รวมจำนวน 185 ตัวอย่าง

3.3.8.2 การจำแนกกลุ่ม (Discriminant Analysis) ใช้เครื่องมือในการพยากรณ์กลุ่มให้กับตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น และฟังก์ชันระยะห่างระหว่างกลุ่ม

โดยเบื้องต้นผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยีได้พิจารณาแบ่งกลุ่มของตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอจากอุตสาหกรรมและการทดลองทั้งหมด ซึ่งมีรูปร่างเป็น 3 ชนิด ได้แก่ รูปร่างผิดปกติ (Irregular shape), รูปร่างทรงกลม (Spherical), รูปร่างเป็นเส้น (Elongated) ได้แบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ผิวเรียบ (Smooth), ผิวหยาบ (Rough) ผิวเป็นรอยขีดข่วน (Striations) และได้แบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาค เป็น 5 ชนิด ได้แก่ สีผิวไหม้ (Heated Metal Color), สีของเหล็ก (Steel Color), สีทองแดง (Copper Color), สีสนิมแดง (Red Oxide Color), สีสนิมดำ (Black Oxide Color) ใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์จากการจำลองทางโทรโบโลยีและจากอุตสาหกรรม รวมจำนวน 185 ตัวอย่าง

3.3.9 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีวิเคราะห์นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน โดยการเรียนรู้แบบกำหนดเป้าหมายการเรียนรู้ (Supervised Learning) ซึ่งใช้การปรับตัวถ่วงน้ำหนักแบบวิธีการแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-Propagation) โดยเบื้องต้นผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยีได้พิจารณาแบ่งกลุ่มของตัวอย่าง

อนุภาคการสึกหรอจากอุตสาหกรรมและการทดลองทั้งหมด ซึ่งมีรูปร่างเป็น 3 ชนิดได้แก่ รูปร่างผิดปกติ (Irregular shape), รูปร่างทรงกลม (Spherical), รูปร่างเป็นเส้น (Elongated) ได้แบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ผิวเรียบ (Smooth), ผิวหยาบ (Rough) ผิวเป็นรอยขีดยาว (Striations) และได้แบ่งกลุ่มการวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาค เป็น 5 ชนิด ได้แก่ สีผิวไหม้ (Heated Metal Color), สีของเหล็ก (Steel Color), สีทองแดง (Copper Color), สีสนิมแดง (Red Oxide Color), สีสนิมดำ (Black Oxide Color) โดยใช้ข้อมูลในการสอนจำนวน 101 ตัวอย่าง และใช้ข้อมูลในการทดสอบจำนวน 84 ตัวอย่าง และทำการทดสอบข้อมูลซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักในการแยกกลุ่มอนุภาคการสึกหรอ

เปรียบเทียบผลจากการพิจารณาแยกกลุ่มด้วยวิธีวิเคราะห์ทางสถิติหลายตัวแปรและวิธีโครงข่ายประสาทเทียมกับการตรวจพินิจด้วยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยีเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการเหล่านี้

บทที่ 4

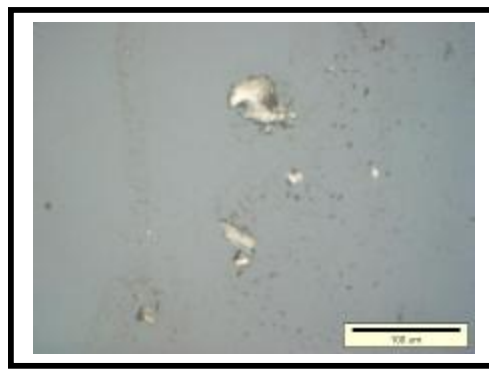
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการจำลองการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ในขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีด้วยน้ำมันเครื่องยนต์และขอบเขตการหล่อลื่นแบบแห้ง ด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ต่างกันคือ ภาระที่ใช้ในการทดลอง ความเร็วรอบและเวลาที่ทดลอง ทำให้ได้อนุภาคการสึกหรอที่มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยการสึกหรอแบบรุนแรงเกิดขึ้นในสภาวะขาดสารหล่อลื่น ทำให้อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีรอยไหม้และรอยขีดบนผิวหน้าเนื่องจากการยึดติด ส่วนการสึกหรอแบบปกติเกิดขึ้นในสภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี มีลักษณะอนุภาคการสึกหรอเป็นเส้นคล้ายเศษกลิ้งเนื่องจากการขีดขูด

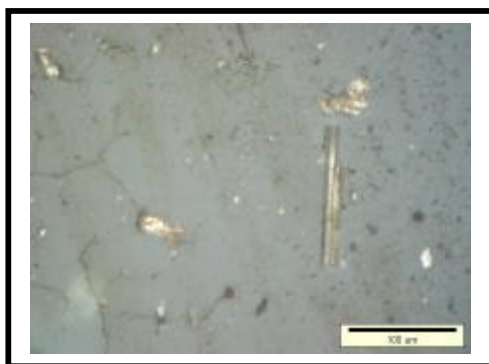
ในบทนี้ประกอบด้วยรายละเอียดผลของการทดลองรวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้ ส่วนที่หนึ่งกล่าวใน หัวข้อที่ 4.1 เป็นภาพถ่ายอนุภาคการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ได้จากเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ ในหัวข้อที่ 4.2 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายอนุภาคการสึกหรอทั้งหมดรวมถึงตัวอย่างภาพที่มาจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมผ่านการจัดสิ่งรบกวนและเปรียบเทียบสเกลก่อนเข้ากระบวนการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนที่สองกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ภาพอนุภาคการสึกหรอด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ ส่วนท้ายของบทนี้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ค่าเชิงตัวเลขของอนุภาคการสึกหรอเพื่อจำแนกรูปแบบการสึกหรอด้วยกรรมวิธีทางสถิติหลายตัวแปรและวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในหัวข้อที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีจัดกลุ่มในหัวข้อที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม ในหัวข้อที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในส่วนของค่าพารามิเตอร์เชิงตัวเลขของอนุภาคการสึกหรอที่สกัดได้จากกระบวนการวิเคราะห์ภาพ แสดงอยู่ในภาคผนวก ค.

4.1 อนุภาคการสึกหรอจากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบพินอินดิคส์

การใช้ภาระ 10 กิโลกรัม ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลาการทดสอบ 15 และ 25 นาที ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีหล่อลื่นด้วยน้ำมันเครื่องยนต์ เกรด SAE 40 แสดงในภาพที่ 4-1 ถึง 4-2

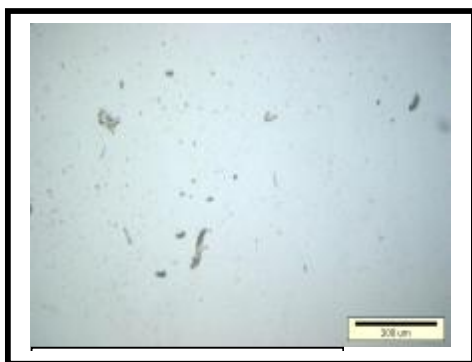


ภาพที่ 4-1 อนุภาคการสึกหรอจากเครื่องทดสอบแบบพินอินดิคส์ ใช้เวลา 15 นาที



ภาพที่ 4-2 อนุภาคการสึกหรอจากเครื่องทดสอบแบบพินอินดิคส์ ใช้เวลา 25 นาที

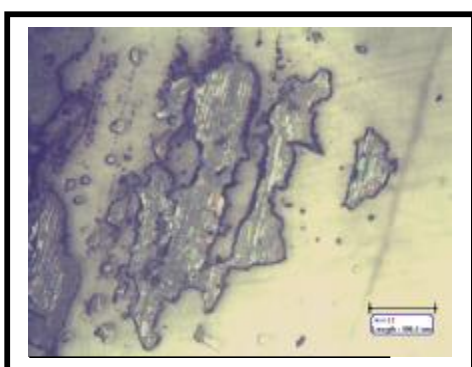
การใช้ภาระ 5 กิโลกรัม ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลาการทดสอบ 5 นาที ขอบเขตการหล่อลื่นแบบแห้ง (Dry Lubrication) แสดงในภาพที่ 4-3



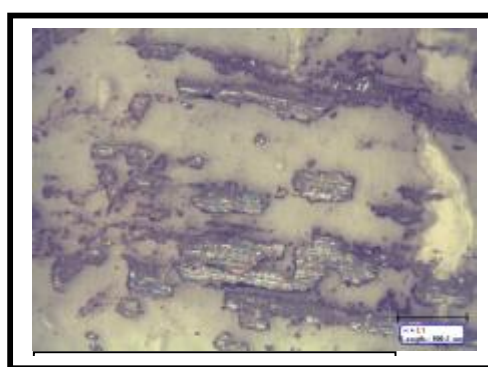
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4-3 อนุภาคการสึกหรอจากเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ ใช้เวลา 5 นาที

จากภาพที่ 4-1 เป็นภาพถ่ายอนุภาคการสึกหรอที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ด้วยเงื่อนไขการทดลอง ใช้ภาระ 10 กิโลกรัม ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลาการทดลอง 15 นาที ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีหล่อลื่นด้วยน้ำมันเครื่องยนต์ เกรด SAE 40 การสึกหรอเกิดจากกลไกการสึกหรอแบบขูดขีดเนื่องจากการลื่นไถล มีการสึกหรอตามปกติ (Normal wear) อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นขนาดเล็ก ที่ผิวหน้ามีลักษณะเรียบ และสีของอนุภาคเป็นลักษณะสีของเหล็กเนื่องจากสารหล่อลื่นช่วยลดความร้อนได้บางส่วน ในภาพที่ 4-2 เป็นภาพถ่ายอนุภาคการสึกหรอที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ด้วยเงื่อนไขการทดลอง ใช้ภาระ 10 กิโลกรัม ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลาการทดลอง 15 นาที ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีหล่อลื่นด้วยน้ำมันเครื่องยนต์ เกรด SAE 40 การสึกหรอเกิดจากกลไกการสึกหรอแบบยึดติดที่ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากการลื่นไถล เมื่อเพิ่มเวลาในการรับภาระ อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแผ่นยาวที่ค่อนข้างใหญ่ ที่ผิวหน้ามีรอยขีดยาวไปตามแนวการเคลื่อนที่ แต่เห็นได้ไม่ชัดเจนนัก และสีของอนุภาคเป็นลักษณะสีของเหล็กเนื่องจากสารหล่อลื่นช่วยลดความร้อนได้บางส่วน ในภาพที่ 4-3 เป็นภาพถ่ายอนุภาคการสึกหรอที่ได้

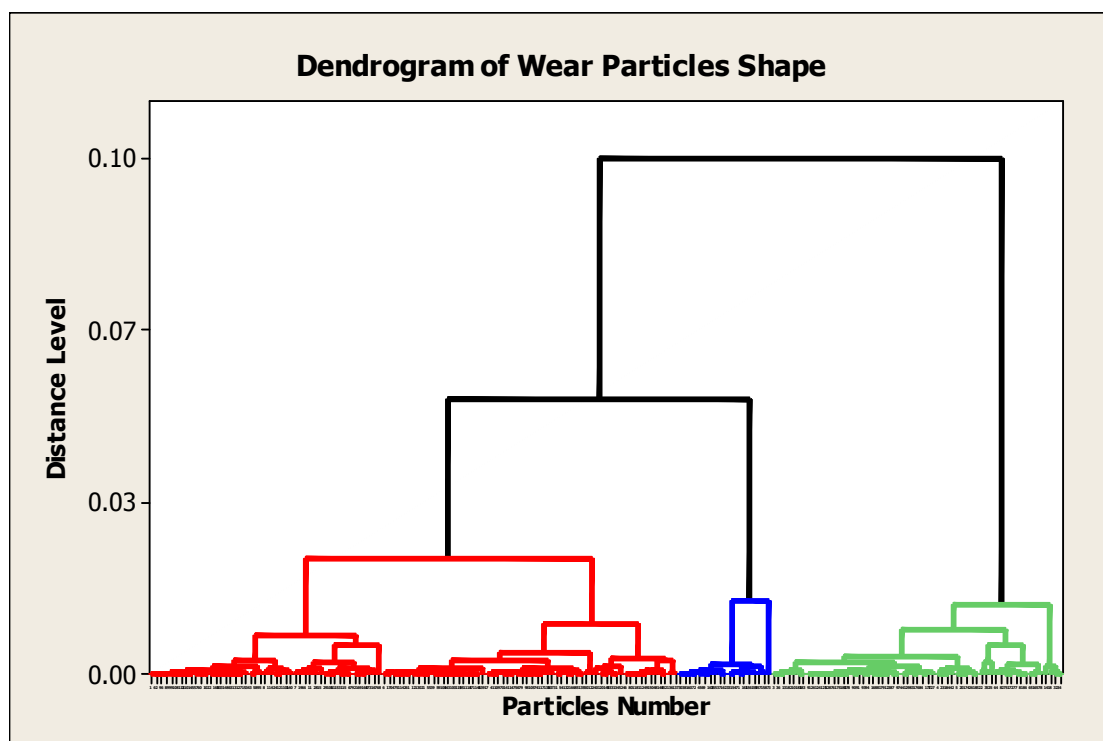
จากการทดสอบการสีกหรือด้วยเครื่องทดสอบแบบพินอนดิสก์ด้วยเงื่อนไขการทดลอง ใช้ภาระ 5 กิโลกรัม ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลาการทดลอง 5 นาที ขอบเขตการหล่อลื่นแบบแห้งหรือสภาวะไร้สารหล่อลื่น ภาพที่ 4-3 (ค-ง) การสีกหรือเกิดจากกลไกการสีกหรือแบบยึดติดที่รุนแรง เนื่องจากการลื่นไถล เมื่อไม่มีสารหล่อลื่นบริเวณผิวคู่สัมผัส อนุภาคการสีกหรือที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ ที่ผิวหน้ามีรอยขีดยาวไปตามแนวการเคลื่อนที่ และสีของอนุภาคเป็นลักษณะสีของเหล็กในส่วนที่เกิดความร้อนไม่สูงมาก แต่ในส่วนที่เกิดความร้อนสูงมาก สีของอนุภาคอาจทำให้เห็นเป็นลักษณะสีผิวไหม้ นอกจากนี้ ภาพที่ 4-3 (ก-ข) มีการสีกหรือที่เกิดจากกลไกการสีกหรือแบบขูดขีด อนุภาคการสีกหรือมีลักษณะเป็นเส้นขนาดเล็ก ที่ผิวหน้ามีลักษณะเรียบ และสีของอนุภาคเป็นลักษณะสีของเหล็ก

4.2 ตัวอย่างภาพถ่ายอนุภาคการสีกหรือ

การวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดีเอ็นเอ ทำโดยใช้ภาพถ่ายอนุภาคการสีกหรือแบบไฟล์เจเพ็กจากการบันทึกข้อมูลภาพด้วยกล้องซีซีดี ที่มาจากการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ ก่อนการวัดอนุภาคการสีกหรือต้องตัดภาพในจุดที่สนใจ และเทียบหน่วยความยาว (Scale calibration) ของภาพก่อนเพื่อให้การวัดขนาดของอนุภาคการสีกหรือมีขนาดที่ถูกต้องตามรายละเอียดจริง รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

4.3 ผลการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจัดกลุ่ม

การวิเคราะห์ข้อมูลรูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือตัวอย่างที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ (ภาคผนวก ก.) แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรเจ็ดตัวแปร ได้แก่ พื้นที่ เส้นรอบรูป ความกลม วงกลมเฟอร์เร่ สัดส่วนพื้นที่ พื้นที่นูน เส้นรอบรูปนูน ซึ่งแสดงข้อมูลของตัวแปรเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์กระบวนการทางสถิติหลายตัวแปร ด้วยวิธีการจัดกลุ่ม (CA: Cluster Analysis) การจัดกลุ่มอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น (Hierarchical Clustering) โดยการวัดค่าเฉลี่ยระยะระหว่างกลุ่ม (Average Linkage) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของการจัดกลุ่มโดยกราฟเดนไดรแกรม เป็นกราฟที่แสดงการจัดกลุ่มที่เป็นพวกเดียวกันจากการพิจารณาช่วงระดับของระยะ (Distance Level) จากความสัมพันธ์ของระยะยูคลิดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งใช้จัดกลุ่มอนุภาคการสีกหรือจำนวน 185 ตัวอย่าง ตามภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 กราฟเดนโดแกรมการจัดกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสึกหรอ

สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยี ได้แบ่งกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสึกหรอก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ก) กลุ่มรูปร่างผิดปกติ ข) กลุ่มรูปร่างเป็นเส้นยาว ค) กลุ่มรูปร่างทรงกลม (วิเคราะห์ตัวอย่างจริงกลุ่มรูปร่างทรงกลมจากอุตสาหกรรมเท่านั้น เนื่องจากการทดลองจำลองการสึกหรอประเภทนี้ทำได้ยากและอาจต้องใช้เวลานาน) ซึ่งจำนวนของกลุ่มขึ้นอยู่กับระดับของระยะ (Distance Level) ของกราฟเดนโดแกรมสามารถแสดงหมายเลขแต่ละตัวอย่างเป็นกลุ่มได้อธิบายให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นตามข้อมูลดังต่อไปนี้

กลุ่ม ก : 1, 2, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 17, 19, 21, 24, 27, 28, 29, 31, 39, 41, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 70, 74, 79, 80, 85, 89, 92, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 160, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 164, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 173

กลุ่ม ข : 3, 4, 5, 9, 10, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 23, 25, 26, 32, 34, 35, 36, 42, 44, 64, 65, 75, 76, 77, 78, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 90, 91, 93, 94, 97, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 165, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185

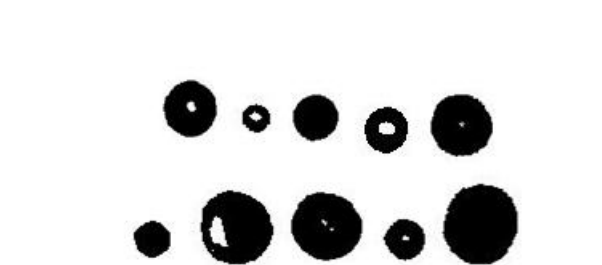
กลุ่ม ค : 30, 33, 37, 38, 45, 69, 71, 72, 73, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163



ภาพที่ 4-5 ตัวอย่างรูปร่างอนุภาคการสีกหรือกลุ่ม ก

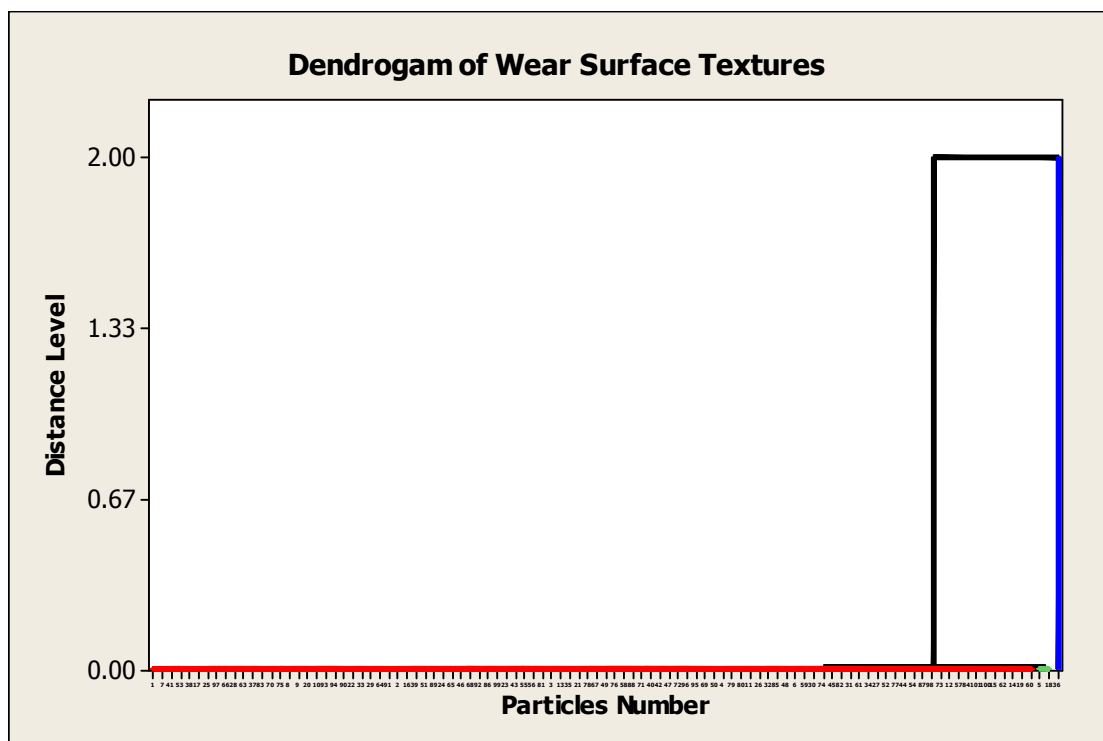


ภาพที่ 4-6 ตัวอย่างรูปร่างอนุภาคการสีกหรือกลุ่ม ข



ภาพที่ 4-7 ตัวอย่างรูปร่างอนุภาคการสีกหรือกลุ่ม ค

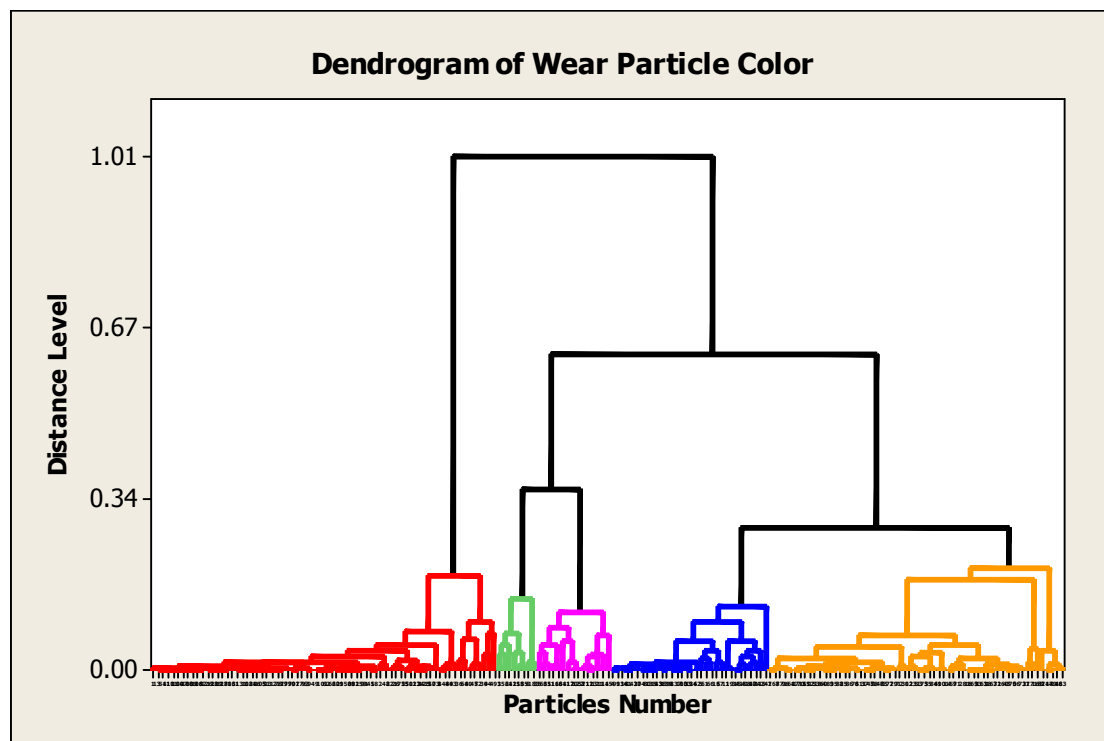
สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยี ได้แบ่งกลุ่มลักษณะพื้นผิวของอนุภาคการสึกหรอก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ง) กลุ่มพื้นผิวหยาบ จ) กลุ่มพื้นผิวเรียบ ฉ) กลุ่มพื้นผิวมีรอยขีดยาว แสดงความสัมพันธ์กลุ่มด้วยกราฟเดนโดแกรมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 4-8 กราฟเดนโดแกรมการจัดกลุ่มลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอ

จากกราฟเดนโดแกรมวิธีการจัดกลุ่ม(CA) จากค่าเชิงตัวเลขที่ได้จากวิธีวิเคราะห์เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระดับสีเทา (GLCM) เป็นวิธีที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะพื้นผิวของอนุภาคการสึกหรอได้อย่างถูกต้อง อาจมีสาเหตุมาจากตัวแปรจากวิธี GLCM ที่ใช้วิเคราะห์มีค่าเชิงตัวเลขที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันของกลุ่มมีค่าอยู่ในระดับหลายจุดทศนิยมทำให้ไม่สามารถจัดกลุ่มได้อย่างถูกต้อง

สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยี ได้แบ่งกลุ่มลักษณะสีอนุภาคการสึกหรอก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติ แบ่งเป็น 5 กลุ่ม ข) กลุ่มสีผิวใหม่ ช) กลุ่มสีสนิมแดง ฉ) กลุ่มสีของเหล็ก ญ) กลุ่มสีทองแดง ฎ) กลุ่มสีสนิมดำ (วิเคราะห์ตัวอย่างจริงกลุ่มสีสนิมดำจากอุตสาหกรรมเท่านั้น เนื่องจาก การทดลองจำลองการสึกหรอประเภทนี้ทำได้ยากและอาจต้องใช้เวลานาน)แสดงความสัมพันธ์กลุ่มด้วยกราฟเดนโดแกรมซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 กราฟเดนโดแกรมการจัดกลุ่มลักษณะสีอนุภาคการสึกหรอ

กลุ่ม ช : 1, 2, 8, 9, 13, 16, 20, 22, 25, 26, 29, 36, 39, 43, 48, 49, 50, 62, 68, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 97, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 144, 150, 157, 159, 166, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182

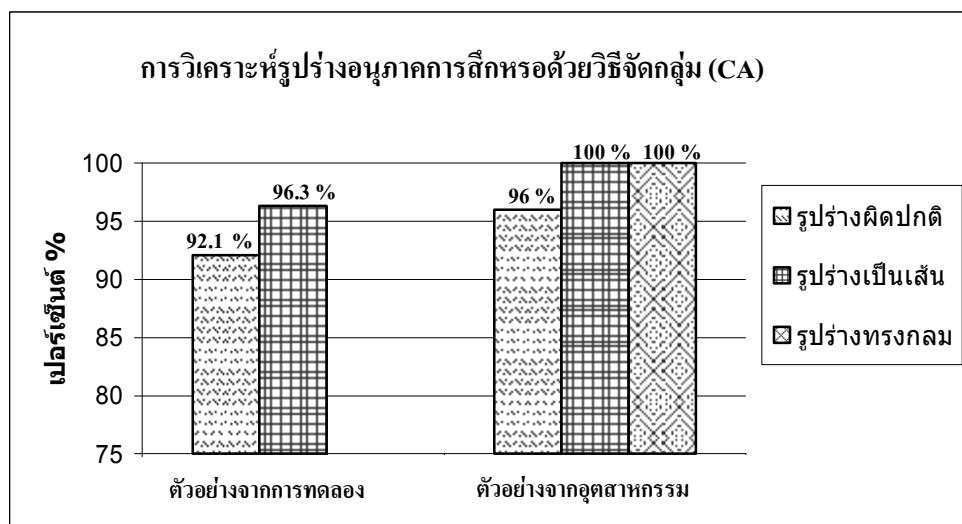
กลุ่ม ซ : 4, 5, 11, 15, 19, 24, 30, 34, 61, 66, 67, 74, 80, 98, 99, 100, 199, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 154, 158, 162, 174

กลุ่ม ฉ : 7, 12, 14, 17, 18, 23, 27, 28, 28, 32, 33, 37, 38, 45, 53, 55, 56, 59, 60, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 95, 96, 101, 130, 145, 146, 147, 148, 149, 151, 152, 135, 160, 161, 163, 164, 165, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 184

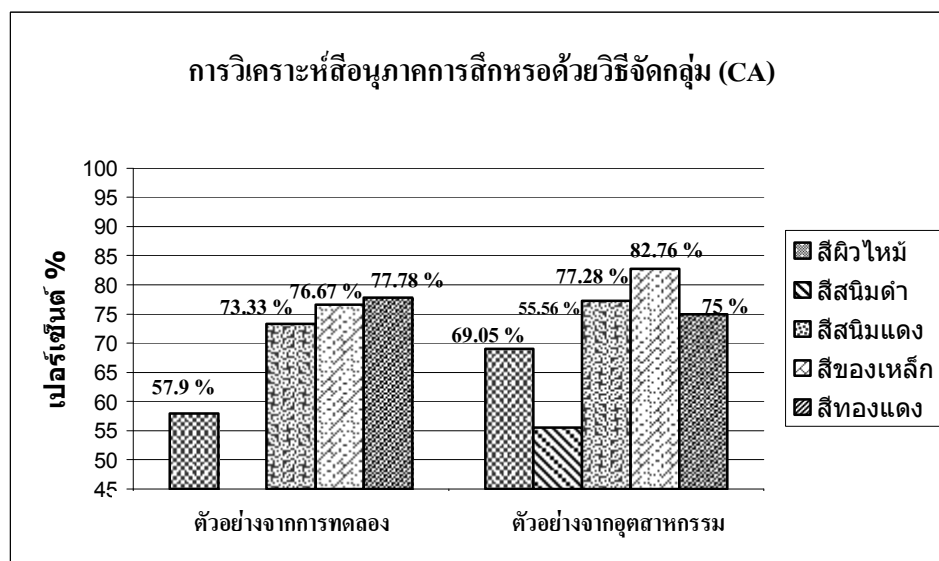
กลุ่ม ญ : 35, 57, 63, 64, 65, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 122

กลุ่ม ณ : 3, 6, 10, 21, 31, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 52, 54, 102, 103

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นโดยการวัดค่าเฉลี่ยระยะระหว่างกลุ่ม สามารถที่จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรแบ่งกลุ่มที่บ่งบอกลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และลักษณะสีของอนุภาคการสึกหรอ เมื่อเปรียบเทียบกับสมมุติฐานของผู้เชี่ยวชาญทางไทรโบโลยี ได้ผลความถูกต้องคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้



ภาพที่ 4-10 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจัดกลุ่ม



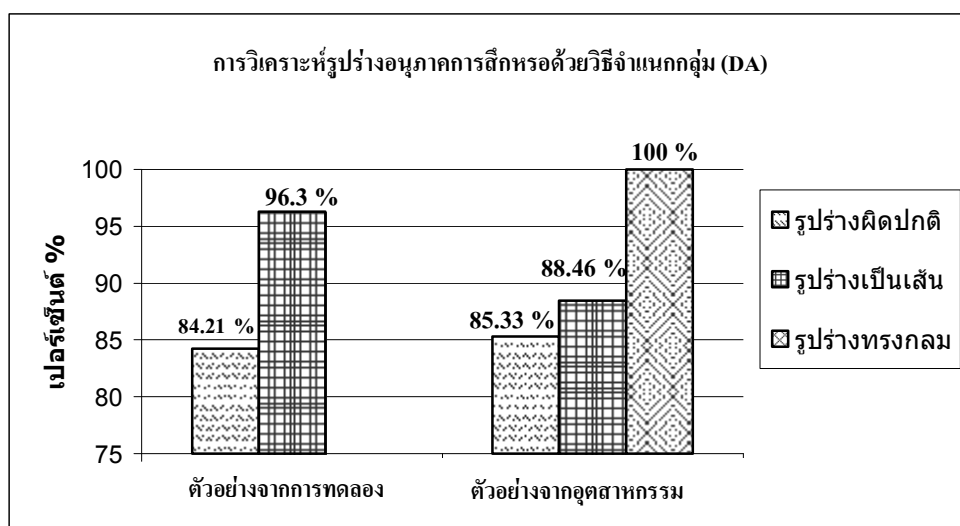
ภาพที่ 4-11 การวิเคราะห์สีอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจัดกลุ่ม

4.4 ผลการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม

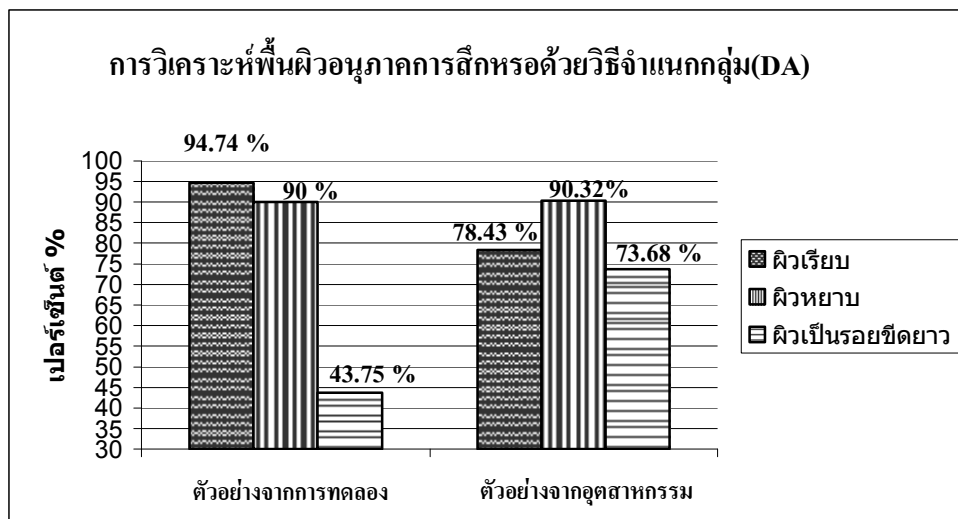
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ลักษณะอนุภาคการสีกหรือทางสถิติหลายตัวแปร ด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม (DA: Discriminant Analysis) การจำแนกกลุ่มอนุภาคการสีกหรือด้วยฟังก์ชันระยะห่างระหว่างกลุ่ม (Distance Function) โดยการพิจารณาระยะทางจากระยะสแควร์ยูคลิด (Squared Euclidean Distance) และวิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น (Probability) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ตัวอย่างอนุภาคการสีกหรือจำนวน 101 ตัวอย่าง สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโพรโบลอยได้แบ่งกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสีกหรือก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ก) กลุ่มรูปร่างผิดปกติ ข) กลุ่มรูปร่างเป็นเส้นยาว ค) กลุ่มรูปร่างทรงกลม (วิเคราะห์ตัวอย่างจริงกลุ่มรูปร่างทรงกลมจากอุตสาหกรรมเท่านั้น เนื่องจากการทดลอง

จำลองการสีกหอพระเภทนี้ทำได้ยากและอาจต้องใช้เวลาาน) สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยี ได้แบ่งกลุ่มลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหอก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ง) กลุ่มพื้นผิวหยาบ จ) กลุ่มพื้นผิวเรียบ ฉ) กลุ่มพื้นผิวมีรอยขีดยาว สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยี ได้แบ่งกลุ่มลักษณะสีของอนุภาคการสีกหอก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ช) กลุ่มสีผิวไหม้ ซ) กลุ่มสีสนิมแดง ฅ) กลุ่มสีของเหล็ก ญ) กลุ่มสีทองแดง ฎ) กลุ่มสีสนิมดำ (วิเคราะห์ตัวอย่างจริงกลุ่มสีสนิมดำจากอุตสาหกรรมเท่านั้น เนื่องจากการทดลองจำลองการสีกหอพระเภทนี้ทำได้ยากและอาจต้องใช้เวลาาน) แสดงความสัมพันธ์การจำแนกกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสีกหอกตามตารางที่ ค-2 แสดงความสัมพันธ์การจำแนกกลุ่มลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหอกตามตารางที่ ค-3 แสดงความสัมพันธ์การจำแนกกลุ่มลักษณะสีอนุภาคการสีกหอกตามตารางที่ ค-4

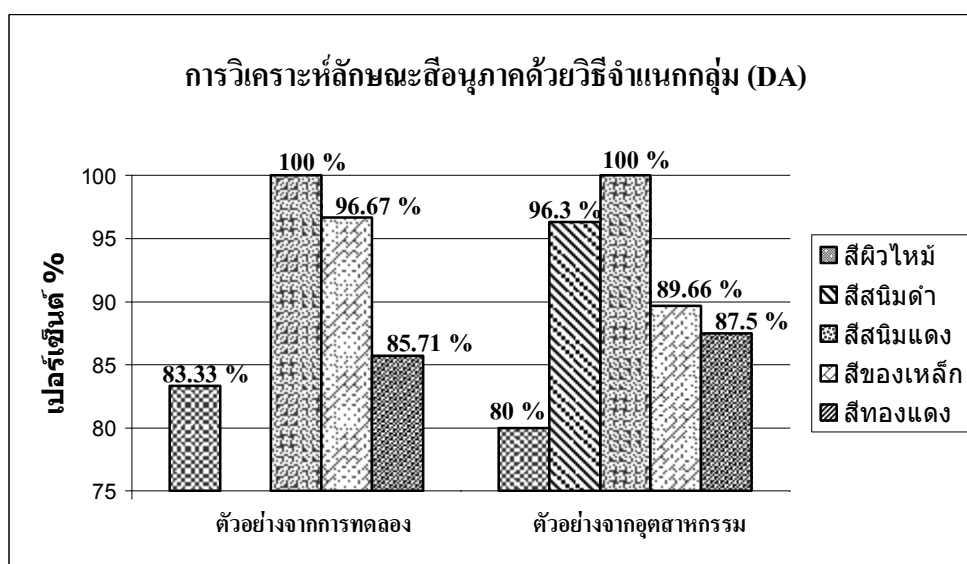
การแบ่งแยกชนิดอนุภาคการสีกหอกด้วยวิธีการจำแนกกลุ่ม (DA) สามารถที่จะแบ่งลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และลักษณะสีของอนุภาคการสีกหอก เมื่อเปรียบเทียบกับสมมุติฐานของผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบโลยี ได้ผลความถูกต้องคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้



ภาพที่ 4-12 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหอกด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม



ภาพที่ 4-13 การวิเคราะห์พื้นผิวอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม



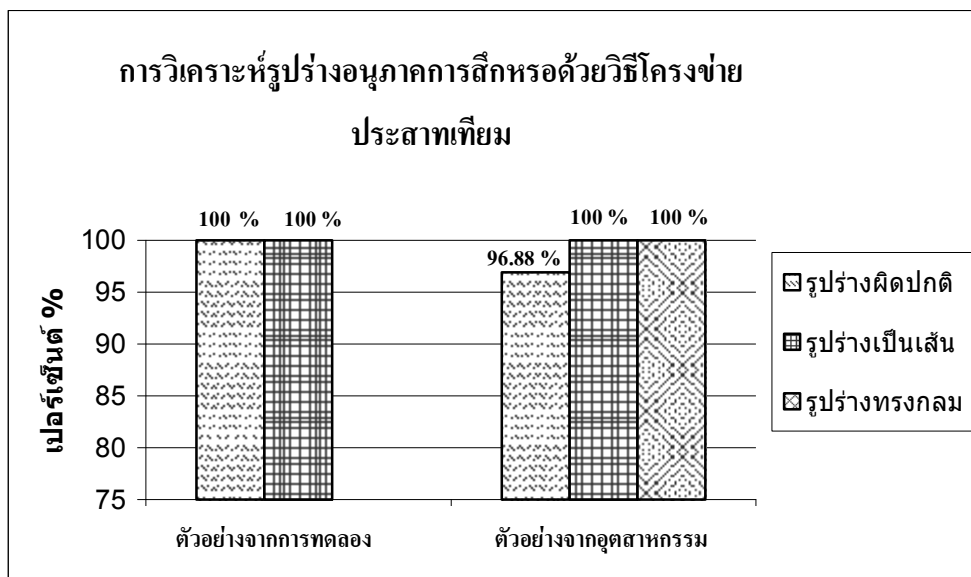
ภาพที่ 4-14 การวิเคราะห์สีอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม

4.5 ผลการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

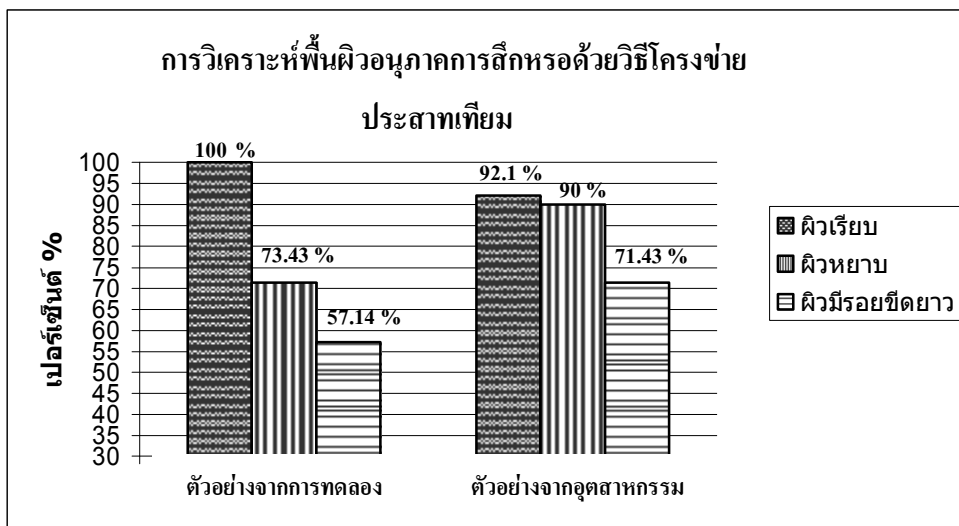
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ลักษณะอนุภาคการสึกหรอด้วยนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน โดยการเรียนรู้แบบกำหนดเป้าหมายการเรียนรู้ (Supervised Learning) ใช้การปรับตัวถ่วงน้ำหนักแบบวิธีแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-Propagation) แสดงความสัมพันธ์ตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอ สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยี ได้แบ่งกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสึกหรอก่อนการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ก) กลุ่มรูปร่างผิดปกติ ข) กลุ่มรูปร่างเป็นเส้นยาว

ค) กลุ่มรูปร่างทรงกลม (วิเคราะห์ตัวอย่างจริงกลุ่มรูปร่างทรงกลมจากอุตสาหกรรมเท่านั้น เนื่องจากการทดลองจำลองการสีกหรือประเภทนี้ทำได้ยากและอาจต้องใช้เวลาานาน) สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยี ได้แบ่งกลุ่มลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือก่อนการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ง) กลุ่มพื้นผิวหยาบ จ) กลุ่มพื้นผิวเรียบ ฉ) กลุ่มพื้นผิวมีรอยขีดยาว สมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยี ได้แบ่งกลุ่มลักษณะสีของอนุภาคการสีกหรือก่อนการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ช) กลุ่มสีผิวไหม้ ซ) กลุ่มสีสนิมแดง ฉ) กลุ่มสีของเหล็ก ญ) กลุ่มสีทองแดง ฎ) กลุ่มสีสนิมดำ (วิเคราะห์ตัวอย่างจริงกลุ่มสีสนิมดำจากอุตสาหกรรมเท่านั้น เนื่องจากการทดลองจำลองการสีกหรือประเภทนี้ทำได้ยากและอาจต้องใช้เวลาานาน) แสดงความสัมพันธ์การแยกกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสีกหรือตามตารางที่ ค-5 แสดงความสัมพันธ์การแยกกลุ่มลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือตามตารางที่ ค-6 แสดงความสัมพันธ์การแยกกลุ่มลักษณะสีอนุภาคการสีกหรือตามตารางที่ ค-7

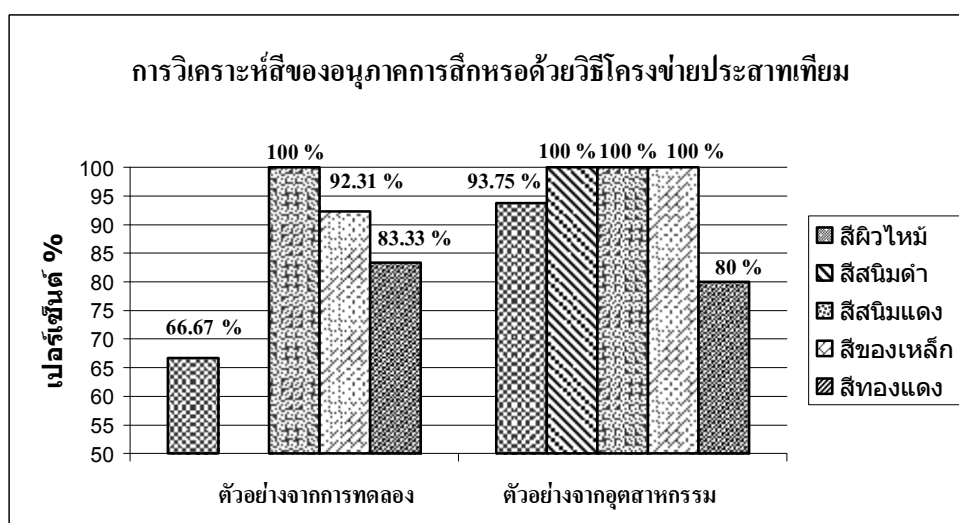
การแบ่งแยกชนิดอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (AN) สามารถที่จะแบ่งลักษณะรูปร่างลักษณะพื้นผิว และลักษณะสีของอนุภาคการสีกหรือ เมื่อเปรียบเทียบกับสมมุติฐานของผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยี ได้ผลความถูกต้องคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้



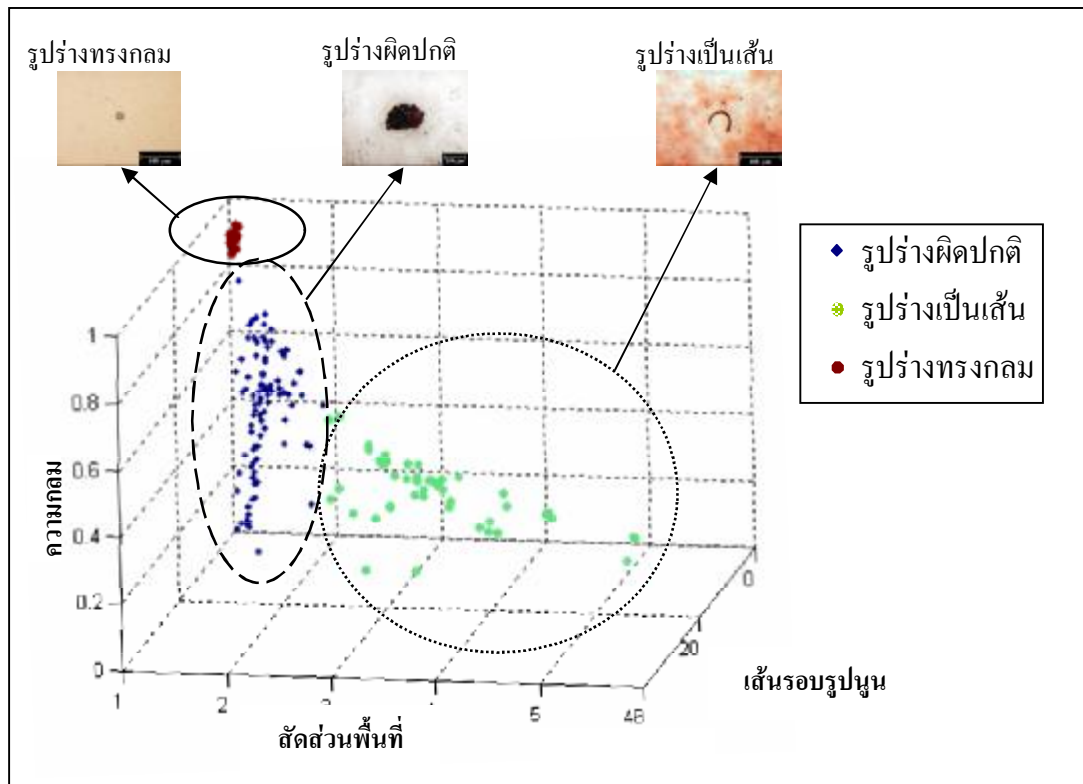
ภาพที่ 4-15 การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม



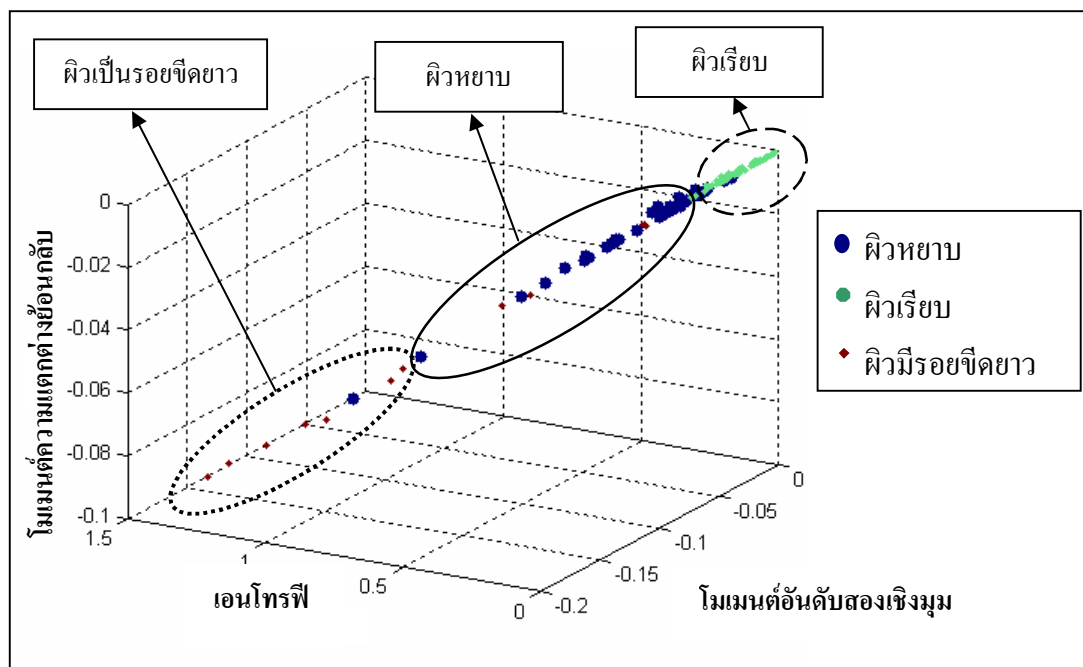
ภาพที่ 4-16 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม



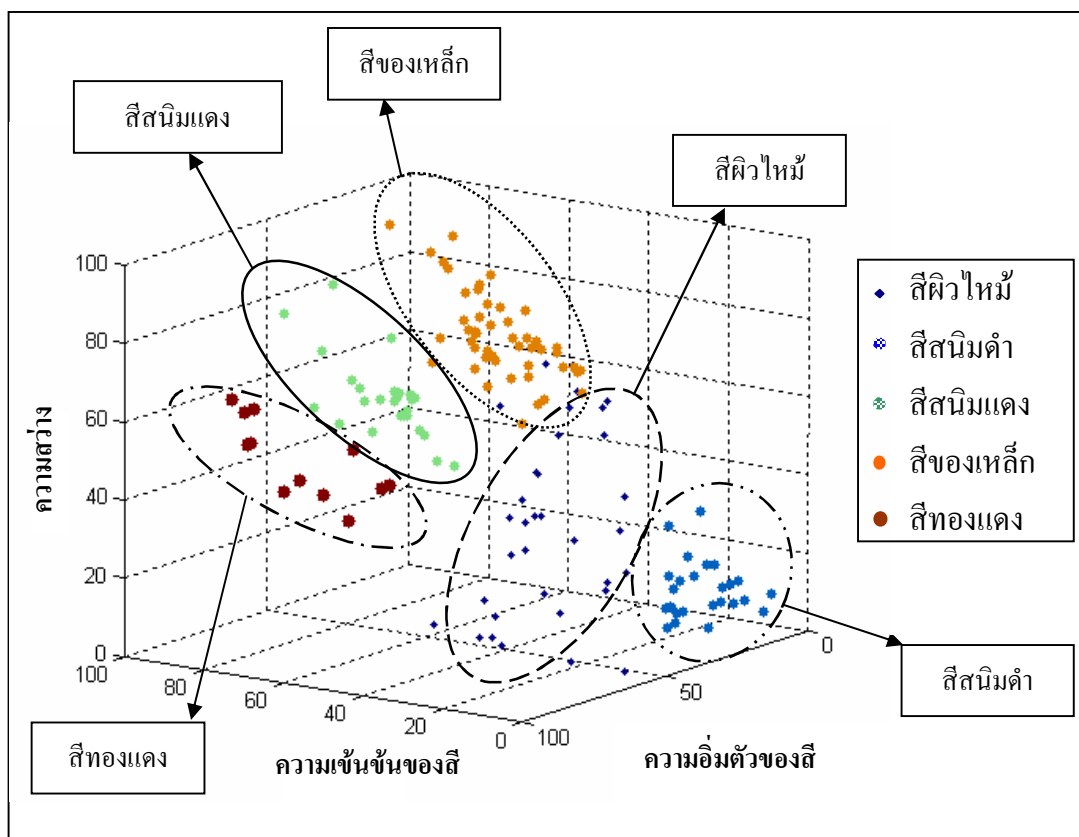
ภาพที่ 4-17 การวิเคราะห์สีของอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม



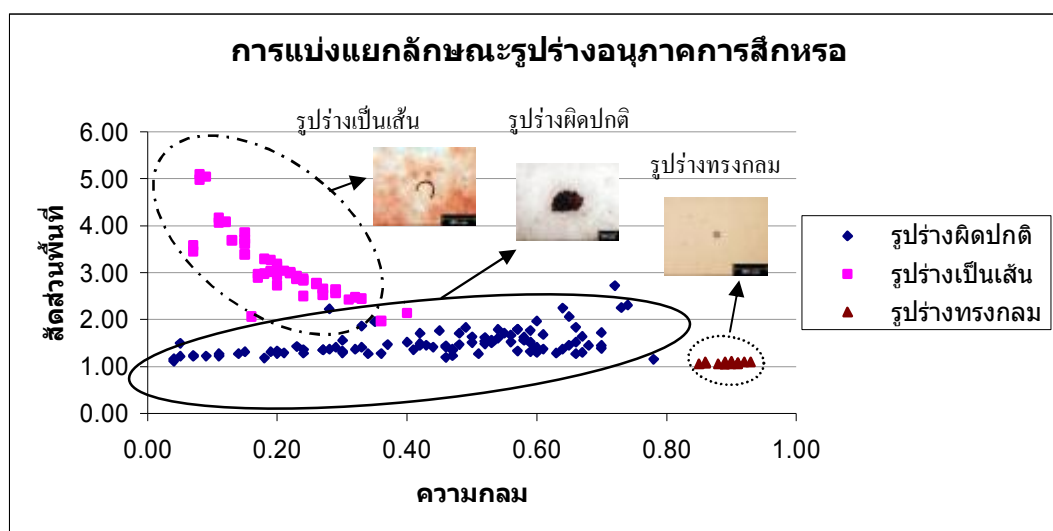
ภาพที่ 4-18 การแบ่งแยกลักษณะรูปร่างอนุภาคการสีหธด้วยสามตัวแปร



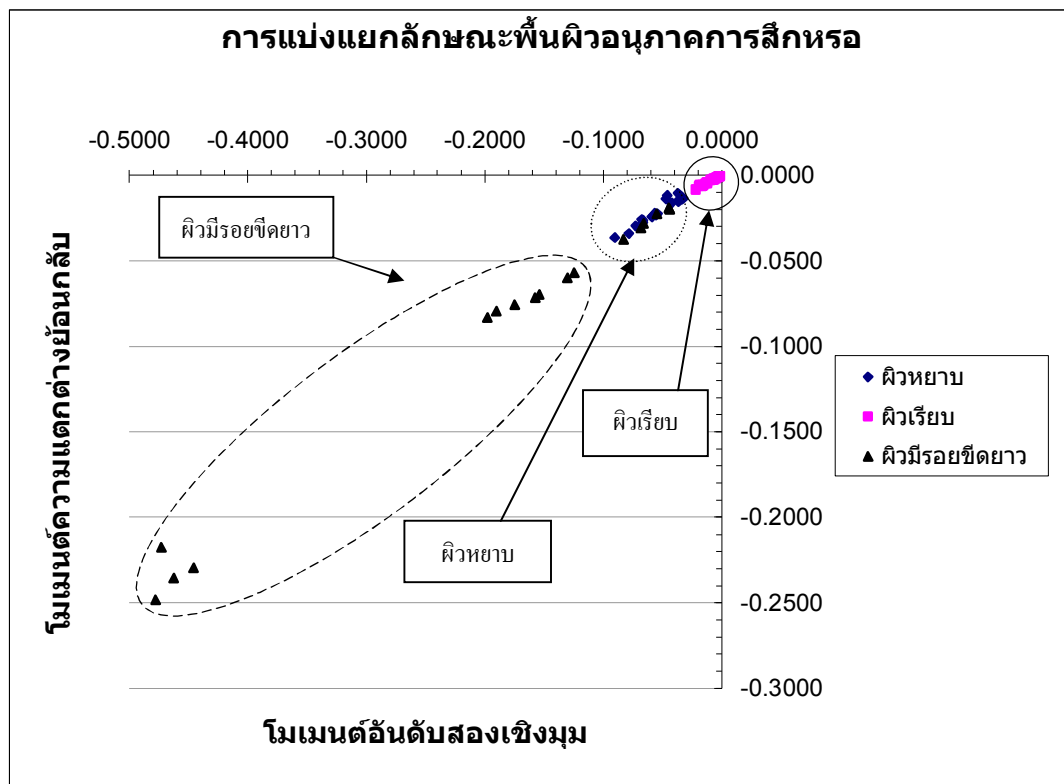
ภาพที่ 4-19 การแบ่งแยกลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีหธด้วยสามตัวแปร



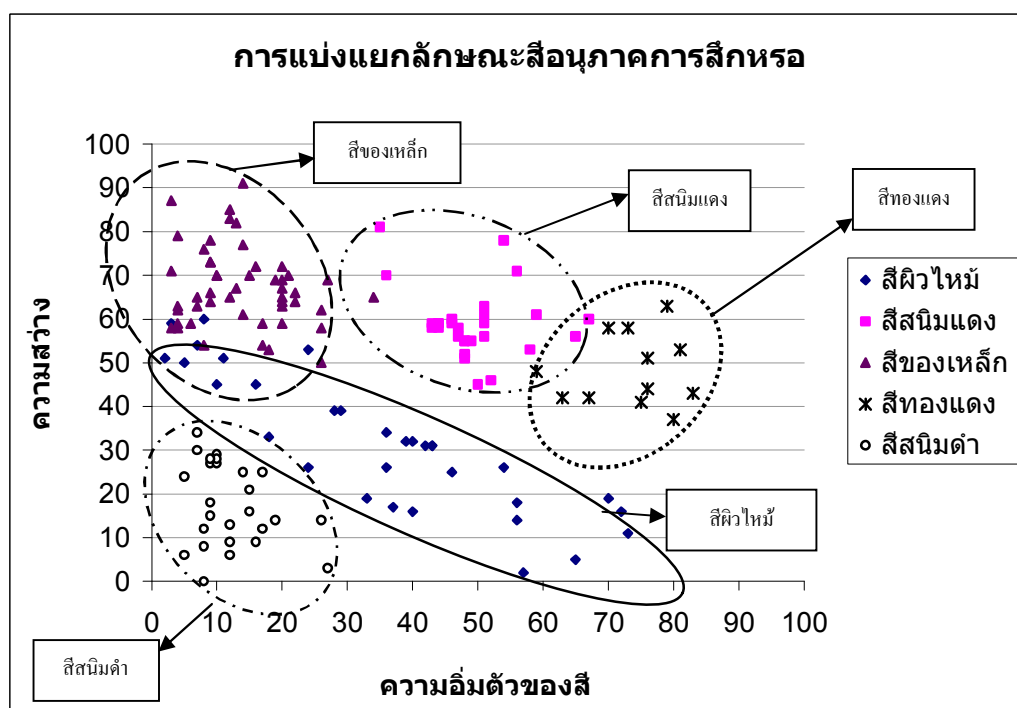
ภาพที่ 4-20 การแบ่งแยกลักษณะสีของอนุภาคการสีกหรือด้วยสามตัวแปร



ภาพที่ 4-21 การแบ่งแยกลักษณะรูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยสองตัวแปร



ภาพที่ 4-22 การแบ่งแยกลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอด้วยสองตัวแปร



ภาพที่ 4-23 การแบ่งแยกลักษณะสีของอนุภาคการสึกหรอด้วยสองตัวแปร

จากภาพที่ 4-18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์รูปร่างที่มีพิสัย (Range) ที่ใกล้เคียงกันและเป็นตัวแปรที่สามารถแยกให้เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มรูปร่างผิดปกติ กลุ่มรูปร่างเป็นเส้น และกลุ่มรูปร่างทรงกลม พิจารณาจากค่าความเกี่ยวพันร่วมกันสูงของพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีจำแนกกลุ่ม รวมถึงการพิจารณาจากค่าความเบี่ยงมาตรฐาน (SD : Standard Deviation) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกันได้แก่ สัดส่วนพื้นที่ (Fullness Ratio) เส้นรอบรูปนูน (Convex Area) และความกลม (circularity) โดยที่พารามิเตอร์ที่เห็นชัดในการแยกกลุ่มรูปร่างผิดปกติคือค่าพารามิเตอร์ของสัดส่วนพื้นที่ ซึ่งเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากอยู่ในช่วง 1.11 ถึง 2.73 พารามิเตอร์ที่เห็นชัดในการแยกกลุ่มรูปร่างเป็นเส้นคือค่าพารามิเตอร์ของสัดส่วนพื้นที่ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากอยู่ในช่วง 1.97 ถึง 5.10 พารามิเตอร์ที่เห็นชัดในการแยกกลุ่มรูปร่างทรงกลมคือค่าพารามิเตอร์ของความกลมซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากอยู่ในช่วง 0.85 ถึง 0.93

จากภาพที่ 4-19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์ลักษณะพื้นผิวที่มีความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างกลุ่มลักษณะพื้นผิวหยาบ กลุ่มลักษณะพื้นผิวเรียบและกลุ่มลักษณะพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว พิจารณาจากค่าความเกี่ยวพันร่วมกันสูงของพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีจำแนกกลุ่ม รวมถึงการพิจารณาจากค่าความเบี่ยงมาตรฐาน (SD : Standard Deviation) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกันได้แก่ เอนโทรปี (Entropy) โมเมนต์อันดับสองเชิงมุม (Angular Second Moment) และโมเมนต์ความแตกต่างย้อนกลับ (Inverse Difference Moment) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งสามมีความสามารถที่จะแบ่งแยกกลุ่มลักษณะพื้นผิวรูปแบบต่างๆได้ เนื่องจากตำแหน่งบนกราฟมีการกระจายตัวลักษณะเดียวกันเชิงเส้น แสดงถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของตัวแปรที่สูง

จากภาพที่ 4-20 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์ลักษณะสีที่มีพิสัยที่ใกล้เคียงกันและมีความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างกลุ่มลักษณะสีผิวไหม้ กลุ่มลักษณะสีสนิมดำ กลุ่มลักษณะสีทองแดง กลุ่มลักษณะสีสนิมแดง และกลุ่มลักษณะสีของเหล็ก พิจารณาจากค่าความเกี่ยวพันร่วมกันสูงของพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีจำแนกกลุ่ม รวมถึงการพิจารณาจากค่าความเบี่ยงมาตรฐาน (SD : Standard Deviation) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกันได้แก่ ความเข้มข้นสี (Intensity) ความอิ่มตัวสี (Saturation) และความสว่าง (Luminance) พารามิเตอร์ทั้งสามมีความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มลักษณะสีผิวไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการกระจายของข้อมูลอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน พารามิเตอร์ทั้งสามมีความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มลักษณะสีสนิมดำ เนื่องจากมีค่าพิสัยที่ต่ำเมื่อเทียบกับลักษณะสีกลุ่มอื่นๆ พารามิเตอร์ทั้งสามมีความสามารถในการแบ่งแยกกลุ่มลักษณะสีทองแดง พารามิเตอร์ทั้งสามมีความสามารถที่จะแยกกลุ่มลักษณะสีสนิมแดงออกจากกลุ่มอื่นได้

จากภาพที่ 4-21 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์รูปร่างที่มีพิสัยที่ใกล้เคียงกันและเป็นตัวแปรที่สามารถแยกให้เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มรูปร่างผิดปกติ กลุ่มรูปร่างเป็นเส้น และกลุ่มรูปร่างทรงกลมได้อย่างชัดเจน พิจารณาจากค่าความเกี่ยวพันร่วมกันสูงของพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีจำแนกกลุ่ม รวมถึง

การพิจารณาจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยที่สุด (SD : Standard Deviation) และรวมถึงจากการทดลองพล็อตสองมิติเปรียบเทียบกันของตัวแปรเหล่านี้พบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกันได้แก่ สัดส่วนพื้นที่ (Fullness Ratio) และความกลม (circularity) โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของสัดส่วนพื้นที่ มีความเด่นชัดในการแยกกลุ่มรูปร่างผิดปกติเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากคือมีค่าเฉลี่ย (Mean) ประมาณ 1.51 ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.) เท่ากับ 0.28 และค่าพารามิเตอร์ของสัดส่วนพื้นที่ เห็นชัดในการแยกกลุ่มรูปร่างเป็นเส้น เห็นได้ว่ามีพิสัยใกล้เคียงกันมีค่าเฉลี่ย ประมาณ 3.14 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.71 ค่าพารามิเตอร์ของความกลม มีความเด่นชัดในการแยกกลุ่มรูปร่างทรงกลม ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากมีค่าเฉลี่ย ประมาณ 0.89 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.02 ค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรอื่นๆ ดูได้จากตารางที่ 4-1

จากภาพที่ 4-22 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์ลักษณะพื้นผิวที่มีความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างกลุ่มลักษณะพื้นผิวหยาบ กลุ่มลักษณะพื้นผิวเรียบและกลุ่มลักษณะพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว พิจารณาจากค่าความเกี่ยวพันร่วมกันสูงของพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีจำแนกกลุ่ม ราวถึงการพิจารณาจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยที่สุด (SD : Standard Deviation) และรวมถึงจากการทดลองพล็อตสองมิติเปรียบเทียบกันของตัวแปรเหล่านี้พบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกันได้แก่ ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกันได้แก่ โมเมนต์อันดับสองเชิงมุม (Angular Second Moment) และโมเมนต์ความแตกต่างย้อนกลับ (Inverse Difference Moment) โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของโมเมนต์อันดับสองเชิงมุมมีความสามารถในการแยกกลุ่มลักษณะพื้นผิวหยาบ เห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากคือมีค่าเฉลี่ยประมาณ -0.0480 ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.) เท่ากับ 0.0268 และค่าพารามิเตอร์ของโมเมนต์อันดับสองเชิงมุมมีความสามารถในการแยกกลุ่มลักษณะพื้นผิวเรียบ เห็นได้ว่ามีพิสัยใกล้เคียงกันมีค่าเฉลี่ย ประมาณ -0.0130 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0067 ค่าพารามิเตอร์ของโมเมนต์ความแตกต่างย้อนกลับ มีความสามารถในการแยกกลุ่มลักษณะพื้นผิวมีรอยขีดยาว ซึ่งจะเห็นจากกราฟได้ว่ามีพิสัยที่กว้างมากเนื่องจากการกระจายเป็นสองกลุ่ม คือกลุ่มที่เป็นตัวอย่างจากการทดลองจะอยู่ใกล้กับค่าของกลุ่มพื้นผิวหยาบ ส่วนกลุ่มที่เป็นตัวอย่างจริงจากอุตสาหกรรม สามารถแยกจากกลุ่มอื่นได้อย่างชัดเจน (กลุ่มทางซ้ายด้านล่างบนกราฟ) ตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอจากการทดลองและอุตสาหกรรมของกลุ่มลักษณะพื้นผิวมีรอยขีดยาว มีค่าเฉลี่ยประมาณ -0.0832 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0799 ค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรอื่นๆ ดูได้จากตารางที่ 4-2

จากภาพที่ 4-23 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์พารามิเตอร์ลักษณะสีที่มีพิสัยที่ใกล้เคียงกันและมีความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างกลุ่มลักษณะสีผิวไหม้ กลุ่มลักษณะสีสนิมดำ กลุ่มลักษณะสีทองแดง กลุ่มลักษณะสีสนิมแดง และกลุ่มลักษณะสีของเหล็ก พิจารณาจากค่าความเกี่ยวพันร่วมกันสูงของพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีจำแนกกลุ่ม ราวถึงการพิจารณาจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD : Standard Deviation) และรวมถึงจากการทดลองพล็อตสองมิติเปรียบเทียบกันของตัวแปรเหล่านี้พบว่าพารามิเตอร์ที่

สำคัญร่วมกันได้แก่ ความอิ่มตัวสี (Saturation) และความสว่าง (Luminance) โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของความอิ่มตัวของสีมีความสามารถในการแยกกลุ่มสีสนิมแดง สีของเหล็ก และสีทองแดง โดยที่กลุ่มสนิมแดงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 52 เปอร์เซนต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11 กลุ่มสีของเหล็กมีค่าเฉลี่ยประมาณ 16 เปอร์เซนต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11 ส่วนกลุ่มสีทองแดงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 66 เปอร์เซนต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 16 กลุ่มของสีผิวใหม่มีค่าความอิ่มตัวสี เฉลี่ยประมาณ 41 เปอร์เซนต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 26 และความสว่างมีค่าเฉลี่ยประมาณ 31 และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 16 ส่วนกลุ่มของสีสนิมดำมีค่าความอิ่มตัวสี เฉลี่ยประมาณ 17 เปอร์เซนต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10 และความสว่างมีค่าเฉลี่ยประมาณ 12 เปอร์เซนต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6 ค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรอื่นๆ ดูได้จากตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ลักษณะรูปร่างอนุภาคการสึกหรอ

ลักษณะรูปร่าง Morphology	พื้นที่ Area (ไมครอน ²)	เส้นรอบรูป Perimeter (ไมครอน)	ความกลม Circularity	วงกลมเฟอร์เรต์ Ferret Dia. (ไมครอน)	พื้นที่นูน Convex Area (ไมครอน ²)	สัดส่วนพื้นที่ Fullness Ratio	เส้นรอบรูปนูน Convex Perim. (ไมครอน)
ผิปกติ	9317.06	563.14	0.44	137.52	23019.45	1.51	7.51
SD.	17102.98	795.92	0.19	101.97	44705.30	0.28	5.62
เป็นเส้น	2337.83	285.55	0.20	121.72	20902.70	3.14	6.68
SD.	4306.25	255.24	0.08	108.62	37494.77	0.71	5.96
ทรงกลม	330.03	66.44	0.89	21.38	377.15	1.07	1.17
SD.	149.44	15.82	0.02	4.93	164.13	0.02	0.27

ตารางที่ 4-2 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอ

ลักษณะพื้นผิว Textures	โมเมนต์เชิงมุม อันดับสอง (ASM)	คอนทราสต์ (Contrast)	ความเกี่ยวพันกัน (Correlation)	โมเมนต์ความ แตกต่างย้อนกลับ (IDM)	เอนโทรปี (Entropy)
หยาบ	-0.0480	7.3143	0.0022	-0.0186	0.2919
SD.	0.0268	4.6100	0.0014	0.0115	0.1612
เรียบ	-0.0130	3.1161	0.0045	-0.0048	0.0818
SD.	0.0067	2.5862	0.0013	0.0025	0.0414
รอยขีดยาว	-0.1766	42.1366	0.0015	-0.0832	1.1383
SD.	0.1563	51.2410	0.0012	0.0799	1.0055

ตารางที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ลักษณะสีอนุภาคการสีกหรือ

ลักษณะสี Color	สีล้วน (Hue) (0-360 องศา)	ความอิ่มตัวสี (Saturation) (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้นสี (Intensity) (เปอร์เซ็นต์)	ความสว่าง (Luminance) (0 ถึง 100)	เอสตาร์ (a*) (-120 ถึง 120)	บีสตาร์ (b*) (-120 ถึง 120)
ผิวไหม้	248	41	39	31	11	-12
SD.	90	26	17	16	10	15
สนิมดำ	169	17	14	12	1	-1
SD.	107	10	5	6	2	4
ทองแดง	32	66	71	48	41	33
SD.	88	16	13	8	13	15
สนิมแดง	27	52	67	56	16	30
SD.	5	11	12	10	4	8
เหล็ก	46	16	64	64	1	9
SD.	33	11	12	12	3	6

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

การสกัดค่าเชิงตัวของอนุภาคการสีกหรือด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นแนวทางในการบ่งชี้ชนิดของอนุภาคการสีกหรือแทนการตรวจพินิจด้วยสายตาของมนุษย์ จากตัวอย่างอนุภาคการสีกหรือที่ได้จากการทดลองและตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรและค่าเชิงตัวเลขที่ได้มีความสำคัญในการแยกชนิดของอนุภาคการสีกหรือตามลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว ลักษณะสีของอนุภาคการสีกหรือ

จากผลการทดลองด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ สามารถอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 จากการทดลองโดยการจำลองกลไกการสีกหรือแบบต่างๆ ด้วยเครื่องทดสอบการสีกหรือแบบพินออนดิกส์ พบว่าแต่ละกลไกการสีกหรือเกิดอนุภาคการสีกหรือที่มีลักษณะพื้นผิวและรูปร่างที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ความรุนแรงของการสีกหรือที่เกิดขึ้นทำให้อนุภาคการสีกหรือมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย

5.1.2 กลไกการสีกหรือแบบยึดติดเนื่องจากการลื่นไถล อนุภาคการสีกหรือจากการยึดติดเกิดขึ้นจากการใช้ภาระสูง ในสภาวะขาดสารหล่อลื่นและสภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารีที่ใช้เวลานานในการรับภาระ อนุภาคการสีกหรือจากสภาวะขาดสารหล่อลื่นเป็นการสีกหรือแบบรุนแรง มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่อย่างเห็นได้ชัดที่ผิวหน้ามีรอยไหม้และมีรอยขีดยาวขนานไปตามแนวการเคลื่อนที่ ส่วนการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารีที่มีเวลานานในการรับภาระ อนุภาคการสีกหรือมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็กซึ่งมองดูผิวเผินอาจเป็นการสีกหรือแบบขีดขีดได้เนื่องจากมีรูปร่างคล้ายกับเป็นเส้น แต่การพิจารณาผิวหน้าพบว่ามีความยาวขนานไปตามแนวการเคลื่อนที่ ทำให้พิจารณาได้ว่าเป็นการสีกหรือจากการยึดติดแบบรุนแรง บางส่วนมีอนุภาคการสีกหรือแบบขีดขีดปะปนด้วย ส่วนในสภาวะการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารีที่มีเวลารับภาระน้อยเกิดกลไกการสีกหรือแบบขีดขีด พบอนุภาคการสีกหรือมีลักษณะเป็นเส้นคล้ายเศษกลิ้ง ที่ผิวหน้ามีความเรียบกว่าอนุภาคการสีกหรือแบบยึดติด

5.1.3 การวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพทางคอมพิวเตอร์เพื่อแยกรูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือประเภทต่างๆ โดยการแบ่งลักษณะพิจารณาเป็นสามลักษณะ ได้แก่ ลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว ลักษณะสี เป็นแนวทางในการพิจารณาความแตกต่างของรูปลักษณะอนุภาคการสีกหรือซึ่งจะนำไปสู่กลไกการสีกหรือที่เกิดขึ้นกับวัสดุชิ้นส่วนเครื่องกล จากการวิเคราะห์อนุภาคการสีกหรือ สามารถสกัดค่าพารามิเตอร์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-8 ค่าพารามิเตอร์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 ค่าพารามิเตอร์ลักษณะสีอนุภาคการสีกหรือ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10

5.2 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดสามารถสรุปผลๆได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบการลิกหรือพบว่า กลไกการลิกหรือแต่ละชนิดจะเกิดลักษณะอนุภาคการลิกหรือที่แตกต่างกันไป โดยที่กลไกการลิกหรือแบบยึดติดด้วยการลื่นไถลจะก่อให้เกิดอนุภาคการลิกหรือที่มีลักษณะเป็นแผ่น ถ้าหากการลิกหรือมีความรุนแรงจะมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ ที่ผิวหน้ามีรอยขีดยาวขนานไปตามแนวการเคลื่อนที่และมีรอยไหม้เนื่องจากความร้อนสูง ส่วนกลไกการลิกหรือแบบขูดขีดจะก่อให้เกิดอนุภาคการลิกหรือขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเส้นคล้ายเศษกลิ้ง มีลักษณะผิวหน้าที่ค่อนข้างเรียบ

5.2.2 การวิเคราะห์อนุภาคการลิกหรือด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพทางคอมพิวเตอร์เพื่อแยกรูปร่างลักษณะอนุภาคการลิกหรือประเภทต่างๆ ด้วยค่าเชิงตัวเลข จากนั้นพิจารณากลุ่มหรือชนิดของอนุภาคการลิกหรือด้วยวิธีทางด้านสถิติหลายตัวแปรหรือวิธีการสอนให้เรียนรู้จำด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเป็นวิธีที่สามารถกระทำเพื่อทดแทนการพิจารณาด้วยตัวบุคคลซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยสายตาจากประสบการณ์

การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลขที่แสดงถึงความแตกต่างหรือการแยกชนิดด้วยวิธีการทางสถิติหลายตัวแปรเปรียบเทียบกับสมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยีที่ได้ตั้งไว้ก่อนหน้านี้ ในวิธีการจัดกลุ่ม (CA:Cluster Analysis) ได้ผลการวิเคราะห์จัดกลุ่มที่ถูกต้องจากตัวอย่างที่ได้จากการทดลองของกลุ่มรูปร่างที่เป็นเส้นได้ผลความถูกต้องประมาณ 96.30 เปอร์เซนต์ การจัดกลุ่มรูปร่างที่ผิดปกติได้ผลความถูกต้องประมาณ 92.10 เปอร์เซนต์ รูปร่างทรงกลมซึ่งเป็นอนุภาคการลิกหรือจากกลไกการลิกหรือแบบล้าตัว การทดลองจำลองกลไกการลิกหรือประเภทนี้ทำได้ยาก และต้องใช้เวลาอย่างมากจึงไม่สามารถทำได้ในงานวิจัยนี้แต่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์จัดกลุ่มที่ถูกต้องจากตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมของกลุ่มรูปร่างที่เป็นเส้นได้ผลความถูกต้องประมาณ 100 เปอร์เซนต์ การจัดกลุ่มรูปร่างที่ผิดปกติ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 96 เปอร์เซนต์ การจัดกลุ่มรูปร่างทรงกลม ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ (ภาพที่ 4-10) ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มลักษณะพื้นผิว แบ่งเป็น การจัดกลุ่มพื้นผิวหยาบ กลุ่มพื้นผิวเรียบ กลุ่มพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว ตามสมมุติฐานจากการตรวจพินิจโดยผู้เชี่ยวชาญทางโทรโบลยีเปรียบเทียบกับวิธีการจัดกลุ่ม (CA) ไม่สามารถจัดกลุ่มแยกชนิดของลักษณะพื้นผิวได้อย่างถูกต้อง เนื่องมาจากค่าเชิงตัวเลขที่มาจากการสกัดค่าด้วยวิธี GLCM ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกลุ่มอยู่ในค่าระดับหลายจุดทศนิยม ทำให้วิธีการนี้ไม่สามารถแยกกลุ่มได้อย่างถูกต้อง ส่วนผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มลักษณะสีอนุภาคที่มาจากการทดลอง แบ่งเป็น การจัดกลุ่มสีทองแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 77.78 เปอร์เซนต์ การจัดกลุ่มสีผิวไหม้ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 57.90 เปอร์เซนต์ การจัดกลุ่มสีสนิมแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 73.33 เปอร์เซนต์ การจัดกลุ่มสีของเหล็ก ได้ผลความถูกต้องประมาณ 76.67 เปอร์เซนต์ กลุ่มสีสนิมดำซึ่งเป็นอนุภาคการลิกหรือจากการเกิดออกไซด์เนื่องจากความร้อนสูง ของโลหะกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก การทดลองจำลองการลิกหรือประเภทนี้ทำได้ยาก และต้องใช้เวลาอย่างมากจึงไม่สามารถทำได้ในงานวิจัยนี้แต่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักร

อุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มลักษณะสีของภาคที่เป็นตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม แบ่งเป็น การจัดกลุ่มสีทองแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ การจัดกลุ่มสีผิวไหม้ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 69.05 เปอร์เซ็นต์ การจัดกลุ่มสีสนิมแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 77.28 เปอร์เซ็นต์ การจัดกลุ่มสีของเหล็ก ได้ผลความถูกต้องประมาณ 82.76 เปอร์เซ็นต์ การจัดกลุ่มสีสนิมดำ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 55.56 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4-11)

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีการทางสถิติหลายตัวแปรด้วยวิธีการจำแนกกลุ่ม (DA:Discriminant Analysis) ซึ่งตัวแปรที่ไม่สามารถนำมาช่วยในการตัดสินใจเนื่องจากมีความสัมพันธ์ที่สูงมากกว่าตัวแปรอื่นคือ ตัวแปรเส้นรอบรูปนูน (Convex Perimeter) ในการจำแนกกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสีกหรือได้ผลการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มที่ถูกต้องจากตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง ของกลุ่มรูปร่างที่เป็นเส้น ได้ผลความถูกต้องประมาณ 96.30 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มรูปร่างที่ผิดปกติ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 84.21 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างทรงกลมซึ่งเป็นอนุภาคการสีกหรือจากกลไกการสีกหรือแบบลำตัว การทดลองจำลองกลไกการสีกหรือประเภทนี้ทำได้ยาก และต้องใช้เวลาานมากจึงไม่สามารถทำได้ในงานวิจัยนี้ แต่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มที่ถูกต้องจากตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมของกลุ่มรูปร่างที่เป็นเส้นได้ผลความถูกต้องประมาณ 88.46 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มรูปร่างที่ผิดปกติ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 85.33 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มรูปร่างทรงกลม ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4-12) ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มลักษณะพื้นผิวจากตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง แบ่งเป็น การจำแนกกลุ่มพื้นผิวหยาบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มพื้นผิวเรียบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 94.74 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว ได้ผลความถูกต้องประมาณ 43.75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มลักษณะพื้นผิวจากตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม แบ่งเป็น การจำแนกกลุ่มพื้นผิวหยาบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 90.32 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มพื้นผิวเรียบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 78.43 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว ได้ผลความถูกต้องประมาณ 73.68 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4-13) ส่วนผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มลักษณะสีของภาคที่มาจากการทดลอง แบ่งเป็น การจำแนกกลุ่มสีทองแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 85.71 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มสีผิวไหม้ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 83.33 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มสีสนิมแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มสีของเหล็ก ได้ผลความถูกต้องประมาณ 96.67 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มสีสนิมดำซึ่งเป็นอนุภาคการสีกหรือจากการเกิดออกไซด์เนื่องจากความร้อนสูง ของโลหะกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก การทดลองจำลองการสีกหรือประเภทนี้ทำได้ยาก และต้องใช้เวลาานมากจึงไม่สามารถทำได้ในงานวิจัยนี้แต่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มลักษณะสีของภาคที่เป็นตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม แบ่งเป็น การจำแนกกลุ่มสีทองแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 87.50 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มสีผิวไหม้ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มสีสนิมแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ การจำแนกกลุ่มสีของ

เหล็ก ได้ผลความถูกต้องประมาณ 89.66 เปอร์เซนต์ การจำแนกกลุ่มสีสนิมดำ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 96.30 เปอร์เซนต์ (ภาพที่ 4-14)

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมด้วยวิธีมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนแบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back-Propagation) ในการแยกกลุ่มรูปร่างอนุภาคการสึกหรอซึ่งใช้การสอนและค้นหาคำตอบที่เหมาะสมห้าพันรอบ (epochs) ได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองน้อยที่สุด (MSE) ประมาณ 0.13 ได้ผลการวิเคราะห์แยกกลุ่มที่ถูกต้องของตัวอย่างที่มาจากการทดลอง กลุ่มรูปร่างที่เป็นเส้น ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มรูปร่างที่ผิดปกติ ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ รูปร่างทรงกลมซึ่งเป็นอนุภาคการสึกหรอจากกลไกการสึกหรอแบบล้าตัว การทดลองจำลองกลไกการสึกหรอประเภทนี้ทำได้ยาก และต้องใช้เวลานานมากจึงไม่สามารถทำได้ในงานวิจัยนี้แต่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์แยกกลุ่มที่ถูกต้องของตัวอย่างที่มาจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมของกลุ่มรูปร่างที่เป็นเส้นได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มรูปร่างที่ผิดปกติ ได้ผลความถูกต้อง 96.88 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มรูปร่างทรงกลม ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ (ภาพที่ 4-15) ในส่วนผลการวิเคราะห์การแยกกลุ่มลักษณะพื้นผิวด้วยการสอนและค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเจ็ดพันรอบ (epochs) ได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองน้อยที่สุด (MSE) ประมาณ 0.09 ได้ผลการวิเคราะห์แยกกลุ่มที่ถูกต้องของตัวอย่างที่มาจากการทดลอง แบ่งเป็นการแยกกลุ่มพื้นผิวหยาบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 71.43 เปอร์เซนต์ กลุ่มพื้นผิวเรียบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 100 เปอร์เซนต์ กลุ่มพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว ได้ผลความถูกต้องประมาณ 57.14 เปอร์เซนต์ ผลการวิเคราะห์แยกกลุ่มที่ถูกต้องของตัวอย่างที่มาจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมแบ่งเป็นการแยกกลุ่มพื้นผิวหยาบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 90 เปอร์เซนต์ กลุ่มพื้นผิวเรียบ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 92.10 เปอร์เซนต์ กลุ่มพื้นผิวเป็นรอยขีดยาว ได้ผลความถูกต้องประมาณ 71.43 เปอร์เซนต์ (ภาพที่ 4-16) ส่วนผลการวิเคราะห์การแยกกลุ่มลักษณะสีอนุภาคด้วยการสอนและค้นหาคำตอบที่เหมาะสมห้าพันรอบ (epochs) ได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองน้อยที่สุด (MSE) ประมาณ 0.02 ได้ผลการวิเคราะห์แยกกลุ่มที่ถูกต้องของตัวอย่างที่มาจากการทดลอง แบ่งเป็นการแยกกลุ่มสีทองแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 83.33 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มสีผิวไหม้ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 66.37 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มสีสนิมแดง ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มสีของเหล็ก ได้ผลความถูกต้องประมาณ 92.31 เปอร์เซนต์ กลุ่มสีสนิมดำซึ่งเป็นอนุภาคการสึกหรอจากการเกิดออกไซด์เนื่องจากความร้อนสูง ของโลหะกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก การทดลองจำลองการสึกหรอประเภทนี้ทำได้ยาก และต้องใช้เวลานานมากจึงไม่สามารถทำได้ในงานวิจัยนี้แต่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์การแยกกลุ่มลักษณะสีอนุภาคที่เป็นตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม แบ่งเป็น การแยกกลุ่มสีทองแดง ได้ผลความถูกต้องประมาณ 80 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มสีผิวไหม้ ได้ผลความถูกต้องประมาณ 93.75 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มสีสนิมแดง ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ การ

แยกกลุ่มสีของเหล็ก ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ การแยกกลุ่มสีสนิมดำ ได้ผลความถูกต้อง 100 เปอร์เซนต์ (ภาพที่ 4-17)

การวิเคราะห์ค่าเชิงตัวเลขของลักษณะอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีทางด้านสถิติหลายตัวแปรและวิธีโครงข่ายประสาทเทียมจากตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอที่ได้จากการทดลองและจากตัวอย่างจริงจากเครื่องจักรอุตสาหกรรมได้ผลความถูกต้องโดยรวมดังนี้

การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสึกหรอได้ผลความถูกต้องของวิธีการจัดกลุ่ม (CA:Cluster Analysis) ประมาณ 96.22 เปอร์เซนต์ วิธีการจำแนกกลุ่ม (DA:Discriminant Analysis) ประมาณ 88.65 เปอร์เซนต์ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ประมาณ 98.81 เปอร์เซนต์

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสึกหรอได้ผลความถูกต้องของวิธีการจัดกลุ่ม (CA:Cluster Analysis) ไม่สามารถจัดกลุ่มได้อย่างถูกต้องด้วยค่าที่สกัดจากวิธี GLCM วิธีการจำแนกกลุ่ม (DA:Discriminant Analysis) ประมาณ 82.16 เปอร์เซนต์ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ประมาณ 86.90 เปอร์เซนต์

การวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาคการสึกหรอได้ผลความถูกต้องของวิธีการจัดกลุ่ม (CA:Cluster Analysis) ประมาณ 72.22 เปอร์เซนต์ วิธีการจำแนกกลุ่ม(DA:Discriminant Analysis) ประมาณ 91.35 เปอร์เซนต์ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ประมาณ 93.67 เปอร์เซนต์

การแยกชนิดอนุภาคการสึกหรอตามลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และลักษณะสีของอนุภาคด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมได้ผลความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การทดลองการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบพินออนดิสก์ซึ่งมีการรับภาระเป็นจุด (Formal contact) ทำให้การจำลองการสึกหรอประเภทการยึดติดแบบรุนแรง (Severe sliding wear) ที่ได้ไม่ค่อยใกล้เคียงกับอนุภาคการสึกหรอที่มาจากเครื่องจักรอุตสาหกรรม ควรต้องเปลี่ยนวิธีการทดสอบเป็นแบบรับภาระเป็นพื้นที่ (Conformal contact) เช่นเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนดิสก์เอจ (Block on a rotating disc edge) ฯลฯ

5.3.2 ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยวิธี GLCM ทำให้การแบ่งแยกชนิดอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีการจัดกลุ่ม CA ไม่สามารถแยกได้อย่างถูกต้อง ควรใช้การวิเคราะห์พื้นผิวแบบอื่น เช่นวิธีการวิเคราะห์แยกถี่เงา (Spectral Analysis) ฯลฯ

5.3.3 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการสึกหรอแบบขูดขีด โดยคำนึงถึงผลกระทบจากสิ่งสกปรก ขนาด ปริมาณของสิ่งสกปรก ที่มีผลต่อการสึกหรอกับชิ้นส่วนเครื่องกล

5.3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอเพิ่มเติมจากจำนวนในการวิจัยนี้เพื่อให้วิธีการวิเคราะห์ทางด้านสถิติและวิธีโครงข่ายประสาทเทียม มีความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะวิธีการวิเคราะห์ด้วย

โครงข่ายประสาทเทียมต้องใช้ข้อมูลของตัวอย่างในการสอนให้รู้จำเป็นจำนวนมาก

5.3.5 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในกลุ่มอนุภาคการสึกหรอกลุ่มรูปร่างปกติ (Regular Shape) ด้วยค่าเชิงตัวเลขของวิธีการวิเคราะห์ส่วนโค้งที่ขอบอนุภาค (Curvature Analysis)

5.3.6 ควรทำการศึกษาวิธีการสกัดค่าเชิงตัวเลขของลักษณะพื้นผิวด้วยวิธีการอื่นๆเพื่อให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

5.3.7 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในการรวมความสัมพันธ์ของลักษณะรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และลักษณะสีของอนุภาคเข้าด้วยกันเพื่อนำไปสู่การตัดสินใจพิจารณากลไกการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องกล ด้วยวิธีการระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) หรือวิธีการอื่น

5.3.8 ควรทำการศึกษาตัวแปรสัดส่วนความหนาของอนุภาค (Thickness ratio) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะอนุภาคการสึกหรอจากการล้าตัวแบบเป็นก้อน (Fatigue Chunk Wear) ด้วยหลักการวิเคราะห์ภาพสามมิติ (3-Dimensions Image Analysis)

เอกสารอ้างอิง

1. T. B. Kirk, et al. "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis." Wear. 181-183 (1995) : 717-722.
2. Kun, Xu., A. R. Luxmoore and Farzin, Deriva. "Comparison of Shape Features for the Classification of Wear." Engng Applic. Artif. Intell. 10, No.5 (1997) : 485-493.
3. Z. Peng. and T. B. Kirk. "Computer image analysis of wear particles in three - dimensions for machine condition monitoring." Wear. 223 (1998) : 157-166.
4. Akohiko, Umeda., Joichi, Sugimura. and Yuji, Yamamoto. "Characterization of Wear Particles and Their Relations with Sliding Conditions." Wear. 216 (1998) : 220-228.
5. Unchung, Cho and Jonh, A. Tichy. "Quantitative Correlation of Wear Debris Morphology : Grouping and Classification." Tribology International. 33 (2000) : 461-467.
6. N. K. Myshkin, et al. "The Use of Color in Wear Debris Analysis" Wear. 251 (2001) : 1218-1226.
7. M. S. Laghari. "Recognition of Texture Types of Wear Particles." Neural Comput & Applic. 12 (2003) : 18-25.
8. N. K. Myshkin., L. Markova. and A. Grigoriev. "Condition Monitoring and Predictive Analysis." Practicing Oil Analysis Magazine. March (2005)
9. Roylance, B. J. and Trevor, M. Hunt. The Wear Debris Analysis Handbook. First Edition. Oxford : Coxmoor Publishing Company, 1999.
10. Trevor, M. Hunt. Handbook of wear debris analysis and particle detection in liquids. Essex : Elsevier Science Publishers Ltd, 1993.
11. Raadnui, S. "Utilization of Multivariate Statistical Data Analysis Technique in Tribological Studies." 3rd Conference on statistical Computing of the Asian Regional Section, Manila, Philippines, 1998.
12. Raadnui, S. and Roylance, B. J. "Classification of wear particle shape." Lubrication Engineering. 51, No.5 (1995) : 432-437.
13. Trevor, M. Hunt. Condition Monitoring of Mechanical and Hydraulic Plant : a concise introduction and guide. London : Chapman & Hall, 1996.

14. Drew, Troyer. and Jim, Fitch. Oil Analysis Basics. Oklahoma : Noria Corporation, c1999.
15. E. Richard Booser. Tribology Data Handbook. Florida : CRC Press LLC, 1997.
16. Daniel, P. Anderson. Wear Particle Atlas (Revised). Ohio : Predict Technologies, 1991
17. Elliot, Duff. Wear Particle Characterisation. CRC for Mining Technology and Equipment ACARP REPORT (C3050). Queensland : Report No.ME4-97/1 (1998)
18. B. J. Roylance, et al. "Computer Aided Vision Engineering Quantification of Wear Particle Morphology." Lubrication Engineering. 50, No.2 (1994) : 111-116.
19. G. W. Stachowiak. and Andrew, W. Batchelor. Engineering Tribology. Second Edition. Massachusetts : Butterworth-Heinemann, 2001.
20. Bharat, Bhushan. Introduction to Tribology. New York : John Wiley & Sons Inc, 2002.
21. Mervin, H. John. and Douglas, Scott. Industrial Tribology. Amsterdam : Elsevier Science Publishers Ltd, 1991.
22. U. J. Möller. and U. Boor. Lubricants in Operation. Translated by A. R. Lansdown. Suffolk : the Ipswich Book Company, 1996.
23. McDonald, T. and Chen, Y. R. "Application of Morphological Image Processing in Agriculture." Transaction of ASAE. Vol.33 (1989) : 1345-1351.
24. L. Da. F. Costa. and R. M. Cesar. Jr. Shape Analysis and Classification. Florida : CRC Press LLC, 2001.
25. Wayne, Rasban. "Image processing in Java." [Documentations] 2003 Sep [cited 2005 May 19]. Available from : URL : <http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/index.html>
26. Walker, R. F. Adaptive Multi-Scale Texture Analysis with Application to Automated Cytology. Ph.D.Thesis, Faculty of Engineering, University of Queensland, 1997.
27. Mryka, H. Beyer. "The GLCM Tutorial." [Tutorial Home Page] 2005 Oct [cited 2005 Dec 22]. Available from : URL : <http://www.fp.ucalgary.ca/mhallbey/tutorial.htm>
28. R. C. Gonzalez. and R. E. Wood. Digital Image Processing. Second Edition. New Jersey : Prentice-Hall Inc, 2002.
29. William, R. Dillon. and Matthew, Goldstein. Multivariate Analysis Methods and Applications. New York : John Wiley & Sons, 1984.
30. Richard, A. Johnson. and Dean, W. Wichern. Applied Multivariate Statistical Analysis. Fifth Edition. New Jersey : Prentice-Hall Inc, 2002.

31. Aleksander, I. and Morton, H. An Introduction to Neural Computing. London : Chapman and Hall, 1990.
32. Haykin, S. Neural Network : A Comprehensive Foundation. New York : Mcmillan, 1994.
33. Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L. Parallel Distributed Processing : Explorations in the Microstructure of Cognition. Massachusetts : MIT Press, 1986.
34. Ripley, B. D. Pattern Recognition and Neural Networks. Second Edition. Cambridge : University of Oxford University Press, 1996.

ภาคผนวก ก

มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง



Designation: G 99 – 95a (Reapproved 2000)¹

Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus¹

This standard is intended to be the first design for G 99, then to be revised. Study of the method does not indicate the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted number indicates an editorial change to the text of the standard is in progress.

¹ Note: Editorial corrections were made throughout in May 2000.

1. Scope

1.1 This test method describes a laboratory procedure for determining the wear of materials during sliding using a pin-on-disk apparatus. Materials are tested in pairs under nominally non-abrasive conditions. The principal areas of experimental attention in using this type of apparatus to measure wear are described. The coefficient of friction may also be determined.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

E 112 Practice for Guide of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process²

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods³

E 178 Practice for Dealing with Outlying Observations⁴

G 40 Terminology Relating to Wear and Friction⁵

2.2 *Other Standards:*⁶

ISO 50824 Testing of Friction and Wear

3. Summary of Test Method

3.1 For the pin-on-disk wear test, two specimens are required. One, a pin with a radius of 1 mm, is positioned perpendicular to the other, usually a flat circular disk. A ball, rigidly held, is often used as the pin specimen. The test machine causes either the disk specimen or the pin specimen to revolve about the disk center. In either case, the sliding path is a circle on the disk surface. The plane of the disk may be oriented

either horizontally or vertically.

Notes 1—Wear may be measured by different methods.

3.1.1 The pin specimen is pressed against the disk at a specified load usually by means of air, spring, or overbalanced weights. Other loading methods have been used, such as, hydraulic or pneumatic.

Notes 2—Wear may be measured by different loading methods.

3.2 Wear results are reported as volume loss in cubic millimetres for the pin and the disk separately. When two different materials are tested, it is recommended that each material be tested in both the pin and disk positions.

3.3 The amount of wear is determined by measuring approximate linear dimensions of both specimens before and after the test, or by weighing both specimens before and after the test. If linear measures of wear are used, the length change or shape change of the pin, and the depth or shape change of the disk wear track (in millimetres) are determined by any suitable metrological technique, such as electronic distance gaging or stylus profiling. Linear measures of wear are converted to wear volume (in cubic millimetres) by using appropriate geometric relations. Linear measures of wear are used frequently in mass loss since mass loss is often too small to measure precisely. If loss of mass is measured, the mass loss value is converted to volume loss (in cubic millimetres) using an appropriate value for the specimen density.

3.4 Wear results are usually obtained by conducting a test for a selected sliding distance and for selected values of load and speed. One set of test conditions that was used in an interlaboratory measurement series is given in Table 1 and Table 2 as a guide. Other test conditions may be selected depending on the purpose of the test.

3.5 Wear results may in some cases be reported as plots of wear volume versus sliding distance using different specimens for different distances. Such plots may display non-linear relationships between wear volume and distance over certain portions of the total sliding distance, and linear relationships over other portions. Causes for such differing relationships include initial “break-in” processes, transitions between regions of different dominant wear mechanisms, etc. The extent of such non-linear periods depends on the details of the test system, materials, and test conditions.

3.6 It is not recommended that continuous wear depth data

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G03 on Wear and Friction and is the direct responsibility of Subcommittee G03.43 on Pin-on-Disk Testing.

Current edition approved June 1, 1995. Published as G 99-95a and January 1996. Original published as G 99-95 and previous editions are void.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.03.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.03.

⁴ Available from: Data Value GmbH, Burggasse 6, 1000 Berlin 20, Germany.



G 99

TABLE 1 Characteristics of the Interlaboratory Wear Test Specimens

NOTE 1—See Note 4 in 10.4 for information.

	Composition (weight%)	Microstructure	Hardness (HV 10)	Roughness ^a	
				R_a (mean) (μm)	R_z (mean) (μm)
Steel ball (100 Cr6) (AISI 52 100) ^b Diameter 10 mm	1.35 to 1.65 Cr ← 0.95 to 1.10 C 0.15 to 0.35 Si 0.25 to 0.45 Mn ← <0.030 P ← <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	838 ± 21	0.100	0.010
Steel disc (100 Cr6) (AISI 52 100) ^c Diameter 40 mm	← <0.030 P ← <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	852 ± 14	0.062	0.113
Alumina ball, diameter = 10 mm ^d	← 95 % Al ₂ O ₃ (with additives of TiO ₂ , MgO and ZnO)	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1610 ± 101 (HV 0.2)	1.369	0.123
Alumina disc, diameter = 40.6 mm ^d	← 95 % Al ₂ O ₃ (with additives of TiO ₂ , MgO and ZnO)	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1599 ± 144 (HV 0.2)	0.968	0.041

^a Measured by stylus profilometry. R_z is maximum peak-to-valley roughness. R_a is arithmetic average roughness.^b Standard ball-bearing balls (SKF).^c Standard spacers for thrust bearings (INA).^d Manufactured by Compagnie Industrielle des Ceramiques Electroniques, France.TABLE 2 Results of the Interlaboratory Tests^a

NOTE 1—See Note 4 in 10.4.

NOTE 2—Numbers in parentheses refer to all data received in the tests. In accordance with Practice E 178, outlier data values were identified in some cases and discarded, resulting in the numbers without parentheses. The differences are seen to be small.

NOTE 3—Values preceded by ± are one standard deviation.

NOTE 4—Between eleven and twenty laboratories provided these data.

NOTE 5—Calculated quantities (for example, wear volume) are given as mean values only.

NOTE 6—Values labeled "NM" were found to be smaller than the reproducible limit of measurement.

NOTE 7—A similar compilation of test data is given in DIN-50324.

Results (ball) (disk)	Specimen Pairs			
	Steel-steel	Alumina-steel	Steel-alumina	Alumina-alumina
Ball wear scar diameter (mm)	2.11 ± 0.27 (2.11 ± 0.27)	NM	2.06 ± 0.35 (2.03 ± 0.41)	0.3 ± 0.06 (0.3 ± 0.06)
Ball wear volume (10 ⁻³ mm ³)	198 (198)	---	106 (169)	0.08 (0.08)
Number of values	102 (102)	---	60 (64)	56 (59)
Disk wear scar width (mm)	NM	0.64 ± 0.12 (0.64 ± 0.12)	NM	NM
Disk wear volume (10 ⁻² mm ³)	---	480 (480)	---	---
Number of values	---	60 (60)	---	---
Friction coefficient	0.60 ± 0.11	0.76 ± 0.14	0.60 ± 0.12	0.41 ± 0.08
Number of values	109	75	64	76

^a Test conditions: $F = 10$ N; $v = 0.1$ m s⁻¹; $T = 23^\circ$ C; relative humidity range 12 to 78 %; laboratory air; sliding distance 1000 m; wear track (nominal) diameter = 32 mm; materials: steel = AISI 52 100; and alumina = α-Al₂O₃.

obtained from position-sensing gages be used because of the complicated effects of wear debris and transfer films present in the contact gap, and interferences from thermal expansion or contraction.

4. Significance and Use

4.1 The amount of wear in any system will, in general, depend upon the number of system factors such as the applied load, machine characteristics, sliding speed, sliding distance, the environment, and the material properties. The value of any wear test method lies in predicting the relative ranking of material combinations. Since the pin-on-disk test method does not attempt to duplicate all the conditions that may be experienced in service (for example; lubrication, load, pressure, contact geometry, removal of wear debris, and presence of corrosive environment), there is no assurance that the test will predict the wear rate of a given material under conditions differing from those in the test.

5. Apparatus

5.1 *General Description*—Fig. 1 shows a schematic drawing of a typical pin-on-disk wear test system, and photographs of two differently designed apparatuses.⁵ One type of typical system consists of a driven spindle and chuck for holding the revolving disk, a lever-arm device to hold the pin, and attachments to allow the pin specimen to be forced against the revolving disk specimen with a controlled load. Another type of system loads a pin revolving about the disk center against a stationary disk. In any case the wear track on the disk is a

⁵ A number of other reported designs for pin-on-disk systems are given in "A Catalog of Friction and Wear Devices," American Society of Lubrication Engineers (1975). The sole source of supply of commercially built machines known to the committee at this time is Falex Corp., 1020 Airpark Dr., Sugar Grove, IL 60554. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, ¹ which you may attend.

G 99

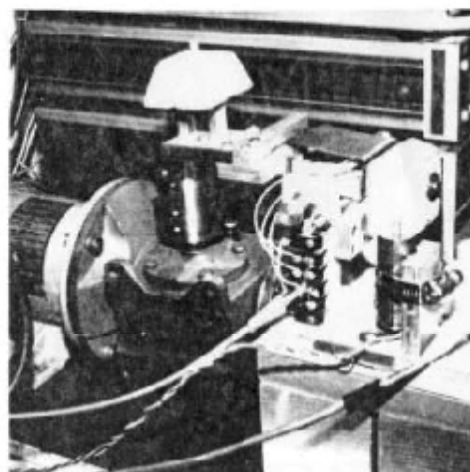
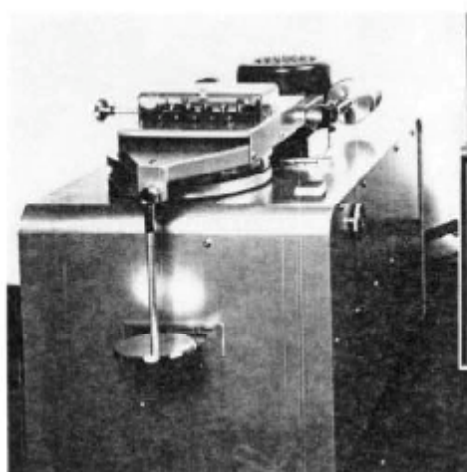
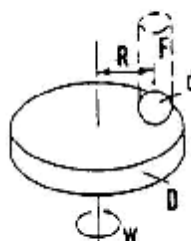


FIG. 1 (a) Schematic of pin-on-disk wear test system. (b) Photographs of two different designs

circle, involving multiple wear passes on the same track. The system may have a friction force measuring system, for example, a load cell, that allows the coefficient of friction to be determined.

5.2 Motor Drive.—A variable speed motor, capable of maintaining constant speed ($\pm 1\%$ of rated full load motor speed) under load is required. The motor should be mounted in such a manner that its vibration does not affect the test. Rotating speeds are typically in the range 0.3 to 3 rad/s (30 to 600 rpm).

5.3 Feedback Control.—The machine shall be equipped with a revolution counter or its equivalent that will record the number of disk revolutions, and preferably have the ability to shut off the machine after a pre-selected number of revolutions.

5.4 Pin-Governor, Motor and Lever Arm.—In one typical system, the stationary specimen holder is attached to a lever arm that has a pivot. Adding weights, as one option of loading, provides a test force proportional to the mass of the weights applied. Ideally, the pivot of the arm should be located in the plane of the wearing contact to avoid extraneous loading forces

due to the sliding friction. The pin holder and arm must be of substantial construction to reduce vibrational motion during the test.

5.5 Wear Measuring System.—Instruments to obtain linear measures of wear should have a sensitivity of $2.5\ \mu\text{m}$ or better. Any balance used to measure the mass loss of the test specimen shall have a sensitivity of $0.1\ \mu\text{g}$ or better; in low wear situations greater sensitivity may be needed.

6. Test Specimens and Sample Preparation

6.1 Materials.—This test method may be applied to a variety of materials. The only requirement is that specimens having the specified dimensions can be prepared and that they will withstand the stresses imposed during the test without failure or excessive flexure. The materials being tested shall be described by dimensions, surface finish, material type, form, composition, microstructure, processing treatments, and mechanical hardness (if appropriate).

6.2 Test Specimens.—The typical pin specimen is cylindrical or spherical in shape. Typical cylindrical or spherical pin



G 99

specimen diameters range from 2 to 10 mm. The typical disk specimen diameters range from 30 to 100 mm and have a thickness in the range of 2 to 10 mm. Specimen dimensions used in an interlaboratory test with pin-on-disk systems are given in Table 1.

6.3 *Surface Finish*—A ground surface roughness of 0.8 μm (32 $\mu\text{in.}$) arithmetic average or less is usually recommended.

NOTE 3—Rough surfaces make wear scar measurement difficult.

6.3.1 Care must be taken in surface preparation to avoid subsurface damage that alters the material significantly. Special surface preparation may be appropriate for some test programs. State the type of surface and surface preparation in the report.

7. Test Parameters

7.1 *Load*—Values of the force in Newtons at the wearing contact.

7.2 *Speed*—The relative sliding speed between the contacting surfaces in metres per second.

7.3 *Distance*—The accumulated sliding distance in meters.

7.4 *Temperature*—The temperature of one or both specimens at locations close to the wearing contact.

7.5 *Atmosphere*—The atmosphere (laboratory air, relative humidity, argon, lubricant, etc.) surrounding the wearing contact.

8. Procedure

8.1 Immediately prior to testing, and prior to measuring or weighing, clean and dry the specimens. Take care to remove all dirt and foreign matter from the specimens. Use non-chlorinated, non-film-forming cleaning agents and solvents. Dry materials with open grains to remove all traces of the cleaning fluids that may be entrapped in the material. Steel (ferromagnetic) specimens having residual magnetism should be demagnetized. Report the methods used for cleaning.

8.2 Measure appropriate specimen dimensions to the nearest 2.5 μm or weigh the specimens to the nearest 0.0001 g.

8.3 Insert the disk securely in the holding device so that the disk is fixed perpendicular ($\pm 1^\circ$) to the axis of the revolution.

8.4 Insert the pin specimen securely in its holder and, if necessary, adjust so that the specimen is perpendicular ($\pm 1^\circ$) to the disk surface when in contact, in order to maintain the necessary contact conditions.

8.5 Add the proper mass to the system lever or bale to develop the selected force pressing the pin against the disk.

8.6 Start the motor and adjust the speed to the desired value while holding the pin specimen out of contact with the disk. Stop the motor.

8.7 Set the revolution counter (or equivalent) to the desired number of revolutions.

8.8 Begin the test with the specimens in contact under load. The test is stopped when the desired number of revolutions is achieved. Tests should not be interrupted or restarted.

8.9 Remove the specimens and clean off any loose wear debris. Note the existence of features on or near the wear scar such as protrusions, displaced metal, discoloration, microcracking, or spotting.

8.10 Remeasure the specimen dimensions to the nearest 2.5 μm or reweigh the specimens to the nearest 0.0001 g, as appropriate.

8.11 Repeat the test with additional specimens to obtain sufficient data for statistically significant results.

9. Calculation and Reporting

9.1 The wear measurements should be reported as the volume loss in cubic millimetres for the pin and disk, separately.

9.1.1 Use the following equations for calculating volume losses when the pin has initially a spherical end shape of radius R and the disk is initially flat, under the conditions that only one of the two members wears significantly:

$$\text{pin (spherical end) volume loss, mm}^3 = \frac{\pi (\text{wear scar diameter, mm})^3}{64 (\text{sphere radius, mm})} \quad (1)$$

assuming that there is *no significant disk wear*. This is an approximate geometric relation that is correct to 1 % for (wear scar diameter/sphere radius) < 0.3 , and is correct to 5 % for (wear scar diameter/sphere radius) < 0.7 . The exact equation is given in Appendix X1.

$$\text{disk volume loss, mm}^3 = \frac{\pi (\text{wear track radius, mm}) (\text{track width, mm})^2}{6 (\text{sphere radius, mm})} \quad (2)$$

assuming that there is *no significant pin wear*. This is an approximate geometric relation that is correct to 1 % for (wear track width/sphere radius) < 0.3 , and is correct to 5 % for (wear track width/sphere radius) < 0.8 . The exact equation is given in Appendix X1.

9.1.2 Calculation of wear volumes for pin shapes of other geometries use the appropriate geometric relations, recognizing that assumptions regarding wear of each member may be required to justify the assumed final geometry.

9.1.3 Wear scar measurements should be done at least at two representative locations on the pin surfaces and disk surfaces, and the final results averaged.

9.1.4 In situations where both the pin and the disk wear significantly, it will be necessary to measure the wear depth profile on both members. A suitable method uses stylus profiling. Profiling is the only approach to determine the exact final shape of the wear surfaces and thereby to calculate the volume of material lost due to wear. In the case of disk wear, the average wear track profile can be integrated to obtain the track cross-section area, and multiplied by the average track length to obtain disk wear volume. In the case of pin wear, the wear scar profile can be measured in two orthogonal directions, the profile results averaged, and used in a figure-of-revolution calculated for pin wear volume.

9.1.5 While mass loss results may be used internally in laboratories to compare materials of equivalent densities, this test method reports wear as volume loss so that there is no confusion caused by variations in density. Take care to use and report the best available density value for the materials tested when calculating volume loss from measured mass loss.

9.1.6 Use the following equation for conversion of mass loss to volume loss.

$$\text{volume loss, mm}^3 = \frac{\text{mass loss, g}}{\text{density, g/cm}^3} \times 1000. \quad (3)$$



9.2 If the materials being tested exhibit considerable transfer between specimens without loss from the system, volume loss may not adequately reflect the actual amount or severity of wear. In these cases, this test method for reporting wear should not be used.

9.3 Friction coefficient (defined in Terminology C 400) should be reported when available. Describe the conditions associated with the friction measurements. For example, initial, steady-state, etc.

9.4 Adequate specification of the materials tested is important. As a minimum, the report should specify material type, form, processing treatments, surface finish, and specimen preparation procedures. If appropriate, indentation hardness should be reported.

10. Precision and Bias ⁶

10.1 The precision and bias of the measurements obtained with this test method will depend upon the test parameters chosen.

10.2 The reproducibility of repeated tests on the same material will depend upon material homogeneity, machine and material interaction, and careful adherence to the specified procedure by the machine operator.

10.3 Normal variations in the procedure will tend to reduce the accuracy of the test method as compared to the accuracy of such material property tests as hardness, density, or thermal expansion rate. Properly conducted tests should, however, maintain a within-laboratory coefficient of variation of 20 % or less for wear loss values. Table 2 contains wear data obtained

from interlaboratory tests (see Note 4). Standard deviation values are given for the measured quantities. Limits of 95 % repeatability can be obtained by multiplying these standard deviation values by the factor 2.8 $\sqrt{2}$. Reproducibility Limits between laboratories are not available but are estimated to be no as large as the repeatability limits.

10.4 No bias can be assigned to these results since there are no absolute accepted values for wear.

Note 4: The interlaboratory data given in Table 2 and Table 3 resulted through the cooperation of many one institution in several countries with the help of national representatives within the Versailles Advanced Materials and Standards (VAMAS) working party on wear test methods.⁷

10.5 In any test series, all data must be considered in the calculation, including outliers (data exceeding the obvious range); they are treated according to Practice E 178.

10.6 While two or more laboratories may develop test data that is within the acceptable coefficient of variation for their own individual test apparatus, the actual data of each laboratory may be relatively far apart. The selection of sample size and the test method for establishing the significance of the difference in averages shall be agreed upon between laboratories and shall be based on established statistical methods of Practice E 122, Practice E 177, and STP 15D.⁸

11. Keywords

11.1 ceramic wear; friction; metal wear; non-abrasive; pin-on-disk; wear

⁷ Czichos, H., Becker, S., and Lexow, J., *Wear*, Vol 114, 1987, pp 109–130 and *Wear*, Vol 118, 1987, pp 379–380.

⁸ Manual on Quality Control of Materials, ASTM STP 15D, ASTM, 1951.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. EQUATIONS

X1.1 Exact equations for determining wear volume loss are as follows for:

X1.1.1 A spherical ended pin:

$$\text{pin volume loss} = (\pi h^3 / 6) [3d^2/4 + h^2] \quad (X1.1)$$

where:

$$h = r - [(r^2 - d^2/4)^{1/2}]$$

d = wear scar diameter, and

r = pin end radius.

Assuming no significant disk wear.

X1.1.2 A disk:

$$\text{disk volume loss} = 2\pi R [r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}] \quad (X1.2)$$

where:

R = wear track radius, and

d = wear track width.

Assuming no significant pin wear.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.



ภาคผนวก ข

ข้อมูลอนุภาคการสักรอ

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลลักษณะรูปร่างอนุภาคการลิกทรอ

No.	Area (microns ²)	Perim. (microns)	Circ.	Feret. (microns)	Conv. Area (microns ²)	Fulln. Ratio	Conv. Perim. (microns)	Group
1	3921.55	313.90	0.48	103.95	3486.70	1.47	5.70	irregular
2	5734.72	362.95	0.55	129.88	13243.74	1.52	7.12	irregular
3	164.33	110.63	0.17	41.92	1380.17	2.89	2.30	elongated
4	392.01	273.26	0.07	79.78	4996.94	3.57	4.30	elongated
5	307.91	223.45	0.08	98.83	7840.26	4.96	5.41	elongated
6	19794.72	669.52	0.52	210.1	34869.05	1.32	11.52	irregular
7	2572.74	364.4	0.07	98.5	7620.13	1.72	5.40	irregular
8	6715.97	1393.3	0.04	131.1	17931.59	1.63	8.29	irregular
9	126724.18	8564.75	0.04	1191.55	1115101.56	2.97	65.35	irregular
10	101.22	92.93	0.19	34.26	921.56	3.02	1.60	elongated
11	681.94	208.58	0.12	52.98	2204.52	1.80	2.91	irregular
12	8645.14	384.37	0.57	119.08	11186.98	1.29	6.53	irregular
13	163.73	102.34	0.20	40.32	1257.89	2.73	2.19	elongated
14	12.67	32.15	0.15	14.51	135.36	3.61	0.80	elongated
15	196.33	86.72	0.55	27.13	578.58	1.72	1.46	irregular
16	2655.56	494.04	0.14	192.11	20906.10	3.30	10.54	elongated
17	21218.08	882.80	0.27	222.60	36917.08	1.35	12.21	irregular
18	32.64	45.40	0.20	20.58	332.84	3.19	1.13	elongated
19	496.83	105.31	0.52	42.85	1442.09	1.70	2.35	irregular
20	470.14	263.11	0.09	123.38	11965.82	5.04	6.77	elongated
21	7106.25	392.14	0.56	121.98	11886.03	1.28	6.69	irregular
22	94.41	64.09	0.29	23.16	421.28	2.11	1.27	elongated
23	227.13	201.92	0.07	58.71	2707.16	3.45	3.22	elongated
24	992.88	153.94	0.53	50.33	2376.42	1.55	3.02	irregular
25	569.75	243.90	0.12	55.54	2784.25	2.21	3.27	elongated
26	163.32	131.40	0.12	53.76	2711.77	4.08	3.22	elongated
27	5395.75	842.84	0.15	198.85	19513.21	1.54	8.71	irregular
28	3538.19	791.24	0.07	123.45	11969.39	1.84	6.77	irregular
29	79309.03	1290.64	0.05	542.89	231460.05	1.71	29.77	irregular
30	437.15	80.23	0.85	25.31	491.27	1.06	1.37	spherical
31	15903.47	545.69	0.59	187.13	27502.79	1.41	10.26	irregular
32	32.64	49.08	0.17	18.18	258.93	2.98	1.05	elongated
33	161.11	46.82	0.83	15.86	192.81	1.09	0.86	spherical
34	25.17	41.11	0.19	17.18	231.81	3.03	0.94	elongated
35	127.90	96.96	0.36	25.96	493.23	1.97	1.37	elongated
36	121.51	80.20	0.24	33.16	970.93	2.83	1.93	elongated
37	677.08	96.85	0.91	30.97	753.51	1.05	1.70	spherical
38	419.44	76.25	0.91	24.88	478.59	1.07	1.35	spherical

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

No.	Area (microns ²)	Perim. (microns)	Circ.	Feret. (microns)	Conv. Area (microns ²)	Fulln. Ratio	Conv. Perim. (microns)	Group
39	3903.47	296.86	0.56	85.64	6310.93	1.27	4.92	irregular
40	2531.94	201.18	0.79	63.08	3126.17	1.11	3.46	irregular
41	4117.38	281.62	0.65	66.65	7336.58	1.33	5.30	irregular
42	4531	75.00	0.11	32.22	815.34	4.07	1.77	elongated
43	8403.33	449.04	0.53	161.93	20594.16	1.56	8.60	irregular
44	15881.94	975.06	0.21	387.98	118224.75	2.73	21.25	elongated
45	3133.37	88.88	0.89	21.09	349.54	1.06	1.16	spherical
46	2647.92	222.20	0.57	71.01	3960.31	1.22	3.85	irregular
47	3045.14	249.10	0.62	62.09	5292.62	1.32	4.50	irregular
48	26303.47	793.54	0.52	223.10	39092.10	1.22	12.24	irregular
49	3581.94	299.25	0.50	83.35	5456.34	1.23	4.57	irregular
50	318.23	74.78	0.72	27.13	578.38	1.35	1.45	irregular
51	3162.36	239.43	0.70	63.64	5520.60	1.32	4.60	irregular
52	11172.22	436.76	0.74	130.92	15157.22	1.16	7.62	irregular
53	51256.25	8314.36	0.32	569.48	254713.46	1.67	31.23	irregular
54	115548.90	1934.34	0.37	537.97	227305.43	1.41	29.50	irregular
55	15711.81	738.78	0.36	180.65	25331.02	1.28	9.91	irregular
56	1981.94	240.70	0.43	67.63	3613.06	1.35	3.72	irregular
57	8043.06	496.58	0.41	146.18	16782.85	1.44	8.02	irregular
58	20202.78	964.15	0.34	249.89	49044.20	1.56	13.71	irregular
59	9754.44	796.03	0.19	141.92	15813.93	1.27	7.73	irregular
60	18016.84	1362.34	0.20	220.66	38241.60	1.46	12.10	irregular
61	18106.25	1283.22	0.14	199.09	31130.69	1.31	10.92	irregular
62	2856.31	261.92	0.53	86.09	6233.72	1.47	4.66	irregular
63	6533.19	553.84	0.27	137.31	14507.93	1.50	7.53	irregular
64	1565.23	324.00	0.16	86.04	6814.21	2.06	4.72	elongated
65	7755.14	546.33	0.33	196.06	30190.33	1.97	10.75	irregular
66	4432.54	766.91	0.39	132.80	13651.16	1.77	7.20	irregular
67	5163.19	519.43	0.24	133.05	13903.36	1.64	7.30	irregular
68	856.94	320.06	0.11	63.53	2253.05	1.62	2.94	irregular
69	341.67	39.58	0.89	22.14	354.99	1.06	1.21	spherical
70	6911.11	445.74	0.44	128.24	12916.26	1.37	7.03	irregular
71	206.42	53.77	0.90	17.34	236.15	1.07	0.95	spherical
72	391.84	74.13	0.90	23.53	433.74	1.05	1.25	spherical
73	66.27	30.77	0.92	10.29	93.16	1.10	0.56	spherical
74	1215.23	159.73	0.90	53.72	2206.53	1.37	2.95	irregular
75	11601.93	715.54	0.28	273.43	58719.48	2.25	15.00	irregular
76	1537.39	290.25	0.26	133.68	14335.33	2.76	7.33	elongated

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

No.	Area (microns ²)	Perim. (microns)	Circ.	Feret. (microns)	Conv. Area (microns ²)	Fulln. Ratio	Conv. Perim. (microns)	Group
77	1986.02	282.09	0.29	113.50	12117.70	2.26	6.22	elongated
78	5725.63	582.71	0.32	217.40	37123.08	2.06	11.32	irregular
79	1200.12	140.26	0.73	54.87	2364.61	1.36	3.01	irregular
80	2431.26	229.90	0.56	67.56	3636.96	1.21	3.71	irregular
81	1683.48	263.40	0.30	106.35	8683.11	2.31	5.83	elongated
82	862.11	163.64	0.40	70.78	3934.69	2.14	3.88	elongated
83	1260.86	233.90	0.29	102.55	8259.64	2.56	5.62	elongated
84	1091.62	204.92	0.35	91.31	6548.27	2.45	5.01	elongated
85	1273.74	158.05	0.67	56.72	2526.75	1.41	3.11	irregular
86	2685.55	305.99	0.34	134.59	14227.07	2.35	7.38	elongated
87	2528.31	464.32	0.15	218.97	37623.77	3.86	12.00	elongated
88	1201.11	281.79	0.19	127.83	12843.85	3.27	7.01	elongated
89	2055.46	212.21	0.57	76.11	4549.60	1.49	4.17	irregular
90	470.86	164.06	0.22	73.57	4251.00	3.00	4.03	elongated
91	669.18	207.46	0.20	91.83	6623.07	3.15	5.07	elongated
92	7060.23	459.67	0.42	169.75	22631.30	1.79	9.31	irregular
93	407.27	154.30	0.26	69.26	3769.69	2.70	3.80	elongated
94	689.57	179.96	0.23	79.44	4956.42	2.88	4.33	elongated
95	9377.73	503.35	0.43	175.17	24089.57	1.60	9.61	irregular
96	3672.95	293.31	0.54	101.50	8091.37	1.48	5.57	irregular
97	1570.84	367.41	0.15	165.87	21558.47	3.70	9.09	elongated
98	2160.37	259.77	0.40	71.45	4009.54	1.36	3.92	irregular
99	1473.21	167.25	0.68	63.25	3142.03	1.46	3.47	irregular
100	1845.78	187.02	0.68	62.14	3032.72	1.28	3.41	irregular
101	1256.02	255.77	0.24	60.82	2905.24	1.52	3.34	irregular
102	3539.55	355.92	0.65	132.59	13807.33	1.45	7.27	irregular
103	4654.86	343.60	0.50	116.51	10661.45	1.51	6.33	irregular
104	3173.61	252.28	0.63	81.76	5250.15	1.29	4.49	irregular
105	2451.39	256.02	0.47	76.42	4586.74	1.37	4.19	irregular
106	4872.22	381.69	0.42	134.54	14213.50	1.71	7.38	irregular
107	1841.67	202.16	0.57	64.68	3235.72	1.34	3.55	irregular
108	2161.11	192.70	0.73	76.01	4537.65	1.45	4.17	irregular
109	4132.64	332.96	0.47	97.87	7522.97	1.35	5.37	irregular
110	3339.58	316.62	0.42	94.64	7034.60	1.45	5.19	irregular
111	3240.26	291.30	0.49	109.95	9494.68	1.71	6.03	irregular
112	3705.26	243.71	0.80	84.37	5590.70	1.22	4.63	irregular
113	2135.89	193.34	0.70	75.66	4435.96	1.45	4.15	irregular
114	2997.92	237.40	0.67	80.28	5061.30	1.30	4.40	irregular

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

No.	Area (microns ²)	Perim. (microns)	Circ.	Feret. (microns)	Conv. Area (microns ²)	Fulln. Ratio	Conv. Perim. (microns)	Group
115	3037.50	250.01	0.61	104.52	8580.03	1.68	5.73	irregular
116	866.32	136.44	0.55	53.95	2283.58	1.62	2.56	irregular
117	1044.44	137.09	0.70	49.92	1957.22	1.37	2.74	irregular
118	2325.69	201.65	0.72	66.09	3430.53	1.21	3.62	irregular
119	2425.69	244.72	0.51	70.66	3923.58	1.27	3.89	irregular
120	1303.47	144.73	0.75	47.05	1733.64	1.15	2.53	irregular
121	1243.75	163.76	0.55	62.46	3064.04	1.57	3.43	irregular
122	315.80	74.34	0.72	26.24	540.78	1.31	1.44	irregular
123	12736.47	1042.36	0.15	430.64	145632.73	3.30	23.62	elongated
124	5597.07	550.12	0.23	242.14	43049.25	2.67	13.28	elongated
125	5973.43	563.86	0.24	250.15	49746.31	2.67	13.72	elongated
126	20515.14	1207.64	0.15	481.40	182012.35	2.98	26.40	elongated
127	12051.11	690.67	0.32	306.37	75719.50	2.47	16.80	elongated
128	9783.72	710.55	0.24	317.41	75728.16	2.84	17.41	elongated
129	13256.23	782.78	0.27	345.83	83823.74	2.66	18.96	elongated
130	8927.79	432.08	0.60	138.37	15037.44	1.30	7.59	irregular
131	4444.44	307.96	0.59	113.14	10053.61	1.50	6.21	irregular
132	6980.69	615.98	0.23	134.27	14759.50	1.43	7.36	irregular
133	1102.93	128.35	0.82	42.47	1416.62	1.13	2.33	irregular
134	967.26	122.50	0.81	39.73	1239.73	1.13	2.13	irregular
135	968.80	144.11	0.60	50.24	1082.39	1.41	2.76	irregular
136	520.75	100.36	0.77	33.21	566.22	1.10	1.62	irregular
137	347.93	72.63	0.83	24.99	490.48	1.18	1.37	irregular
138	862.11	132.47	0.61	45.25	1602.15	1.37	2.49	irregular
139	870.89	129.25	0.63	42.38	1410.63	1.27	2.32	irregular
140	731.08	174.24	0.30	47.52	1773.55	1.56	2.61	irregular
141	4093.15	283.47	0.64	99.02	7700.80	1.37	5.43	irregular
142	2662.29	209.64	0.75	77.09	4667.52	1.32	4.23	irregular
143	2603.17	202.17	0.60	73.56	4252.16	1.20	4.04	irregular
144	2070.59	237.73	0.43	61.35	2956.10	1.19	3.36	irregular
145	3067.43	238.53	0.65	90.75	6463.20	1.45	4.53	irregular
146	1678.54	165.09	0.77	59.75	2803.52	1.25	3.23	irregular
147	3731.39	258.77	0.70	95.81	7209.61	1.36	5.25	irregular
148	2497.45	218.14	0.63	85.54	5746.83	1.52	4.69	irregular
149	1614.47	172.52	0.77	56.01	2463.09	1.17	3.07	irregular
150	2012.50	291.93	0.47	62.34	3052.27	1.23	3.42	irregular
151	8944.44	932.61	0.11	135.77	14477.63	1.27	7.45	irregular
152	4857.64	535.37	0.15	93.01	6794.37	1.18	3.10	irregular

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

No.	Area (microns ²)	Perim. (microns)	Circ.	Feret. (microns)	Conv. Area (microns ²)	Fulln. Ratio	Conv. Perim. (microns)	Group
153	11870.14	1671.54	C 05	154.17	26635.30	1.50	10.10	irregular
154	187.50	52.31	C 56	10.85	222.92	1.09	0.92	spherical
155	384.58	70.84	C 91	23.17	421.64	1.08	1.27	spherical
156	216.15	55.30	C 88	17.52	241.05	1.06	0.96	spherical
157	384.58	71.77	C 88	23.70	441.15	1.10	1.30	spherical
158	293.89	60.64	C 90	20.34	324.93	1.11	1.12	spherical
159	240.97	57.80	C 91	19.00	283.53	1.08	1.04	spherical
160	497.22	84.09	C 88	26.54	553.21	1.06	1.40	spherical
161	209.38	56.55	C 86	17.56	242.15	1.08	0.96	spherical
162	585.28	86.85	C 90	26.56	640.63	1.06	1.57	spherical
163	343.58	69.25	C 90	22.33	391.62	1.07	1.22	spherical
164	7046.43	425.19	C 49	173.60	23699.51	1.93	9.52	irregular
165	4317.36	393.35	C 35	144.78	16432.93	1.95	7.94	irregular
166	6618.06	426.58	C 46	130.03	13278.36	1.42	7.13	irregular
167	2132.81	285.50	C 53	97.13	7439.33	1.96	5.33	irregular
168	5388.57	338.85	C 58	125.99	12487.00	1.52	6.91	irregular
169	9057.47	219.36	C 54	91.65	6601.45	1.79	5.03	irregular
170	14959.72	553.42	C 59	191.51	25875.53	1.32	9.95	irregular
171	6218.23	509.89	C 30	115.06	10397.73	1.29	6.31	irregular
172	16370.97	830.06	C 28	321.65	81256.29	2.23	17.64	irregular
173	55421.53	1248.52	C 45	438.03	172043.10	1.76	25.67	irregular
174	1484.03	491.33	C 08	221.65	38555.81	5.10	12.16	elongated
175	1783.33	328.36	C 21	144.98	16508.44	3.04	7.95	elongated
176	1352.06	242.70	C 29	109.76	9451.99	2.95	6.02	elongated
177	509.03	192.13	C 31	82.63	5332.48	2.43	4.53	elongated
178	1047.92	241.89	C 23	106.87	6970.19	2.93	5.86	elongated
179	1542.56	332.48	C 18	145.98	16736.36	3.29	8.01	elongated
180	2176.56	352.60	C 22	157.07	19376.55	2.98	8.61	elongated
181	202.26	97.53	C 27	40.61	1235.26	2.53	2.23	elongated
182	207.29	112.93	C 20	47.96	1606.05	2.95	2.63	elongated
183	244.62	112.99	C 24	44.15	1533.00	2.50	2.42	elongated
184	114.58	104.56	C 13	44.52	1556.36	3.99	2.44	elongated
185	214.41	153.47	C 11	68.71	3707.32	4.16	3.77	elongated

Remark :

Perim. = Perimeter

Conv. Area = Convex Area

irregular = Irregular Shape

Circ. = Circularity

Fulln. Ratio = Fullness Ratio

elongated = Elongated Shape

Feret. = Feret Diameter

Conv. Perim. = Convex Perimeter

spherical = Spherical Shape

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลลักษณะพื้นผิวอนุภาคการลิกทรอ

No.	ASM	Contrast	Correlation	IDM	Entropy	Group
1	-0.022001823	6.0/750034	0.002507075	-0.00046317*	0.145383455	Smooth
2	-0.038235106	6.238921894	0.001303877	-0.014358046	0.225926444	Rough
3	-0.007977336	1.208010504	0.006222569	-0.002636353	0.046621976	Smooth
4	-0.01921199*	1.760571619	0.006600455	-0.006303448	0.113124034	Smooth
5	-0.018826626	0.701134499	0.006620345	-0.005675104	0.108221366	Smooth
6	-0.01007517	14.40632018	0.000367137	-0.050022675	0.73600242	Rough
7	-0.044245317	15.37742183	0.003418767	-0.019910635	0.30900364	Striations
8	-0.018769686	46.7381487	0.001689115	-0.035234626	0.624947247	Striations
9	-0.157664223	61.11100162	0.000651155	-0.071493737	1.005376573	Striations
10	-0.00739510*	3.997533726	0.005496365	-0.002775509	0.044906699	Smooth
11	-0.016552378	1.645773533	0.005199325	-0.00336331	0.109684821	Smooth
12	-0.05302001	7.745103027	0.00065144	-0.024301827	0.369634439	Rough
13	-0.00305236*	0.512005242	0.004652509	-0.000963813	0.019094702	Smooth
14	-0.001663673	0.101168218	0.000691943	-0.000524704	0.010438187	Smooth
15	-0.007430459	0.559267077	0.000289787	-0.002702835	0.046907219	Smooth
16	-0.016421887	2.920328483	0.00363884	-0.00613041*	0.105216112	Smooth
17	-0.068904188	21.06338108	0.001287251	-0.030705871	0.470798851	Striations
18	-0.002495535	0.075651573	0.001058905	-0.000678567	0.017601146	Smooth
19	-0.012417769	0.760315621	0.006288761	-0.00410406	0.077262019	Smooth
20	-0.00891066*	2.144358618	0.005457043	-0.003736808	0.067464959	Smooth
21	-0.036475067	7.783747205	0.001817466	-0.01562051*	0.245453677	Rough
22	-0.006344437	2.410687714	0.004241665	-0.002546698	0.040511061	Smooth
23	-0.01394336	2.044752751	0.006489487	-0.0048418	0.084820267	Smooth
24	-0.031561167	5.737760393	0.002662096	-0.012451286	0.200777705	Striations
25	-0.016952738	4.747315016	0.004359529	-0.006337818	0.107605425	Smooth
26	-0.007045899	0.64524805	0.001716585	-0.00233471*	0.044209238	Smooth
27	-0.174786518	24.57618906	0.000517431	-0.07545381*	1.102608973	Striations
28	-0.092063726	25.28187409	0.001274653	-0.040214533	0.50481673	Striations
29	-0.462579527	192.9773918	0.000296975	-0.235378297	3.100549591	Striations
30	-0.01638814	1.778460467	0.005020236	-0.005991653	0.101783039	Smooth
31	-0.054541106	5.992569442	0.000975195	-0.022548775	0.347079343	Rough
32	-0.003741882	0.308320533	0.000792735	-0.001113324	0.022084399	Smooth
33	-0.00253563*	1.019440826	0.00125542	-0.000991853	0.016678361	Smooth
34	-0.00141302*	0.153618054	0.001494765	-0.000442979	0.009168967	Smooth
35	-0.004973339	0.828010178	0.006428945	-0.001700332	0.031803172	Smooth
36	-0.00344662	-1.354512067	0.005835633	-0.002904665	0.057003664	Smooth
37	-0.007256182	1.896516023	0.005770579	-0.002694708	0.046078461	Smooth
38	-0.004586686	1.661265531	0.005963744	-0.001915377	0.03122892	Smooth
39	-0.015577157	2.845788832	0.003277326	-0.006017766	0.103489032	Smooth
40	-0.012386997	2.74775102	0.003428554	-0.004773164	0.082436795	Smooth

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

No.	ASM	Contrast	Correlation	IDM	Entropy	Group
41	-0.033291085	1.45617676	0.001353059	-0.014091497	0.211352147	Rough
42	-0.006885065	1.540553298	0.003153609	-0.002151633	0.040377944	Smooth
43	0.057833489	8.509623542	0.000842058	-0.026463428	0.357187603	Rough
44	-0.066538678	8.269933947	0.000797115	-0.026463853	0.402357837	Rough
45	-0.072005574	1.333800008	0.005632436	-0.004274947	0.074354807	Smooth
46	-0.073215018	2.286158215	0.003242734	-0.005374756	0.088004034	Smooth
47	-0.009150776	2.061710279	0.00451957	-0.00364973	0.053007972	Smooth
48	-0.090436328	7.776219184	0.000667722	-0.036578796	0.543775563	Rough
49	-0.07271257	3.501250027	0.00290442	-0.007064233	0.17572102	Smooth
50	0.004132753	0.821803444	0.006024637	0.001456722	0.026497083	Smooth
51	-0.01292249	2.509427353	0.003257339	-0.004967748	0.084927492	Smooth
52	0.066785582	8.961007674	0.000762014	-0.027784076	0.414535491	Rough
53	-0.445936185	157.677835	0.00533095	-0.229583618	2.951233625	Striations
54	-0.06776654	8.749697946	0.000707991	-0.025661176	0.408273003	Rough
55	-0.370551904	53.74213958	0.001777027	-0.165948459	2.154533851	Rough
56	-0.070753172	2.970696049	0.005616237	-0.007970926	0.123799166	Striations
57	-0.072906491	5.560908665	0.001427641	-0.029848888	0.463432782	Rough
58	-0.146790621	27.05342159	0.000404767	-0.063380645	0.907909494	Rough
59	0.078403818	9.59624563	0.002164851	0.034070253	0.505660024	Rough
60	-0.473334762	29.64747573	0.000763557	-0.217472735	2.845129028	Striations
61	-0.154134392	17.54827655	0.001047525	-0.069473856	0.978726893	Striations
62	-0.042133014	2.553777723	0.003323046	-0.016185672	0.252498028	Rough
63	-0.05655096	14.80729262	0.001204046	-0.022270032	0.346273965	Rough
64	-0.072600106	6.070273038	0.00597042	-0.005265051	0.086483504	Smooth
65	-0.032766746	6.177990142	0.002032401	-0.013325697	0.215574157	Rough
66	0.023107002	6.963194945	0.003788933	0.009975899	0.159133732	Striations
67	-0.043111813	8.739922418	0.003022071	-0.016406733	0.262877917	Rough
68	0.065842625	9.57679634	0.001927405	0.025362851	0.354223953	Rough
69	-0.004154173	0.587894242	0.003838596	-0.00763382	0.027704594	Smooth
70	0.053255056	13.47858384	0.002552796	0.022122335	0.344387809	Rough
71	-0.008605337	1.573029695	0.005803806	-0.005132642	0.054936235	Smooth
72	-0.074441054	3.222547743	0.004333775	-0.005305147	0.001157938	Smooth
73	-0.003934891	0.537273657	0.003283444	-0.001425155	0.025439614	Smooth
74	-0.026854864	2.890054384	0.003813512	-0.007533689	0.150102104	Rough
75	-0.030390003	9.764402903	0.003434531	-0.016265251	0.255672773	Striations
76	-0.040648828	7.556308753	0.003812669	-0.016334171	0.260537061	Rough
77	-0.02445779	3.539799999	0.006252839	-0.010560070	0.16299458	Striations
78	-0.043423289	8.940225892	0.002983711	-0.018300344	0.264797984	Striations
79	-0.073290453	1.425590009	0.006797907	-0.005452435	0.069772442	Striations
80	-0.047151167	4.16228554	0.002625948	-0.013923998	0.258064939	Rough

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

No.	ASM	Contrast	Correlation	IDM	Entropy	Group
31	-0.021123918	3.295538382	0.006267397	-0.00895737	C.141°36555	Striations
32	-0.005545168	0.595057549	0.002444852	-0.002°47585	C.035°21268	Smooth
33	-0.007907264	2.109707263	0.003936175	-0.00313322	C.045°353741	Smooth
34	-0.028007522	2.086807755	0.004348168	-0.010352972	C.162°84154	Smooth
35	-0.025641086	2.295755089	0.004850467	-0.010543943	C.1655°0341	Smooth
36	-0.045653702	7.31260424	0.00358°089	-0.015812183	C.285°61178	Rough
37	-0.061857209	5.983579167	0.004442414	-0.013647032	C.291939453	Smooth
38	-0.0°4°03949	2.88°3°0333	0.0056°7°072	-0.003084534	C.095°441596	Smooth
39	-0.0°6997143	3.101102083	0.005540443	-0.007046506	C.112°97492	Smooth
40	0.007124053	4.5°1520335	0.00575597	-0.0029082°4	C.045°509484	Smooth
41	-0.009531758	4.021570335	0.005854629	-0.003787384	C.0608°7623	Smooth
42	0.036537057	6.259552151	0.003225435	-0.014946722	C.235798331	Striations
43	-0.00321959	3.7150°25	0.005759204	-0.002589495	C.041045144	Smooth
44	-0.00828054	4.95°5375	0.00581345	-0.003394502	C.053623691	Smooth
45	-0.044712856	10.60135563	0.003086193	-0.013054539	C.296352066	Striations
46	-0.0°3630818	3.189°75379	0.007857057	-0.00527589	C.0824°5593	Striations
47	-0.0°8427854	5.231729167	0.004855543	-0.007635282	C.119344734	Smooth
48	-0.046125453	4.986507827	0.002770695	-0.011778125	C.238°84604	Rough
49	-0.030852391	4.23°0°6381	0.003083651	-0.0054535°8	C.166°26375	Rough
100	0.037087552	2.382556213	0.0030601	-0.010407134	C.200408171	Rough
101	-0.032112228	2.372458915	0.005022051	-0.012060892	C.194°69338	Rough
102	0.060390365	13.113548	0.001020203	-0.012604339	C.295754415	Rough
103	-0.039497922	12.29650263	0.001325465	-0.01523°°7	C.235°28583	Rough
104	-0.02776202	5.334555684	0.001847382	-0.013831174	C.17400522	Rough
105	-0.023130897	5.233606409	0.002302465	-0.005841703	C.14366107	Smooth
106	-0.040328739	11°1376953	0.001140873	-0.0130567°1	C.242257437	Rough
107	-0.0°7920746	6.51936843	0.002726074	-0.005859098	C.11235949	Smooth
108	-0.0°9°504°2	5.250117549	0.002469152	-0.007707237	C.123957043	Smooth
109	-0.035838624	8.7622989	0.00157°485	-0.014700932	C.22731321	Rough
110	-0.028°03027	12.65°60431	0.001558974	-0.0112691°3	C.177°46376	Smooth
111	-0.029355408	4.179°32°11	0.001629165	-0.01092908	C.182°85317	Rough
112	0.031133177	4.798678925	0.002599595	-0.012270906	C.193954715	Rough
113	-0.0°9651691	4.446044922	0.003515995	-0.0077°°25	C.12°054953	Smooth
114	0.025555958	3.928458559	0.00325034	-0.010608733	C.172282643	Rough
115	-0.027445925	6.341159052	0.002310945	-0.013844539	C.172363406	Smooth
116	0.029633415	3.68595497	0.003850919	-0.011636329	C.185378445	Smooth
117	-0.0°3687741	11°941°392	0.005556907	-0.004704771	C.085°62928	Smooth
118	-0.020331058	3.48562°759	0.003127301	-0.00786406	C.130879156	Smooth
119	-0.020102865	4.382256402	0.004205863	-0.005050475	C.133085023	Smooth
120	-0.0°2152293	1°171377677	0.005806843	-0.004716857	C.080705758	Smooth

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

No.	ASM	Contrast	Correlation	IDM	Entropy	Group
121	-0.012330219	2 167192564	0.003010735	-0.004712401	0.063803442	Smooth
122	-0.013427824	1 361076389	0.003463625	-0.005593935	0.066707305	Smooth
123	0.026695124	6 350556825	0.003307637	-0.010326245	0.175755236	Smooth
124	-0.014337831	6 032963505	0.004860103	-0.005412369	0.092109722	Smooth
125	-0.014454033	1 295077257	0.003100713	-0.004396287	0.08977573	Smooth
126	0.037693808	5 853509067	0.00271547	0.013656158	0.262203168	Rough
127	-0.024293588	5 554497613	0.003711143	-0.008673335	0.150262615	Smooth
128	-0.02041958	5 717366536	0.004181318	-0.007482846	0.127824247	Smooth
129	-0.024505013	3 566603516	0.003635934	-0.009046315	0.154697469	Smooth
130	-0.067746585	22 43465386	0.00883045	-0.030327016	0.449664031	Rough
131	-0.036211217	10 21728516	0.001570904	-0.015075412	0.264488812	Rough
132	-0.055072748	13 09543186	0.001159827	-0.022357645	0.359454998	Striations
133	-0.022576671	2 569234001	0.004246371	-0.006586425	0.128607677	Smooth
134	-0.020918709	2 23033549	0.004527771	-0.006743341	0.120683973	Smooth
135	-0.021984972	3 365311673	0.004141753	-0.00568858	0.115637651	Smooth
136	-0.014431982	2 115139761	0.004902653	-0.003326454	0.080172116	Smooth
137	-0.006793693	1 674186725	0.00187259	-0.002523505	0.051603412	Smooth
138	-0.019196783	2 38527735	0.004699747	-0.005541308	0.105409327	Smooth
139	-0.018497654	2 451682436	0.004526345	-0.00486745	0.100638903	Smooth
140	-0.02839717	3 861492332	0.003672166	-0.011193747	0.163265454	Smooth
141	-0.031593463	3 455720833	0.00254321	-0.012543476	0.200077558	Smooth
142	-0.021077106	3 782625	0.003804149	-0.008200828	0.135633191	Smooth
143	-0.021344446	1 8496125	0.00399414	-0.00922735	0.136177963	Smooth
144	-0.017995463	2 62425	0.005573123	-0.007502255	0.121246669	Smooth
145	-0.0249766	3 623808333	0.004567863	-0.01046818	0.163735145	Smooth
146	-0.013991281	2 76105	0.005546005	-0.005923912	0.094027901	Smooth
147	-0.0318263	3 30029375	0.004026238	-0.013108083	0.203741275	Rough
148	-0.024051622	2 54440825	0.004832177	-0.009544956	0.152780043	Smooth
149	-0.015641552	2 927795633	0.005704279	-0.00677395	0.105665792	Smooth
150	-0.018157545	5 863737056	0.004317725	-0.007507458	0.120296777	Smooth
151	-0.085074746	13 3507532	0.002743081	-0.03739967	0.545158295	Striations
152	-0.043603621	6 823278356	0.004044245	-0.01949022	0.291226469	Striations
153	-0.130526957	22 05638744	0.002063994	-0.059948308	0.845179836	Striations
154	-0.002638027	1 216383786	0.004169332	-0.001066415	0.07839647	Smooth
155	-0.004930005	1 500651042	0.005796366	-0.001940046	0.032127227	Smooth
156	-0.009490804	3 012410482	0.005003913	-0.003697954	0.061642807	Smooth
157	-0.004534406	2 962370696	0.005706632	-0.001561651	0.029728835	Smooth
158	-0.004005441	0 98104022	0.004052461	-0.001514304	0.025637565	Smooth
159	-0.003792164	1 714888061	0.003328667	-0.001483226	0.024733745	Smooth
160	-0.018144417	2 521663614	0.003400464	-0.007000819	0.115881743	Smooth

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

No.	ASM	Contrast	Correlation	IDM	Entropy	Group
161	-0.009033891	2.178532311	0.005225381	-0.005643924	0.060293291	Smooth
162	-0.01367117	3.791531033	0.002838058	-0.007367202	0.125737111	Smooth
163	-0.011932406	6.328016493	0.0040355	-0.004853118	0.08035524	Smooth
164	-0.061572956	10.09236667	0.002526661	-0.005161134	0.366025664	Striations
165	-0.04095102	11.8527632	0.001866445	-0.011279781	0.268115029	Striations
166	-0.190192991	22.93075446	0.000420637	-0.079433595	1.17265763	Striations
167	0.01658026	11.46287254	0.001566485	0.030271177	0.462382952	Striations
168	-0.046008016	7.02131125	0.003300054	-0.015794533	0.294152013	Striations
169	0.065943239	22.13671709	0.001606083	0.025285253	0.434140092	Striations
170	-0.12455553	33.52601903	0.000824702	-0.053865143	0.825943534	Striations
171	-0.197686993	17.98527922	0.000445453	-0.082931535	1.215147926	Striations
172	-0.131292394	13.36450417	0.001488132	-0.052620119	0.782372523	Striations
173	-0.470036401	99.39757397	0.000640076	-0.24634267	3.110272056	Striations
174	-0.02471757	7.085847075	0.005167381	-0.009668008	0.150209539	Smooth
175	-0.02294306	4.272292009	0.003007072	-0.009221959	0.145577791	Smooth
176	0.018251101	6.35960023	0.003515104	0.003861095	0.116481334	Smooth
177	-0.012536425	6.178715459	0.004607624	-0.005172742	0.082278589	Smooth
178	0.013902766	9.221758194	0.004054207	0.005673514	0.090882433	Smooth
179	-0.020107077	11.14559931	0.00322233	-0.00807085	0.130168504	Smooth
180	-0.024745606	8.58282317	0.002926732	-0.010358739	0.16156326	Smooth
181	-0.011622544	3.715550961	0.005022395	-0.004602294	0.075581052	Smooth
182	-0.011563413	10.06063171	0.004314664	-0.004772398	0.073916178	Smooth
183	-0.012418248	6.127170139	0.004012542	-0.004838207	0.079440411	Smooth
184	-0.008524122	0.67552445	0.003062072	-0.003176326	0.051741406	Smooth
185	0.013939785	10.14582533	0.005037578	0.005642379	0.067004082	Smooth

Remark :

ASM = Angular Second Moment

IDM = Inverse Difference Moment

Smooth = Smooth Surface Texture

Rough = Rough Surface Texture

Striations = Striations Surface Texture

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลลักษณะสีของอนุภาคการลิกทรอ

No.	H	S	I	L*	a*	b*	Group
1	203	33	22	19	-3	-6	Heated
2	60	13	12	12	-1	3	BOxide
3	32	61	47	40	11	28	ROxide
4	24	48	62	51	16	24	ROxide
5	40	59	69	61	8	41	ROxide
6	0	39	14	9	7	3	Heated
7	34	4	77	79	1	2	Steel
8	216	3	69	71	0	-2	Steel
9	350	5	48	50	3	0	Heated
10	210	3	25	27	0	-1	BOxide
11	27	50	53	45	13	24	ROxide
12	0	0	9	8	0	0	BOxide
13	308	40	22	16	14	-8	Heated
14	36	36	68	63	6	24	Steel
15	34	54	93	78	15	45	ROxide
16	60	6	7	5	0	1	BOxide
17	39	17	51	51	1	9	Steel
18	36	22	68	66	3	14	Steel
19	25	52	56	46	15	25	ROxide
20	218	10	44	45	0	-4	Heated
21	21	55	39	31	14	18	ROxide
22	202	81	19	12	-6	-12	Heated
23	0	6	42	43	3	1	Steel
24	0	19	42	39	9	3	Heated
25	264	50	4	2	1	-2	Heated
26	216	80	25	13	1	-23	Heated
27	37	39	42	40	4	18	Steel
28	31	26	53	50	5	13	Steel
29	324	3	57	59	2	-1	Heated
30	27	51	71	59	16	31	ROxide
31	240	9	17	16	1	-3	BOxide
32	29	20	70	67	5	11	Steel
33	36	20	66	65	2	12	Steel
34	30	67	76	60	21	45	ROxide
35	11	39	39	32	13	10	Heated
36	214	96	77	39	13	-64	Heated
37	34	6	42	45	1	3	Heated
38	33	20	60	59	3	11	Steel
39	34	25	22	21	2	6	Heated
40	36	18	11	9	0	3	BOxide

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

No.	H	S	I	L*	a*	b*	Group
41	96	12	17	17	-2	3	BOxide
42	35	89	50	39	17	43	ROxide
43	30	6	13	12	0	1	BOxide
44	30	25	16	14	2	4	BOxide
45	28	26	62	58	6	14	Steel
46	220	12	10	8	0	-2	ROxide
47	30	15	11	9	1	2	BOxide
48	40	9	13	12	0	2	BOxide
49	36	37	16	14	2	7	Heated
50	278	57	5	2	2	-3	Heated
51	210	8	10	8	0	-1	BOxide
52	44	25	17	17	0	6	BOxide
53	20	8	77	76	3	4	Steel
54	217	27	12	9	0	-4	BOxide
55	17	3	87	87	2	2	Steel
56	32	27	73	69	6	17	Steel
57	8	83	72	43	53	43	Copper
58	187	14	25	26	-3	-2	BOxide
59	36	34	70	65	5	22	Steel
60	53	9	76	78	-1	8	Steel
61	36	45	64	58	7	28	Steel
62	348	31	69	57	23	3	Copper
63	0	36	33	26	14	6	Heated
64	2	41	59	45	25	12	Copper
65	4	42	46	36	20	11	Copper
66	32	51	64	56	11	31	ROxide
67	38	56	82	71	10	44	ROxide
68	205	82	92	60	-9	-51	Heated
69	26	36	79	70	12	22	ROxide
70	29	26	65	62	6	14	Steel
71	31	36	62	56	8	20	Steel
72	34	22	45	45	3	10	Steel
73	30	31	75	68	8	20	ROxide
74	25	46	70	59	16	26	ROxide
75	60	9	71	73	-2	9	Steel
76	47	14	76	77	0	11	Steel
77	44	12	86	85	0	11	Steel
78	50	7	63	65	-1	6	Steel
79	51	13	65	67	-1	10	Steel
80	25	46	71	60	16	26	ROxide

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

No.	H	S	I	L*	a*	b*	Group
81	50	12	83	83	-1	11	Steel
82	56	13	81	82	-2	13	Steel
83	44	9	64	66	0	6	Steel
84	33	14	95	91	3	11	Steel
85	47	15	69	70	0	12	Steel
86	50	16	71	72	-1	13	Steel
87	100	14	60	61	-8	9	Steel
88	280	11	52	51	6	-7	Heated
89	180	12	64	65	-7	-2	Steel
90	251	42	45	31	13	-27	Heated
91	259	16	51	45	7	-13	Heated
92	280	7	53	54	5	-4	Heated
93	250	28	48	39	9	-19	Heated
94	257	29	47	39	10	-18	Heated
95	46	10	68	70	0	7	Steel
96	33	7	62	63	1	4	Steel
97	255	36	46	34	12	-23	Heated
98	26	43	69	59	14	25	ROxide
99	24	48	63	52	16	25	ROxide
100	26	44	68	58	14	25	ROxide
101	26	35	94	81	14	25	ROxide
102	257	16	17	15	2	-4	BOxide
103	240	15	18	39	39	46	BOxide
104	252	27	15	10	3	-7	BOxide
105	313	21	17	15	6	-3	BOxide
106	240	24	8	5	1	-3	BOxide
107	245	29	15	10	3	-7	BOxide
108	270	28	14	10	5	-6	BOxide
109	280	28	13	9	5	-5	BOxide
110	253	30	12	7	3	-6	BOxide
111	270	34	11	7	4	-6	BOxide
112	5	75	68	41	49	35	Copper
113	6	76	73	44	52	38	Copper
114	3	76	86	51	62	43	Copper
115	13	80	58	37	39	36	Copper
116	15	87	59	42	31	30	Copper
117	4	59	72	48	41	25	Copper
118	11	63	60	42	32	26	Copper
119	26	79	88	63	36	57	Copper
120	11	70	89	58	51	43	Copper

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

No.	H	S	I	L*	a*	b*	Group
121	16	81	82	53	49	51	Copper
122	13	73	89	58	50	46	Copper
123	304	70	31	19	31	-19	Heated
124	316	72	27	16	28	-11	Heated
125	315	88	31	17	35	-14	Heated
126	303	43	40	31	25	-16	Heated
127	319	51	36	26	27	-10	Heated
128	301	43	40	31	25	-17	Heated
129	303	40	40	32	23	-15	Heated
130	24	18	33	33	3	5	Heated
131	309	14	20	19	4	-3	BOxide
132	280	16	29	28	6	-6	I heated
133	24	51	76	61	21	31	ROxide
134	24	51	78	63	21	31	ROxide
135	24	47	70	58	17	26	ROxide
136	23	48	67	55	17	26	ROxide
137	26	43	68	58	14	24	ROxide
138	22	44	71	59	17	24	ROxide
139	23	44	71	59	17	24	ROxide
140	23	66	69	52	27	38	ROxide
141	23	48	67	55	17	26	ROxide
142	24	49	67	55	17	26	ROxide
143	24	47	67	56	17	25	ROxide
144	200	6	63	64	-2	-2	Steel
145	45	6	57	59	0	3	Steel
146	48	4	56	59	0	2	Steel
147	60	3	55	58	-1	2	Steel
148	72	4	55	58	-1	3	Steel
149	70	4	60	63	-1	3	Steel
150	270	2	49	51	1	-1	Heated
151	47	21	70	70	-1	16	Steel
152	46	20	69	69	0	15	Steel
153	47	20	72	72	-1	16	Steel
154	29	65	71	56	21	41	ROxide
155	31	60	37	31	10	22	Steel
156	30	65	58	47	17	35	ROxide
157	229	65	13	5	2	-13	Heated
158	28	69	68	53	22	42	ROxide
159	310	8	60	60	6	-4	Heated
160	22	18	55	53	5	7	Steel

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

No.	H	S	I	L*	a*	b*	Group
161	34	20	64	63	3	12	Steel
162	20	35	54	47	11	14	Steel
163	72	8	51	51	-2	5	Steel
164	34	9	63	64	1	5	Steel
165	25	30	38	36	6	10	Steel
166	358	24	60	53	15	5	Heated
167	33	20	65	64	3	12	Steel
168	30	4	60	62	1	2	Steel
169	36	22	65	64	3	14	Steel
170	41	17	58	59	1	10	Steel
171	39	37	48	46	3	19	Steel
172	57	10	68	70	-2	9	Steel
173	21	9	74	73	3	5	Steel
174	22	58	68	53	23	32	ROxide
175	233	73	27	11	11	-30	Heated
176	259	46	38	25	15	-25	Heated
177	263	24	30	26	6	-10	Heated
178	324	13	30	29	5	-2	Heated
179	330	13	30	29	5	-1	Heated
180	267	37	24	17	9	-12	Heated
181	300	18	22	20	6	-5	Heated
182	324	56	22	14	18	-5	Heated
183	13	56	26	18	13	11	Heated
184	42	19	70	69	1	13	Steel
185	33	69	42	35	12	30	ROxide

Remark :

H = Hue

S = Saturation

I = Intensity

L* = Luminance

a* = a star

b* = b star

Heated = Heated Metal color

BOxide = Black Oxide Color

ROxide = Red Oxide Color

Copper = Copper Color

Steel = Steel Color

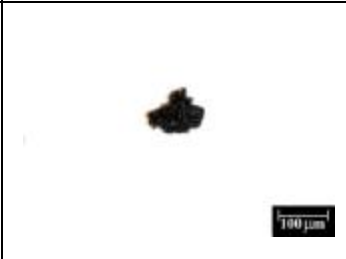
ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลภาคการศึกษารอ

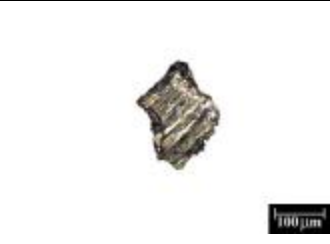
ตารางที่ ค-1 ข้อมูลภาพตัวอย่าง

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
1		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
2		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
3		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
4		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
5		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
6		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

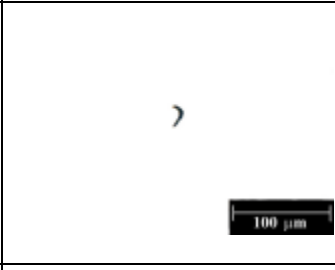
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
7		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
8		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
9		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
10		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
11		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
12		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

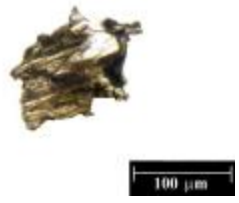
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
13		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
14		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
15		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
16		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
17		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
18		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน

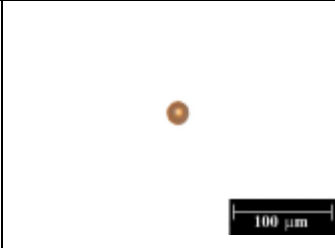
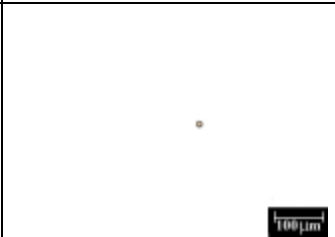
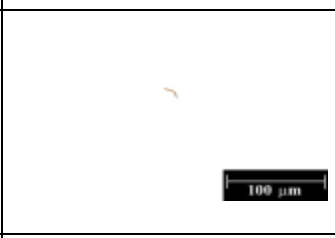
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
19		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
20		320 x 240	10 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
21		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
22		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
23		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
24		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน

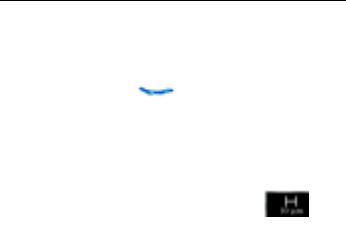
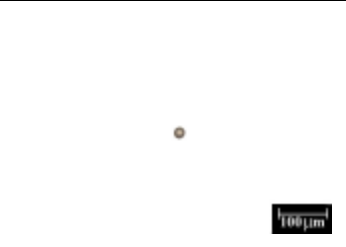
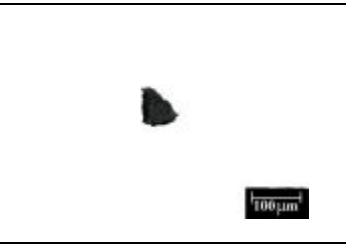
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
25		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
26		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
27		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
28		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
29		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

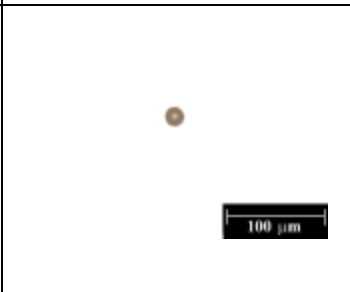
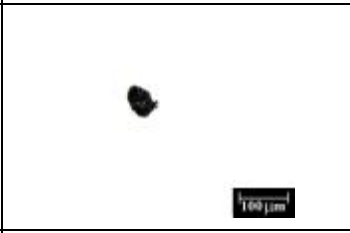
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
30		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
31		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
32		320 x 240	10 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
33		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
34		320 x 240	10 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
35		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
36		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
37		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
38		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
39		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
40		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
41		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

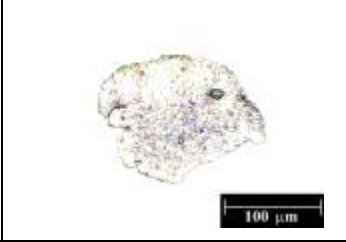
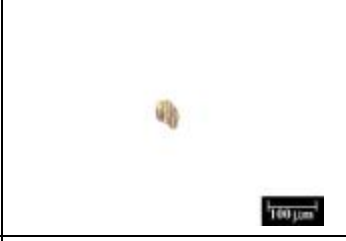
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
42		320 x 240	10 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
43		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
44		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
45		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
46		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
47		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

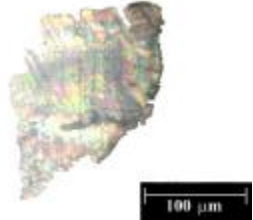
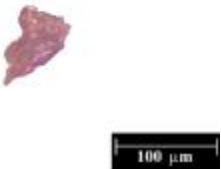
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
48		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
49		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
50		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
51		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
52		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
53		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

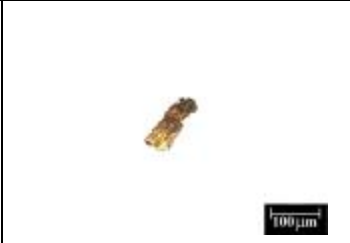
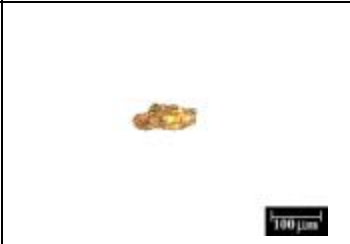
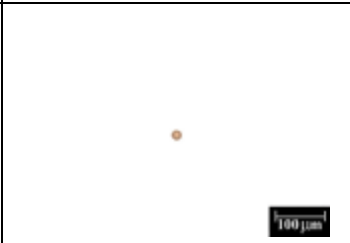
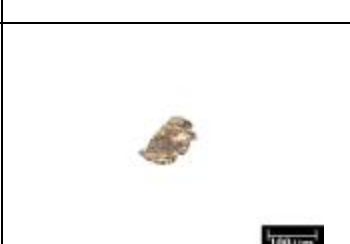
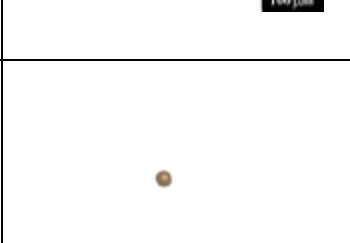
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
54		1662.54 x 1216.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
55		320 x 420	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
56		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
57		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
58		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
59		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

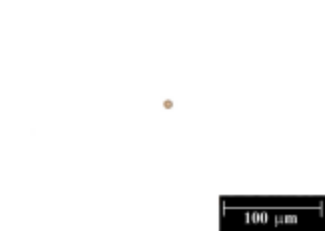
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
60		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
61		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
62		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
63		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
64		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
65		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
66		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
67		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
68		121.08 x 133.33	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
69		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
70		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
71		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
72		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
73		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
74		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
75		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.2 พิกเซล/ไมครอน
76		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
77		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
78		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
79		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
80		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
81		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
82		1026.87 x 767.16	20 x 100	0.67 พิกเซล/ไมครอน
83		1026.87 x 767.16	10 x 200	0.67 พิกเซล/ไมครอน

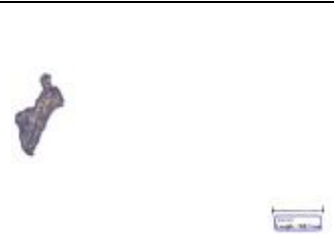
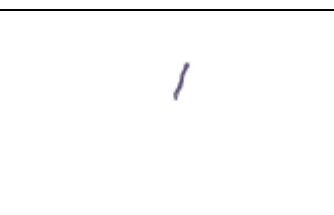
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
84		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
85		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
86		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
87		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
88		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
89		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
90		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
91		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
92		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
93		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
94		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
95		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน

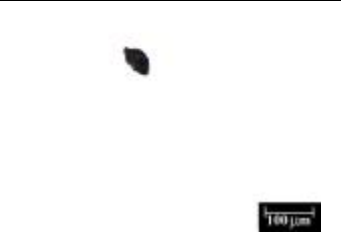
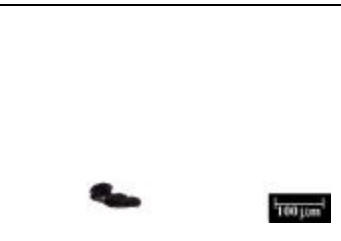
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
96		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
97		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
98		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
99		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
100		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
101		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน

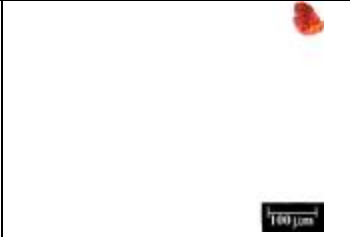
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
102		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
103		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
104		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
105		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
106		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
107		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

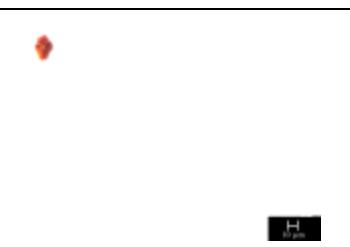
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
108		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
109		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
110		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
111		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
112		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
113		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

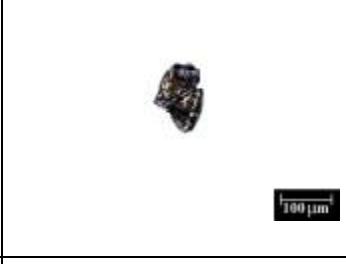
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
114		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
115		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
116		320 x 240	60 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
117		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
118		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
119		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
120		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
121		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
122		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
123		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
124		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
125		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน

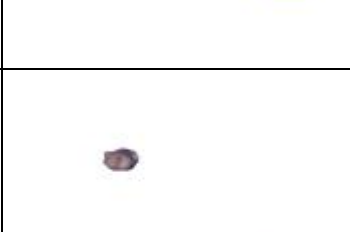
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
126		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
127		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
128		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
129		1622.54 x 1219.9	4 x 300	0.473 พิกเซล/ไมครอน
130		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
131		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
132		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
133		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
134		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
135		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
136		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
137		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน

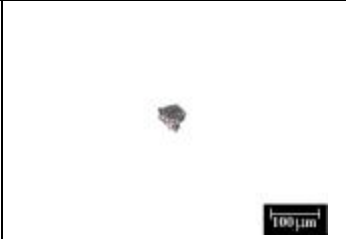
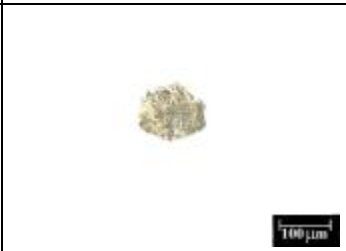
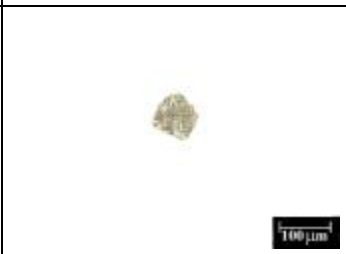
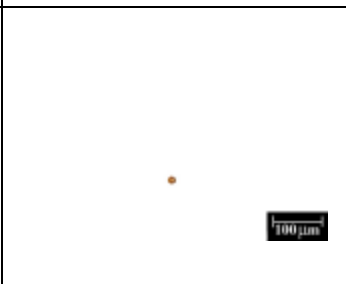
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
138		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
139		409.52 x 305.95	20 x 100	1.68 พิกเซล/ไมครอน
140		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
141		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
142		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
143		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน

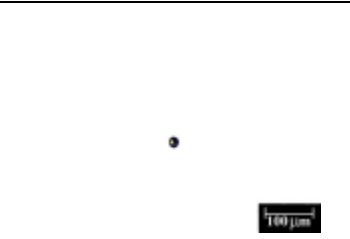
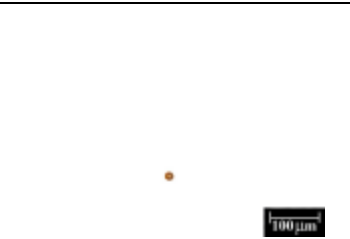
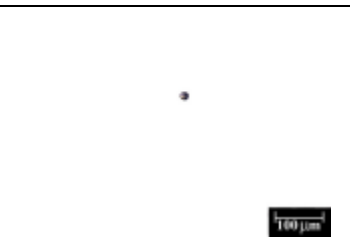
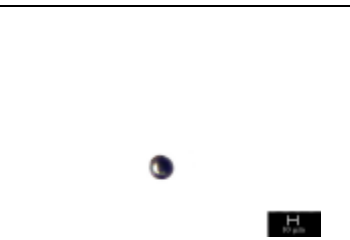
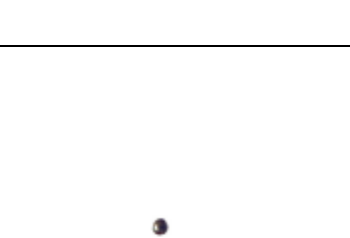
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
144		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
145		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
146		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
147		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
148		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
149		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน

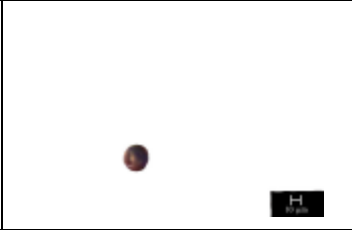
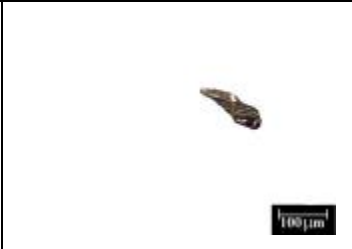
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
150		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
151		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
152		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
153		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
154		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
155		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน

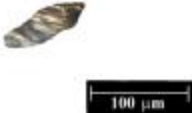
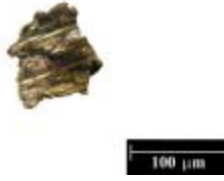
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
156		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
157		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
158		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
159		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
160		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
161		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน

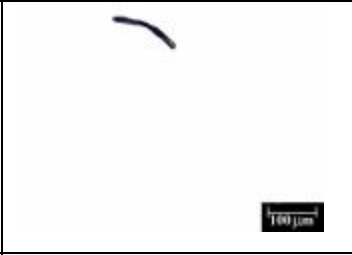
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
162		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
163		320 x 240	20 x 10	2.4 พิกเซล/ไมครอน
164		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
165		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
166		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
167		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
168		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
169		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
170		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
171		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
172		648.30 x 486.22	10 x 100.5	1.234 พิกเซล/ไมครอน
173		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

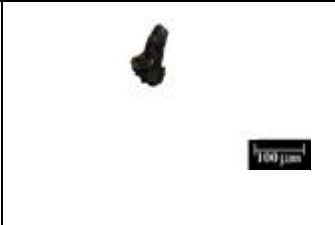
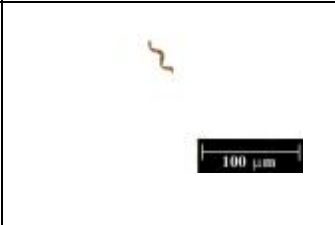
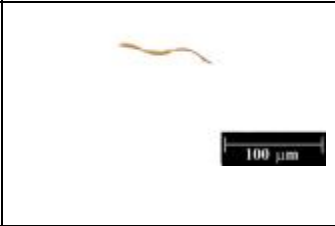
ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
174		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
175		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
176		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
177		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
178		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
179		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-1 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	ความละเอียดภาพ (ไมครอน x ไมครอน)	กำลังขยาย	การเทียบความยาว จุดภาพ/สเกลภาพ
180		640 x 480	10 x 100	1.2 พิกเซล/ไมครอน
181		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
182		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
183		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
184		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน
185		320 x 240	20 x 100	2.4 พิกเซล/ไมครอน

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
1		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.305 0.1717 7.594	0.001 0.975 0.024
2		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.725 0.487 6.293	0.001 0.947 0.052
3		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.188 15.634 30.554	0.999 0.001 0.000
4		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.524 27.60 45.713	1.000 0.000 0.000
5		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	23.07 71.63 89.22	1.000 0.000 0.000
6		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	21.254 2.681 10.489	0.000 0.980 0.020

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
7		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.323 8.367 26.868	0.030 0.970 0.000
8		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	20.34 10.03 28.39	0.000 0.006 0.994
9		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	187.3 175.5 181.3	0.003 0.944 0.053
10		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.314 17.877 31.954	1.000 0.000 0.000
11		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	11.444 6.054 20.778	0.063 0.936 0.001
12		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.618 0.397 5.363	0.000 0.923 0.077

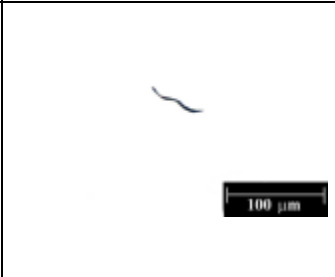
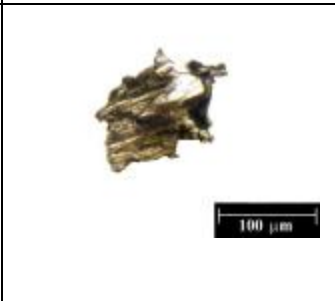
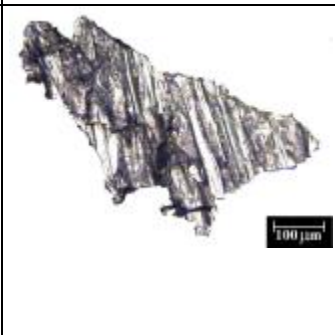
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
13		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.475 12.999 27.072	0.995 0.005 0.000
14		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	6.247 32.327 46.797	1.000 0.000 0.000
15		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	11.695 2.249 5.930	0.008 0.856 0.136
16		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	1.832 20.299 38.721	1.000 0.000 0.000
17		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	20.518 3.926 18.616	0.000 0.999 0.001
18		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.405 21.913 35.269	1.000 0.000 0.000

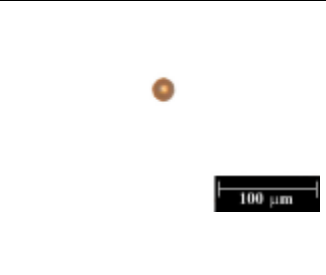
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
19		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	11.206 1.487 6.446	0.007 0.916 0.077
20		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	24.08 73.26 91.06	1.000 0.000 0.000
21		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.731 0.385 5.700	0.000 0.934 0.066
22		เป็นเส้น	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	7.109 6.637 17.957	0.440 0.558 0.002
23		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.849 26.251 44.067	1.000 0.000 0.000
24		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.273 0.756 5.723	0.002 0.921 0.077

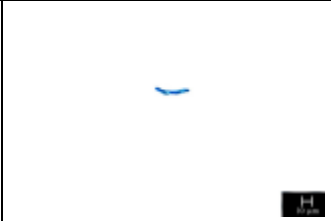
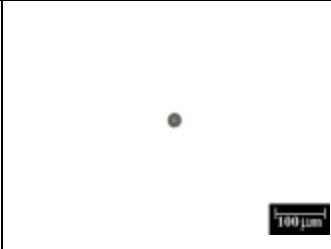
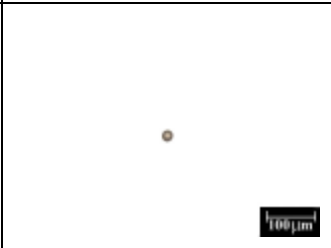
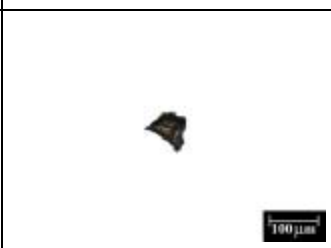
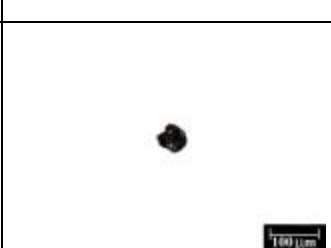
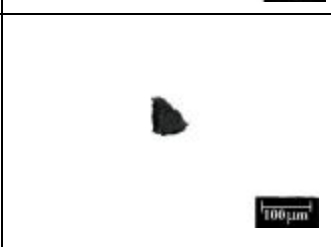
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยุคขีด	ความน่าจะเป็น
25		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	7.088 9.162 26.144	0.738 0.262 0.000
26		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	8.061 41.716 57.823	1.000 0.000 0.000
27		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.707 5.138 22.310	0.003 0.997 0.000
28		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.147 7.704 26.379	0.062 0.938 0.000
29		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	49.11 30.23 45.42	0.000 0.999 0.001

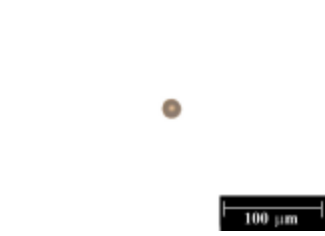
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
30		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	28.642 5.353 0.111	0.000 0.068 0.932
31		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.279 2.023 7.543	0 0.940 0.060
32		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.562 18.833 33.197	1 0.000 0.000
33		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	31.363 7.982 0.075	0.000 0.019 0.981
34		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.512 19.469 33.147	1 0.000 0.000
35		เป็นเส้น	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	8.059 4.573 13.879	0.148 0.844 0.008

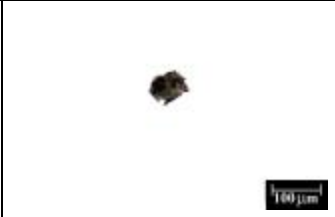
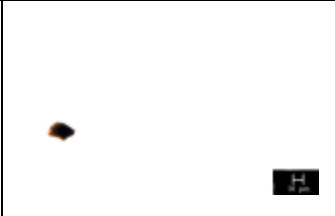
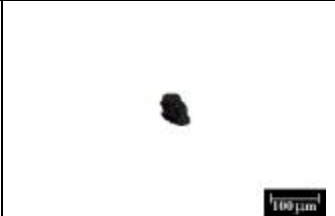
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
36		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.159 14.007 26.777	0.997 0.003 0.000
37		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	31.105 7.011 0.056	0.000 0.030 0.970
38		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.780 7.115 0.020	0.000 0.028 0.972
39		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.386 0.330 5.086	0.000 0.915 0.085
40		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	25.883 3.437 0.760	0.000 0.208 0.792
41		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.859 0.957 3.157	0.000 0.750 0.250

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
42		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	9.646 43.561 59.361	1 0.000 0.000
43		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.784 0.964 7.920	0.001 0.969 0.030
44		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.43 18.86 37.98	0.938 0.062 0.000
45		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.154 6.555 0.034	0.000 0.036 0.964
46		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	20.852 1.249 2.362	0.000 0.636 0.364
47		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.249 0.637 3.457	0.000 0.804 0.196

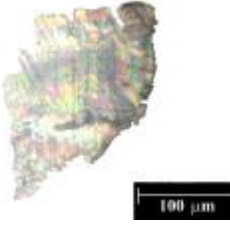
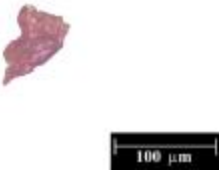
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
48		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	25.507 4.989 12.813	0.000 0.980 0.020
49		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.689 0.559 6.998	0.000 0.961 0.039
50		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.991 2.758 1.416	0.000 0.338 0.662
51		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.998 1.657 2.097	0.000 0.555 0.445
52		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	25.446 3.250 3.430	0.000 0.523 0.477
53		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	181.8 152.7 154.7	0.000 0.735 0.265

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
54		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	150.6 129.9 143.8	0.000 0.999 0.001
55		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.737 2.055 13.900	0.000 0.997 0.003
56		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.346 1.113 9.376	0.000 0.984 0.016
57		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.380 0.677 10.822	0.001 0.993 0.006
58		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.063 3.395 16.906	0.001 0.998 0.001
59		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	21.296 5.127 20.984	0.000 0.999 0.000

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
60		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.647 4.362 20.857	0.001 0.999 0.000
61		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	22.731 6.203 23.401	0.000 1 0.000
62		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.546 0.190 5.845	0.001 0.943 0.056
63		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.989 2.502 16.475	0.002 0.997 0.001
64		เป็นเส้น	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	7.498 6.301 22.654	0.355 0.645 0.000
65		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	8.882 3.237 16.612	0.056 0.943 0.001

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
66		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.739 6.933 25.386	0.032 0.968 0.000
67		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	12.782 3.014 17.823	0.008 0.992 0.001
68		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.098 9.254 26.484	0.019 0.980 0.000
69		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.145 6.532 0.003	0.000 0.037 0.963
70		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.328 0.431 9.389	0.000 0.988 0.011
71		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.413 6.955 0.005	0.000 0.030 0.970

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
72		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.703 6.809 0.006	0.000 0.032 0.968
73		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.844 7.799 0.078	0.000 0.021 0.979
74		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.006 0.826 3.695	0.000 0.807 0.192
75		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	9.391 7.836 23.782	0.001 0.999 0.000
76		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.746 10.019 24.262	0.990 0.010 0.000
77		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.660 4.470 17.587	0.600 0.400 0.000

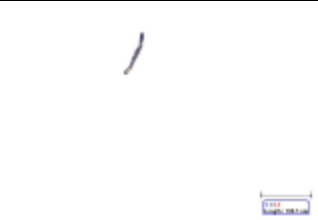
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยุคขีด	ความน่าจะเป็น
78		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	8.697 4.386 18.405	0.104 0.895 0.001
79		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.910 2.378 1.322	0.000 0.371 0.629
80		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.616 0.684 4.448	0.000 0.868 0.132
81		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.138 4.815 17.489	0.698 0.302 0.001
82		เป็นเส้น	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	4.909 3.326 12.348	0.310 0.683 0.008
83		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	1.373 7.425 20.236	0.954 0.046 0.000

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพถ่ายอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะ เป็น
84		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.095 6.092 17.523	0.880 0.119 0.000
85		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.008 1.109 2.816	0.000 0.701 0.299
86		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.266 4.920 16.973	0.695 0.304 0.001
87		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.063 33.642 52.146	1 0.000 0.000
88		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.346 18.887 34.846	1 0.000 0.000
89		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.616 0.434 4.637	0.001 0.890 0.109

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
90		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.495 14.951 29.028	0.999 0.001 0.000
91		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.240 17.146 32.121	1 0.000 0.000
92		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	10.605 1.541 11.899	0.011 0.984 0.006
93		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.860 11.319 24.217	0.995 0.005 0.000
94		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.463 12.733 26.700	0.998 0.002 0.000
95		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.800 1.066 10.304	0.001 0.989 0.010

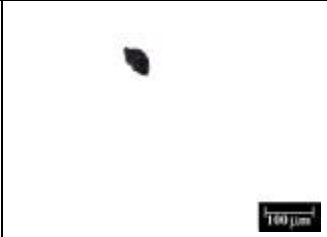
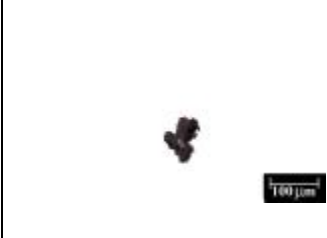
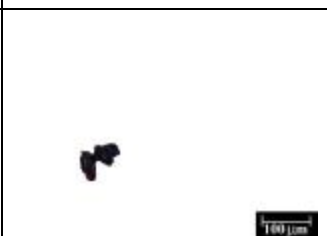
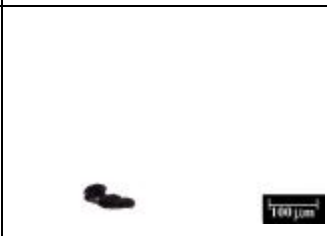
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
96		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.642 0.197 5.785	0.001 0.942 0.058
97		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.936 28.526 46.145	1 0.000 0.000
98		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.256 1.398 10.620	0.001 0.990 0.010
99		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.662 1.345 2.567	0.000 0.648 0.352
100		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.546 1.182 2.721	0.000 0.650 0.350
101		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.433 4.814 18.555	0.005 0.994 0.001

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
102		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.847 1.517 4.388	0.000 0.808 0.192
103		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.987 0.186 7.235	0.001 0.970 0.029
104		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.944 0.7341 3.246	0.000 0.778 0.222
105		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.895 0.529 7.748	0.000 0.973 0.026
106		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	10.737 0.787 10.533	0.007 0.986 0.008
107		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.105 0.523 4.519	0.000 0.880 0.119

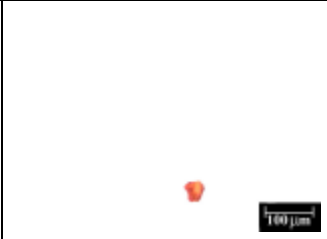
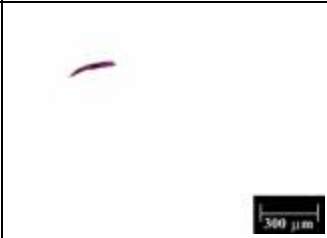
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
108		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.767 2.482 1.845	0.000 0.421 0.579
109		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.354 0.322 7.909	0.000 0.978 0.022
110		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	14.446 0.605 9.630	0.001 0.988 0.011
111		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	10.666 0.557 8.088	0.006 0.971 0.022
112		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	24.688 3.740 1.165	0.000 0.216 0.784
113		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.893 1.882 2.150	0.000 0.533 0.466

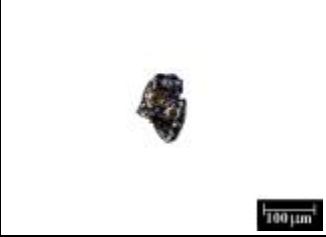
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
114		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.557 1.188 2.469	0.000 0.655 0.345
115		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.012 1.337 4.873	0.002 0.852 0.145
116		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	12.880 1.120 4.529	0.002 0.844 0.154
117		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.966 1.940 1.691	0.000 0.469 0.531
118		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	22.147 1.996 1.500	0.000 0.438 0.562
119		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.929 0.590 6.512	0.000 0.951 0.049

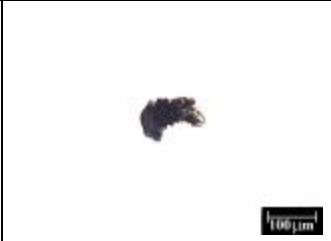
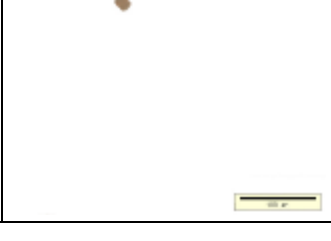
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
120		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	24.7561 3.3136 0.6295	0.000 0.207 0.793
121		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.5390 0.8157 4.4193	0.001 0.857 0.141
122		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	20.624 2.729 1.388	0.000 0.338 0.662
123		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.69 33.89 54.89	1.000 0.000 0.000
124		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	4.398 14.287 31.236	0.993 0.007 0.000
125		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	4.895 14.589 31.366	0.992 0.008 0.000

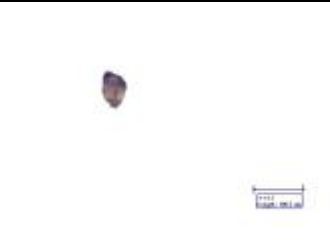
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
126		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.95 28.34 48.86	0.985 0.015 0.000
127		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	10.17 11.67 27.03	0.680 0.320 0.000
128		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	9.042 17.293 35.019	0.984 0.016 0.000
129		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	11.420 15.970 33.200	0.907 0.093 0.000
130		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.429 0.856 5.257	0.000 0.900 0.100
131		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.294 0.602 4.915	0.001 0.896 0.104

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
132		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.946 3.541 18.490	0.001 0.998 0.001
133		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	26.362 4.286 0.299	0.000 0.120 0.880
134		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	26.036 4.085 0.341	0.000 0.133 0.687
135		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	16.366 0.916 3.708	0.000 0.801 0.198
136		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	23.983 3.338 0.669	0.000 0.208 0.792
137		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	25.793 4.884 0.198	0.000 0.088 0.912

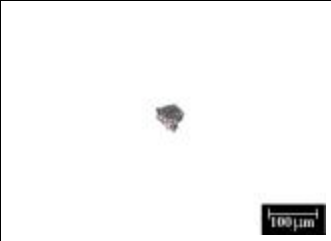
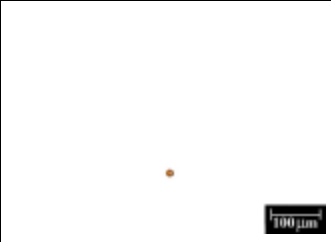
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
138		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.219 1.072 3.470	0.000 0.768 0.232
139		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.780 1.524 2.370	0.000 0.604 0.396
140		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	13.975 3.761 15.510	0.006 0.991 0.003
141		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.033 0.870 3.412	0.000 0.781 0.219
142		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	21.628 2.847 1.345	0.000 0.321 0.679
143		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	23.542 3.766 0.979	0.000 0.199 0.801

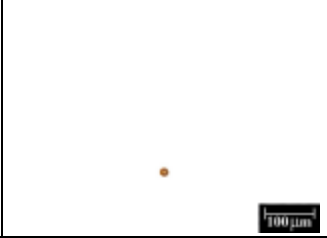
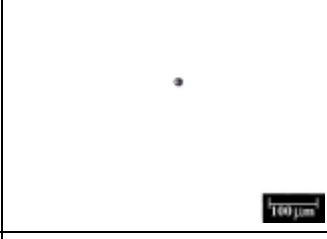
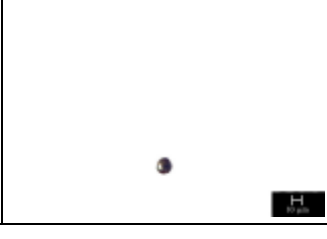
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
144		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.567 1.437 8.697	0.000 0.974 0.026
145		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	17.584 1.549 2.725	0.000 0.643 0.357
146		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	22.207 3.059 0.907	0.000 0.254 0.746
147		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	19.110 1.806 2.480	0.000 0.583 0.416
148		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.991 1.395 3.060	0.000 0.697 0.303
149		ผิดปกติ	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	24.158 3.015 0.801	0.000 0.249 0.751

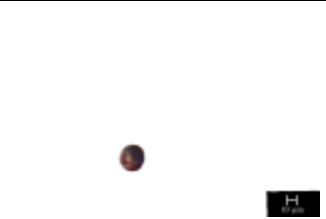
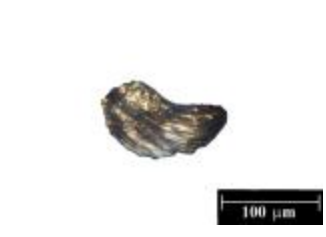
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
150		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	18.706 1.158 8.135	0.000 0.970 0.030
151		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	23.669 7.808 25.259	0.000 0.999 0.000
152		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	23.811 7.063 22.663	0.000 0.999 0.000
153		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	23.65 10.19 28.19	0.001 0.999 0.000
154		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	28.565 5.810 0.079	0.000 0.054 0.946
155		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.622 7.148 0.018	0.000 0.028 0.972

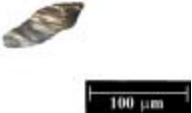
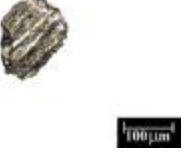
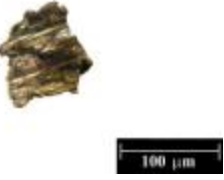
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
156		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.1818 6.6349 0.0101	0.000 0.035 0.965
157		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	29.4791 6.5185 0.0053	0.000 0.037 0.963
158		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	29.7445 6.9090 0.0134	0.000 0.031 0.969
159		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.6441 7.2301 0.0137	0.000 0.026 0.974
160		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	29.9041 6.1500 0.0247	0.000 0.045 0.955
161		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	28.7320 5.7945 0.0780	0.000 0.054 0.946

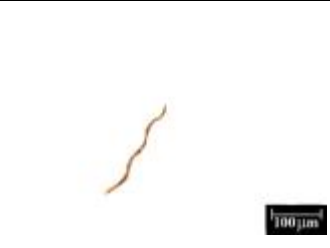
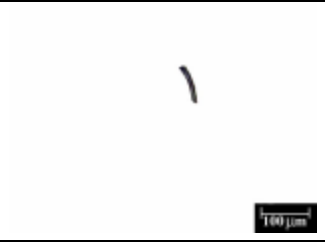
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
162		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.523 6.726 0.024	0.000 0.034 0.966
163		ทรงกลม	ทรงกลม	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	30.3780 6.8383 0.0022	0.000 0.032 0.968
164		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	11.007 2.013 10.409	0.011 0.975 0.015
165		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	7.554 2.148 14.128	0.063 0.935 0.002
166		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	15.511 0.292 8.717	0.000 0.985 0.015
167		ผิดปกติ	ผิดปกติ	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	8.118 2.012 13.720	0.045 0.952 0.003

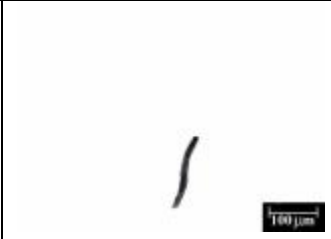
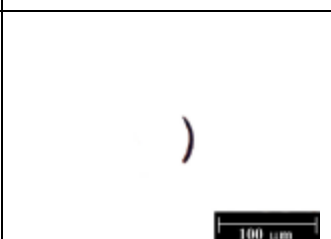
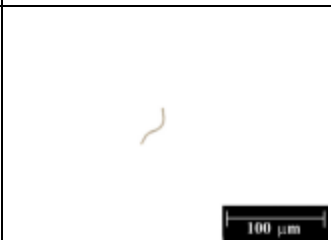
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
168		ผิปกติ	ผิปกติ	เป็นเส้น ผิปกติ ทรงกลม	15.302 0.779 5.330	0.001 0.906 0.093
169		ผิปกติ	ผิปกติ	เป็นเส้น ผิปกติ ทรงกลม	10.118 1.096 6.454	0.010 0.926 0.064
170		ผิปกติ	ผิปกติ	เป็นเส้น ผิปกติ ทรงกลม	20.672 1.931 7.306	0.000 0.936 0.064
171		ผิปกติ	ผิปกติ	เป็นเส้น ผิปกติ ทรงกลม	18.645 2.650 15.378	0.000 0.998 0.002
172		ผิปกติ	ผิปกติ	เป็นเส้น ผิปกติ ทรงกลม	11.986 9.353 25.816	0.211 0.788 0.000
173		ผิปกติ	ผิปกติ	เป็นเส้น ผิปกติ ทรงกลม	38.46 24.51 37.23	0.001 0.997 0.002

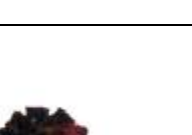
ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยุคขีด	ความน่าจะเป็น
174		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	26.34 75.23 95.03	1.000 0.000 0.000
175		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.347 14.606 30.406	0.999 0.001 0.000
176		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.963 8.443 21.369	0.977 0.023 0.000
177		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.249 6.194 18.047	0.878 0.122 0.000
178		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.107 12.852 27.361	0.998 0.002 0.000
179		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.596 19.296 35.866	1.000 0.000 0.000

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
180		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	0.6724 13.6778 29.4477	0.999 0.001 0.000
181		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	2.870 9.404 21.488	0.963 0.037 0.000
182		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	1.537 15.658 29.792	0.999 0.001 0.000
183		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	3.100 9.347 22.433	0.958 0.042 0.000
184		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	4.701 31.907 47.627	1.000 0.000 0.000
185		เป็นเส้น	เป็นเส้น	เป็นเส้น ผิดปกติ ทรงกลม	8.629 43.586 60.169	1.000 0.000 0.000

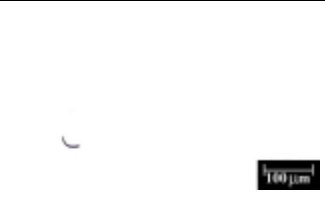
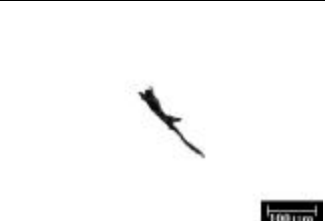
ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
1		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	0.8153 1.6235 5.3290	0.564 0.377 0.059
2		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.297 4.292 7.200	0.784 0.175 0.041
3		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	7.174 1.676 10.168	0.059 0.927 0.013
4		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	8.735 4.088 9.301	0.084 0.853 0.063
5		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	8.128 3.951 8.775	0.102 0.824 0.074
6		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	13.18 20.94 21.75	0.967 0.020 0.013

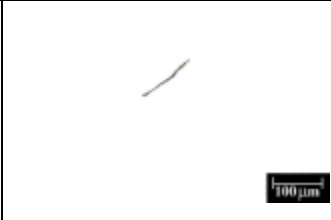
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
7		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.012 5.437 1.574	0.205 0.101 0.694
8		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	10.74 13.99 11.90	0.569 0.112 0.319
9		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	34.28 41.71 29.79	0.095 0.002 0.902
10		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.168 0.903 11.435	0.067 0.928 0.005
11		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.117 1.253 5.454	0.175 0.735 0.090
12		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.199 7.711 4.698	0.741 0.047 0.212

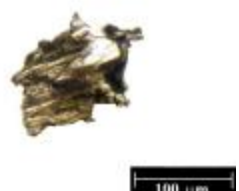
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
13		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	4.707 0.528 10.948	0.110 0.886 0.005
14		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	11.09 11.79 23.55	0.586 0.413 0.001
15		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	2.934 0.521 8.836	0.228 0.761 0.012
16		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.530 0.321 6.087	0.341 0.624 0.035
17		รอยขีดข่วน	รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	7.917 14.166 3.490	0.098 0.004 0.898
18		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	8.802 9.100 20.383	0.536 0.462 0.002

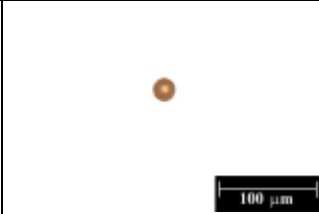
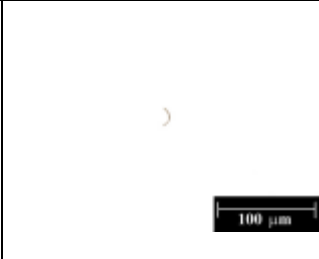
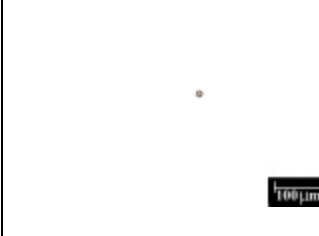
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
19		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	7.098 2.427 8.393	0.084 0.872 0.044
20		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	5.580 0.648 9.949	0.078 0.914 0.009
21		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.599 4.510 3.868	0.643 0.150 0.207
22		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	4.267 0.627 10.958	0.139 0.856 0.005
23		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	7.785 2.605 9.511	0.068 0.904 0.029
24		รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	0.425 1.676 4.079	0.590 0.315 0.095

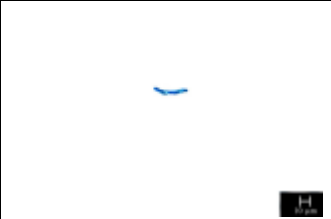
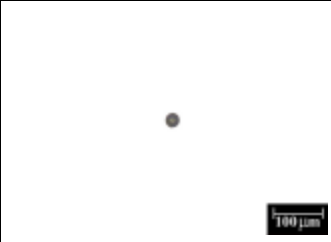
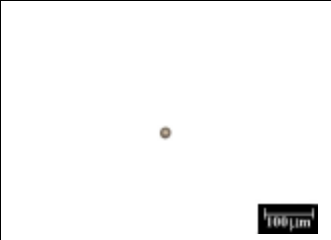
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
25		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.352 0.052 6.344	0.233 0.735 0.032
26		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	10.723 4.033 12.187	0.034 0.950 0.016
27		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	27.43 40.64 15.56	0.003 0.000 0.997
28		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.986 14.076 2.460	0.094 0.003 0.903
29		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	115.92 122.57 89.91	0.000 0.000 1.000

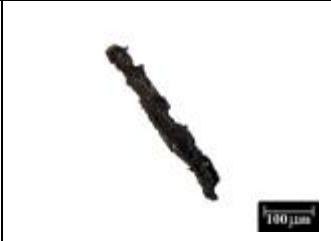
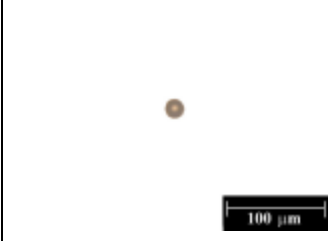
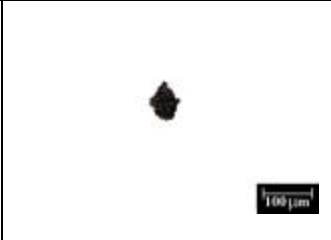
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
30		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.460 0.423 6.470	0.173 0.789 0.038
31		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	2.181 7.473 4.288	0.704 0.050 0.246
32		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	9.242 10.004 21.045	0.593 0.405 0.002
33		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	5.028 2.539 13.738	0.223 0.774 0.003
34		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	8.146 7.689 19.311	0.442 0.556 0.002
35		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	8.120 1.996 11.251	0.044 0.946 0.009

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
36		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.003 1.474 8.434	0.092 0.881 0.027
37		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.1606 0.9407 10.0930	0.068 0.923 0.009
38		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.7354 0.6615 10.6499	0.073 0.921 0.006
39		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.4958 0.7874 6.0930	0.396 0.564 0.040
40		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.9888 0.6048 7.3458	0.326 0.651 0.022
41		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.799 4.473 10.434	0.687 0.298 0.015

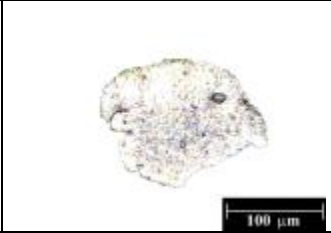
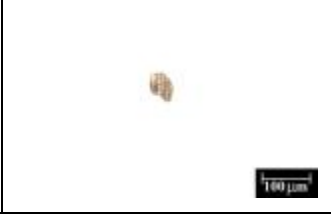
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
42		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.399 1.513 11.274	0.279 0.716 0.005
43		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.107 6.077 5.388	0.833 0.069 0.098
44		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.111 6.694 5.408	0.849 0.052 0.099
45		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	5.304 0.986 8.129	0.101 0.874 0.025
46		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	2.104 0.918 7.674	0.348 0.630 0.022
47		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.300 0.157 7.637	0.169 0.812 0.019

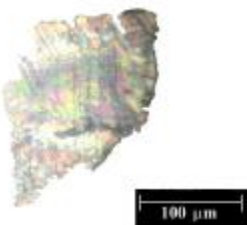
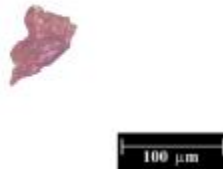
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
48		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.373 9.587 5.125	0.781 0.021 0.197
49		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.518 1.292 5.949	0.449 0.502 0.049
50		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	14.850 6.743 15.393	0.017 0.970 0.013
51		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.9548 0.8253 7.5753	0.355 0.624 0.021
52		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.380 6.840 4.713	0.797 0.052 0.151
53		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	68.32 70.55 51.88	0.000 0.000 1.000

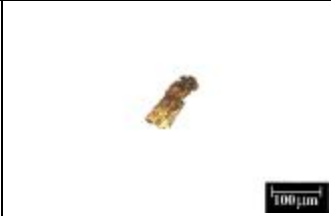
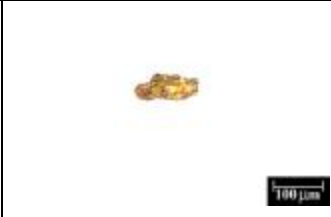
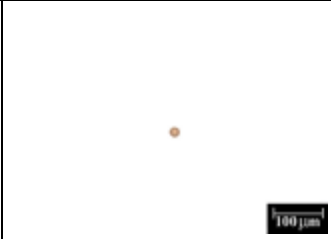
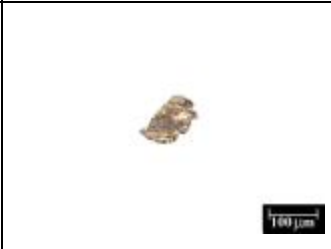
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
54		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.778 8.471 4.967	0.808 0.028 0.164
55		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	91.79 93.72 107.16	0.724 0.275 0.000
56		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.397 1.556 6.528	0.119 0.813 0.068
57		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.807 13.999 3.755	0.178 0.005 0.817
58		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.581 14.557 3.851	0.295 0.003 0.701
59		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.357 10.434 1.968	0.153 0.012 0.835

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
60		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	84.83 96.01 78.88	0.049 0.000 0.951
61		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	15.473 24.645 7.522	0.018 0.000 0.981
62		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.587 1.439 3.598	0.533 0.348 0.118
63		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.066 5.472 5.542	0.822 0.091 0.088
64		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.439 0.912 8.290	0.092 0.886 0.022
65		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.964 3.469 3.959	0.663 0.189 0.148

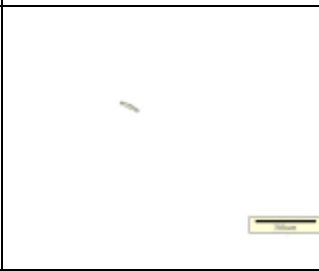
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
66		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.809 0.900 3.945	0.343 0.540 0.118
67		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.219 2.715 1.919	0.459 0.217 0.324
68		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.759 4.355 2.293	0.613 0.102 0.285
69		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.159 1.039 11.298	0.173 0.822 0.005
70		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.214 4.130 1.355	0.462 0.108 0.431
71		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.954 1.007 9.248	0.077 0.909 0.015

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
72		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	2.468 0.008 6.869	0.221 0.755 0.024
73		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	4.229 1.827 12.222	0.230 0.765 0.004
74		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.334 1.482 5.358	0.485 0.450 0.065
75		รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.672 2.534 1.891	0.393 0.255 0.352
76		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.471 1.597 2.413	0.390 0.366 0.244
77		รอยขีดข่วน	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	7.867 3.738 6.945	0.096 0.753 0.152

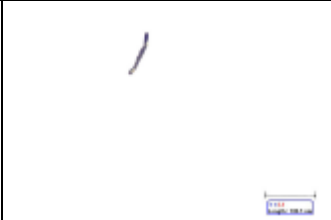
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
78		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.329 3.129 1.698	0.447 0.182 0.372
79		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	9.391 3.841 9.482	0.056 0.891 0.053
80		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.825 6.690 6.898	0.784 0.114 0.102
81		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	7.666 3.317 7.254	0.091 0.798 0.111
82		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.955 3.681 14.053	0.345 0.652 0.004
83		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.929 0.788 10.961	0.171 0.824 0.005

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
84		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.854 0.573 4.832	0.320 0.608 0.072
85		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.384 1.276 4.574	0.226 0.649 0.125
86		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.890 1.249 2.801	0.450 0.376 0.173
87		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	27.80 31.13 33.20	0.796 0.150 0.053
88		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.480 0.988 8.099	0.093 0.882 0.025
89		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.010 1.121 6.829	0.119 0.833 0.048

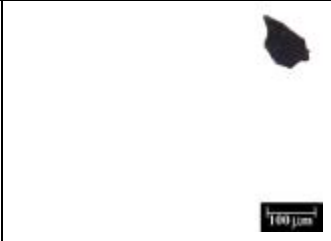
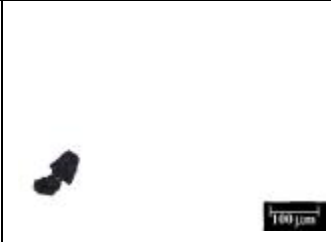
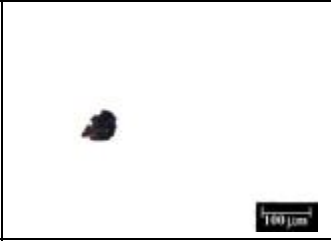
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
90		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	6.826 1.154 11.386	0.055 0.939 0.006
91		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	6.504 1.127 10.220	0.063 0.927 0.010
92		รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	0.777 1.711 2.633	0.495 0.310 0.195
93		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	6.732 1.084 11.273	0.056 0.939 0.006
94		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	6.776 1.182 11.126	0.057 0.936 0.006
95		รอยขีดข่วน	รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.836 3.640 1.420	0.379 0.154 0.467

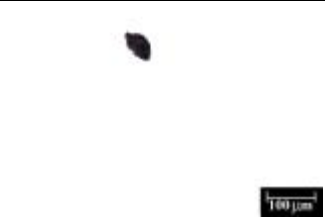
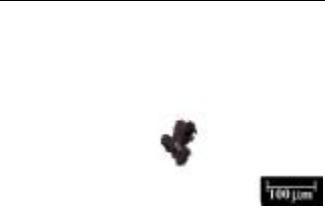
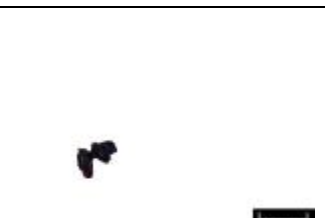
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
96		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	14.609 7.966 12.835	0.032 0.890 0.078
97		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.6397 0.2683 6.9125	0.152 0.819 0.030
98		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.155 10.028 11.439	0.823 0.119 0.059
99		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.648 3.092 7.209	0.646 0.314 0.040
100		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.763 4.144 6.202	0.708 0.215 0.077
101		ผิวหยาบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.471 1.797 4.561	0.257 0.594 0.149

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
102		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.782 6.701 12.843	0.804 0.187 0.009
103		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.933 5.188 11.306	0.747 0.242 0.011
104		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.221 2.942 7.344	0.680 0.288 0.032
105		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.381 2.027 7.916	0.567 0.411 0.022
106		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.944 4.825 9.080	0.791 0.187 0.022
107		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.102 1.552 9.121	0.426 0.561 0.013

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
108		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.856 1.868 8.532	0.493 0.490 0.017
109		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.166 3.483 6.889	0.729 0.229 0.042
110		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.292 4.523 11.569	0.643 0.347 0.010
111		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	0.929 3.418 6.532	0.741 0.214 0.045
112		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	0.511 2.033 3.932	0.607 0.283 0.110
113		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	1.399 0.392 5.836	0.362 0.599 0.039

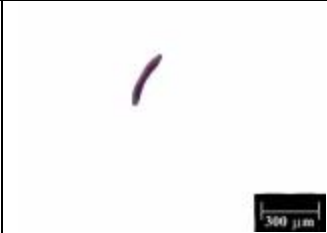
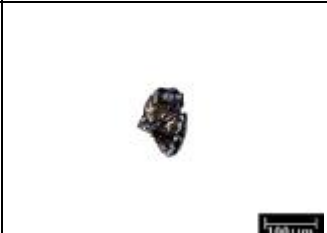
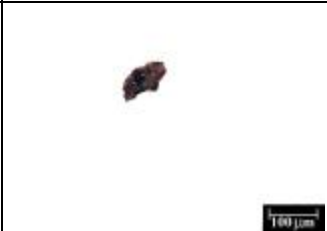
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
114		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.353 1.664 3.680	0.461 0.395 0.144
115		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.962 1.905 6.670	0.595 0.371 0.034
116		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.459 1.304 3.132	0.398 0.430 0.172
117		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.813 1.163 6.842	0.132 0.820 0.048
118		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.101 0.778 5.609	0.439 0.515 0.046
119		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.046 0.447 4.682	0.286 0.637 0.077

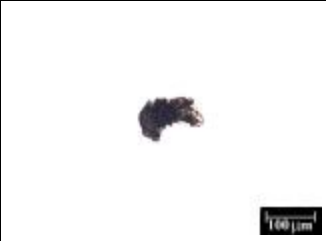
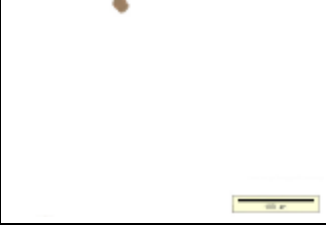
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
120		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	5.772 1.442 7.576	0.099 0.861 0.040
121		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.740 0.316 7.029	0.148 0.823 0.029
122		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	4.868 0.928 7.185	0.118 0.845 0.037
123		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	0.600 0.957 4.440	0.504 0.422 0.074
124		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.750 0.319 8.255	0.150 0.834 0.016
125		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.519 0.726 5.946	0.187 0.757 0.056

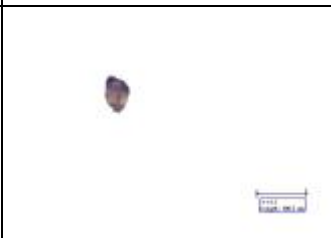
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
126		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.340 2.735 2.856	0.630 0.190 0.179
127		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.090 0.418 4.991	0.393 0.551 0.056
128		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.750 0.238 5.155	0.302 0.643 0.055
129		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.979 0.814 3.883	0.431 0.468 0.101
130		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.321 7.048 3.630	0.620 0.058 0.322
131		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.094 3.589 6.056	0.729 0.210 0.061

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
132		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.368 5.474 9.090	0.802 0.170 0.028
133		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.748 0.674 5.539	0.349 0.598 0.053
134		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.263 0.433 6.078	0.274 0.685 0.041
135		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.494 1.528 7.780	0.371 0.602 0.026
136		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.287 0.470 7.584	0.192 0.786 0.022
137		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.265 0.332 8.649	0.121 0.865 0.014

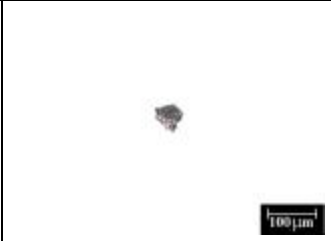
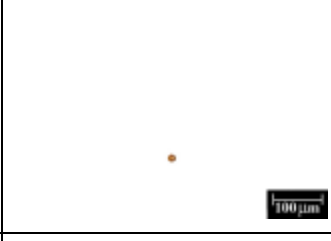
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
138		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.773 0.650 7.448	0.251 0.725 0.024
139		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.555 0.803 7.001	0.285 0.684 0.031
140		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.332 1.386 3.108	0.419 0.408 0.173
141		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.411 1.197 4.518	0.555 0.374 0.071
142		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.420 0.399 4.844	0.351 0.585 0.063
143		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.681 0.554 4.678	0.336 0.589 0.075

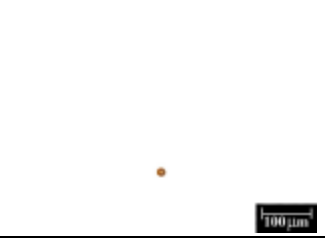
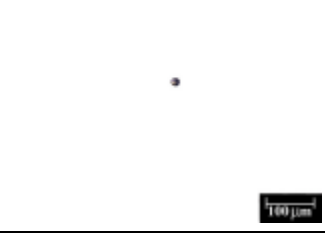
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
144		ผิวหยาบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.327 1.477 6.583	0.119 0.817 0.064
145		ผิวหยาบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.79 0.9113 4.403	0.249 0.639 0.112
146		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.172 0.955 7.475	0.105 0.862 0.033
147		ผิวหยาบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.763 1.106 3.452	0.355 0.493 0.152
148		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.078 0.876 4.876	0.226 0.681 0.092
149		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.822 1.419 7.515	0.096 0.863 0.041

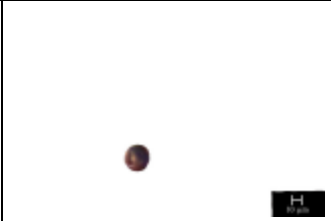
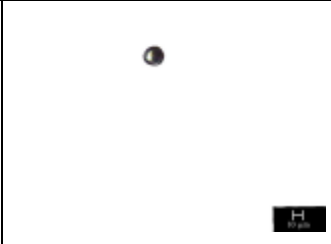
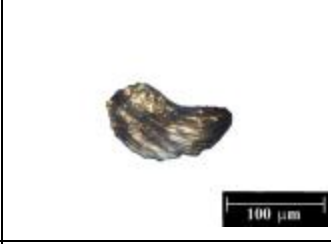
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
150		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	2.458 0.099 6.066	0.226 0.736 0.037
151		รอยขีดข่วน	รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	6.119 10.092 1.598	0.093 0.013 0.894
152		รอยขีดข่วน	รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	3.700 3.803 2.289	0.252 0.239 0.509
153		รอยขีดข่วน	รอยขีดข่วน	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	10.407 16.596 3.056	0.025 0.001 0.974
154		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	4.742 0.962 11.958	0.131 0.866 0.004
155		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดข่วน	6.505 1.011 10.746	0.060 0.933 0.007

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
156		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.277 0.232 8.799	0.115 0.872 0.012
157		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	6.732 1.039 11.511	0.055 0.940 0.005
158		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.941 0.505 10.780	0.098 0.897 0.005
159		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.853 0.703 11.217	0.070 0.925 0.005
160		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.323 0.747 5.302	0.405 0.540 0.055
161		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.692 0.399 8.658	0.103 0.883 0.014

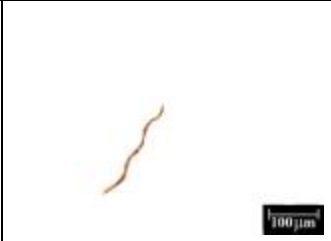
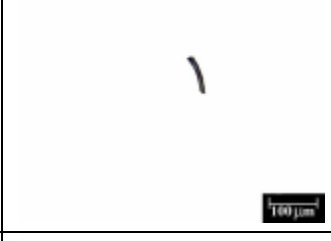
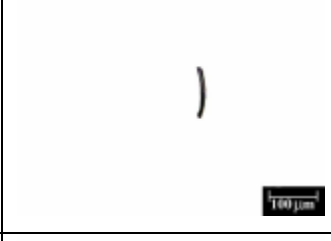
ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
162		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.001 1.102 5.910	0.491 0.467 0.042
163		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.922 0.236 8.338	0.204 0.782 0.014
164		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.024 4.467 1.324	0.490 0.088 0.422
165		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.715 3.312 3.996	0.682 0.186 0.132
166		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	31.79 46.46 20.35	0.003 0.000 0.997
167		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.030 9.960 1.955	0.258 0.013 0.729

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
168		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.515 3.227 1.565	0.417 0.177 0.406
169		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.601 7.380 2.056	0.416 0.038 0.546
170		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	13.614 22.355 5.268	0.015 0.000 0.985
171		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	34.37 49.37 22.63	0.003 0.000 0.997
172		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	8.322 17.027 6.616	0.298 0.004 0.698
173		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	98.99 99.75 84.56	0.001 0.001 0.999

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
174		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.207 0.742 7.808	0.147 0.829 0.024
175		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	0.550 1.205 4.341	0.534 0.385 0.080
176		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.537 0.372 6.601	0.348 0.624 0.028
177		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.787 0.199 8.850	0.141 0.848 0.011
178		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.444 0.581 9.337	0.191 0.799 0.010
179		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	2.379 1.129 8.498	0.343 0.641 0.016

ตารางที่ ค-3 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
180		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	1.305 0.975 6.427	0.443 0.523 0.034
181		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	4.218 0.237 8.480	0.119 0.867 0.014
182		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.238 1.356 12.245	0.125 0.871 0.004
183		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.128 0.358 9.183	0.198 0.792 0.010
184		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	3.635 1.851 11.593	0.289 0.705 0.005
185		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ ผิวเรียบ รอยขีดยาว	5.951 1.331 11.764	0.090 0.905 0.005

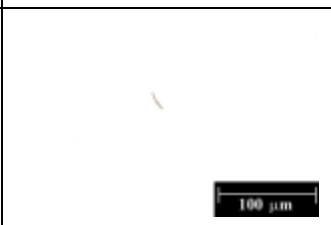
ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานการสึกหรอด้วยวิธีจำแนกกลุ่ม

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สัณฐาน	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
1		ผิวใหม่	ผิวใหม่	สนิมดำ ทองแดง ผิวใหม่ สนิมแดง เหล็ก	5.555 54.455 4.695 30.540 24.606	0.394 0.000 0.606 0.000 0.000
2		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวใหม่ สนิมแดง เหล็ก	2.530 48.685 14.025 36.661 31.988	0.997 0.000 0.003 0.000 0.000
3		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวใหม่ สนิมแดง เหล็ก	37.964 29.747 22.432 3.653 12.044	0.000 0.000 0.000 0.985 0.015
4		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวใหม่ สนิมแดง เหล็ก	32.291 14.030 18.908 0.722 9.528	0.000 0.001 0.000 0.987 0.012
5		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวใหม่ สนิมแดง เหล็ก	61.253 39.458 42.506 6.858 20.047	0.000 0.000 0.000 0.999 0.001
6		ผิวใหม่	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวใหม่ สนิมแดง เหล็ก	10.15 36.67 11.72 25.54 24.32	0.687 0.000 0.313 0.000 0.001

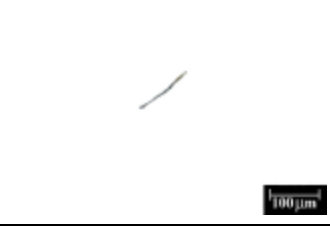
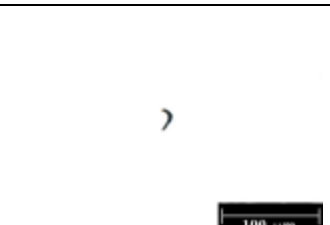
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
7		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	54.708 58.453 28.157 24.615 3.973	0.000 0.000 0.000 0.000 1.000
8		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	31.833 55.878 12.424 24.391 6.491	0.000 0.000 0.049 0.000 0.951
9		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	14.864 58.057 9.265 36.178 25.665	0.057 0.000 0.942 0.000 0.000
10		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.715 53.071 8.363 38.368 29.449	0.965 0.000 0.035 0.000 0.000
11		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	30.734 20.537 17.082 1.398 8.060	0.000 0.000 0.000 0.965 0.035
12		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	9.061 56.215 28.472 54.925 49.976	1.000 0.000 0.000 0.000 0.000

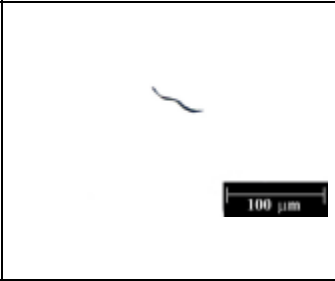
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
13		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	7.202 46.918 4.341 38.835 36.425	0.193 0.000 0.807 0.000 0.000
14		เหล็ก	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	40.627 31.538 22.653 2.983 3.979	0.000 0.000 0.000 0.622 0.378
15		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	71.781 28.372 53.904 8.846 28.742	0.000 0.000 0.000 1.000 0.000
16		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	5.601 56.466 26.228 54.590 52.728	1.000 0.000 0.000 0.000 0.000
17		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	25.599 39.071 12.104 11.221 1.089	0.000 0.000 0.004 0.006 0.990
18		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	38.138 38.068 18.888 8.088 0.314	0.000 0.000 0.000 0.020 0.980

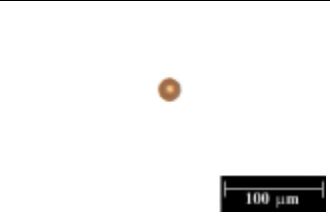
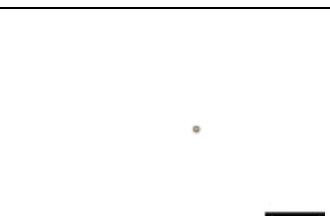
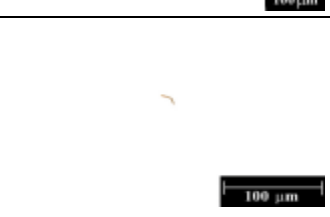
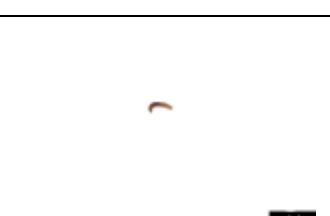
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
19		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	31.446 16.630 18.343 0.772 9.841	0.000 0.000 0.000 0.989 0.011
20		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	11.029 49.807 3.288 25.571 12.414	0.020 0.000 0.970 0.000 0.010
21		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	24.385 22.008 13.097 5.608 11.193	0.000 0.000 0.022 0.921 0.056
22		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	45.18 87.50 24.82 42.41 36.77	0.000 0.000 0.997 0.000 0.003
23		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	19.478 41.010 12.424 22.771 8.853	0.004 0.000 0.143 0.001 0.852
24		ผิวไหม้	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	18.878 31.065 11.024 18.353 9.925	0.007 0.000 0.360 0.009 0.624

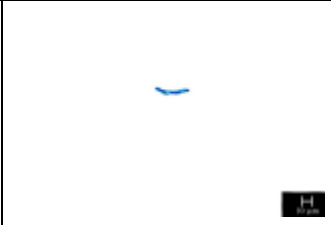
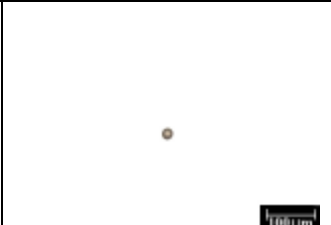
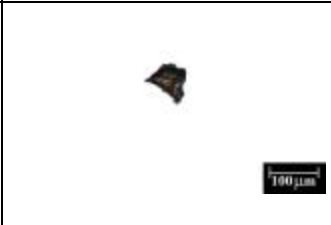
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
25		ผิวไหม้	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	10.41 65.89 10.85 41.30 39.81	0.554 0.000 0.446 0.000 0.000
26		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	35.97 72.39 14.93 39.65 33.27	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
27		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	25.104 35.160 13.254 6.871 5.500	0.000 0.000 0.014 0.331 0.656
28		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	23.419 29.943 11.424 6.876 2.381	0.000 0.000 0.010 0.095 0.896
29		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	19.637 56.950 9.203 31.817 18.676	0.005 0.000 0.986 0.000 0.009

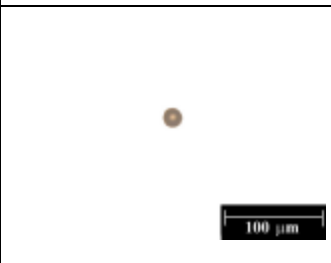
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
30		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.402 16.008 27.068 0.235 12.476	0.000 0.000 0.000 0.997 0.002
31		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.508 58.177 14.223 49.421 45.130	0.998 0.000 0.002 0.000 0.000
32		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	37.817 35.506 18.248 9.111 0.459	0.000 0.000 0.000 0.013 0.987
33		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	37.668 40.815 18.294 9.780 0.087	0.000 0.000 0.000 0.008 0.992
34		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	60.103 18.346 45.104 4.969 28.443	0.000 0.001 0.000 0.999 0.000
35		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	17.544 21.710 9.779 10.626 11.045	0.009 0.001 0.453 0.296 0.240

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
36		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	90.02 89.39 53.96 82.43 76.14	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
37		ผิวไหม้	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	18.975 44.177 10.471 20.733 6.002	0.001 0.000 0.096 0.001 0.902
38		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	31.438 37.547 14.799 9.521 0.318	0.000 0.000 0.001 0.010 0.989
39		ผิวไหม้	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	7.526 38.776 8.394 21.011 16.183	0.602 0.000 0.390 0.001 0.008
40		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	3.639 46.520 15.773 36.678 34.127	0.998 0.000 0.002 0.000 0.000
41		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.566 48.280 11.636 34.079 29.203	0.994 0.000 0.006 0.000 0.000

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
42		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	67.20 40.52 46.75 11.87 31.79	0.000 0.000 0.000 1.000 0.000
43		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	4.886 49.772 19.676 43.747 38.836	0.999 0.000 0.001 0.000 0.000
44		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	5.334 40.664 10.499 26.831 23.304	0.930 0.000 0.070 0.000 0.000
45		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	29.982 29.417 14.614 5.754 1.304	0.000 0.000 0.001 0.097 0.901
46		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	2.546 62.107 19.803 55.472 53.975	1.000 0.000 0.000 0.000 0.000
47		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	4.141 46.751 17.096 39.308 36.179	0.998 0.000 0.002 0.000 0.000

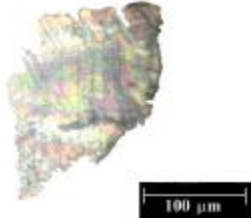
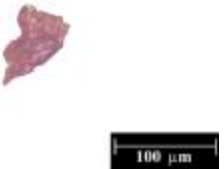
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
48		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	3.820 48.357 17.599 40.775 36.460	0.999 0.000 0.001 0.000 0.000
49		ผิวไหม้	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	9.298 41.066 9.324 20.895 18.566	0.500 0.000 0.494 0.002 0.005
50		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	14.14 67.49 11.46 41.24 40.19	0.207 0.000 0.793 0.000 0.000
51		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	3.794 63.445 23.510 59.133 58.216	1.000 0.000 0.000 0.000 0.000
52		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	6.375 43.311 9.126 23.891 18.990	0.797 0.000 0.201 0.000 0.001
53		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	47.574 46.978 24.209 18.422 2.347	0.000 0.000 0.000 0.000 1.000

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
54		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.266 55.886 9.914 41.829 39.350	0.987 0.000 0.013 0.000 0.000
55		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	63.262 58.832 34.350 26.336 6.111	0.000 0.000 0.000 0.000 1.000
56		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.553 34.217 21.626 6.148 1.277	0.000 0.000 0.000 0.080 0.919
57		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	77.894 4.657 69.505 34.933 72.464	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
58		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	3.032 52.814 5.309 31.245 22.292	0.757 0.000 0.243 0.000 0.000
59		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	41.328 32.931 22.654 3.675 3.313	0.000 0.000 0.000 0.455 0.545

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
60		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	51.419 56.056 26.288 18.779 1.915	0.000 0.000 0.000 0.000 1.000
61		เหล็ก	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.119 31.239 24.826 2.342 7.195	0.000 0.000 0.000 0.919 0.081
62		ทองแดง	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	24.89 29.03 13.37 28.09 31.46	0.003 0.000 0.996 0.001 0.000
63		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	15.66 23.81 10.78 17.08 16.30	0.073 0.001 0.837 0.036 0.053
64		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	30.315 9.327 19.622 12.946 19.041	0.000 0.849 0.005 0.139 0.007
65		ทองแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	23.30 15.18 13.54 11.38 14.35	0.001 0.087 0.198 0.582 0.132

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
66		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	69.513 20.157 30.010 0.662 9.784	0 0 0 0.990 0.010
67		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	87.333 40.095 54.029 8.076 25.630	0 0 0 1 0
68		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	66.46 103.01 49.64 83.17 70.07	0 0 1 0 0
69		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	67.127 15.937 27.522 1.802 6.275	0 0.001 0 0.903 0.096
70		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	58.459 20.789 17.787 7.190 0.800	0 0 0 0.039 0.960
71		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	50.137 17.191 17.459 2.618 3.553	0 0 0 0.614 0.385

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
72		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	21.250 36.685 10.089 11.261 2.985	0.000 0.000 0.027 0.015 0.957
73		สนิมแดง	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	40.045 26.689 21.812 3.252 3.342	0.000 0.000 0.000 0.511 0.489
74		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	38.725 15.453 22.682 0.433 8.932	0.000 0.001 0.000 0.985 0.014
75		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	43.105 52.066 21.743 15.949 0.801	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
76		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	51.720 52.922 26.568 15.898 1.644	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
77		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	57.243 52.441 30.811 16.475 2.999	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999

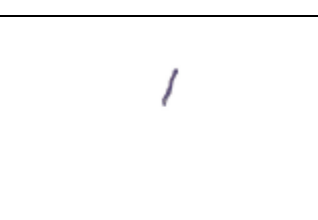
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
78		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	33.758 47.514 16.372 16.062 0.638	0.000 0.000 0.000 0.000 0.999
79		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	39.430 49.332 19.389 14.217 0.374	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
80		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	39.784 15.875 23.156 0.476 8.781	0.000 0.000 0.000 0.984 0.015
81		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	55.841 54.262 29.782 16.723 2.658	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
82		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	56.368 56.582 30.443 16.748 2.975	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
83		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	37.397 48.648 17.949 16.548 0.665	0.000 0.000 0.000 0.000 0.999

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพถ่ายอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
84		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	63.779 49.277 35.266 16.921 5.243	0.000 0.000 0.000 0.003 0.997
85		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.495 47.621 21.333 12.803 0.418	0.000 0.000 0.000 0.002 0.998
86		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	45.499 49.942 23.390 13.076 0.926	0.000 0.000 0.000 0.002 0.998
87		เหล็ก	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	29.724 52.661 16.162 14.769 3.902	0.000 0.000 0.002 0.004 0.993
88		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	15.008 48.247 3.794 28.903 15.937	0.004 0.000 0.994 0.000 0.002
89		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	31.879 60.498 13.390 21.888 5.568	0.000 0.000 0.020 0.000 0.980

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ระยะสแควร์ ยูคลิด	ความน่าจะเป็น
90		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	17.703 44.250 5.056 38.433 30.474	0.002 0.000 0.998 0.000 0.000
91		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	11.159 42.979 3.235 30.791 20.633	0.019 0.000 0.981 0.000 0.000
92		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	16.716 51.032 5.356 29.266 15.524	0.003 0.000 0.990 0.000 0.006
93		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	13.167 42.883 2.290 31.829 22.010	0.004 0.000 0.996 0.000 0.000
94		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	14.093 43.489 1.803 31.338 20.963	0.002 0.000 0.998 0.000 0.000
95		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.659 50.978 20.806 16.913 0.804	0.000 0.000 0.000 0.000 1.000

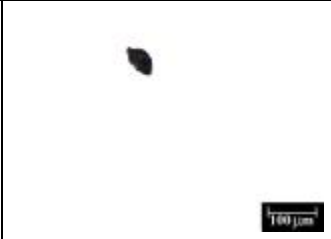
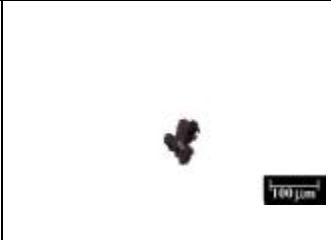
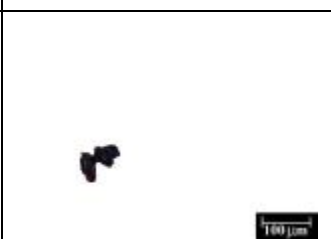
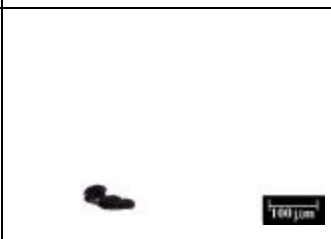
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพถ่ายอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
96		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	32.594 44.508 15.802 16.773 1.331	0.000 0.000 0.001 0.000 0.999
97		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	14.919 42.528 3.599 35.504 27.357	0.003 0.000 0.997 0.000 0.000
98		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.895 17.184 21.426 0.549 7.622	0.000 0.000 0.000 0.971 0.028
99		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	33.277 14.117 19.759 0.536 9.711	0.000 0.001 0.000 0.989 0.010
100		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.614 17.272 21.180 0.462 7.678	0.000 0.000 0.000 0.973 0.026
101		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	54.738 21.313 34.340 5.249 11.884	0.000 0.000 0.000 0.965 0.035

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
102		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.427 56.820 11.662 46.789 43.178	0.994 0.000 0.006 0.000 0.000
103		สนิมดำ	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	94.52 101.19 76.45 84.76 76.06	0.000 0.000 0.448 0.007 0.545
104		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.781 55.102 10.716 45.858 44.259	0.989 0.000 0.011 0.000 0.000
105		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	3.408 57.577 11.337 48.252 45.761	0.981 0.000 0.019 0.000 0.000
106		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	2.014 60.452 15.267 50.526 49.901	0.999 0.000 0.001 0.000 0.000
107		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.642 53.930 9.345 43.576 41.748	0.979 0.000 0.021 0.000 0.000

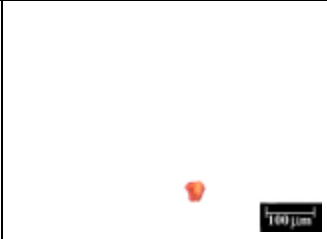
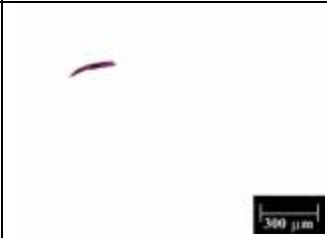
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
108		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	1.978 54.858 9.442 45.360 43.351	0.977 0.000 0.023 0.000 0.000
109		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	2.402 56.368 11.089 47.357 46.288	0.987 0.000 0.013 0.000 0.000
110		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	2.087 56.326 11.594 46.661 46.074	0.991 0.000 0.009 0.000 0.000
111		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	2.799 56.894 8.985 44.363 42.691	0.957 0.000 0.043 0.000 0.000
112		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	65.505 2.418 57.747 30.696 62.394	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
113		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	74.214 4.286 67.074 36.695 71.587	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยูนิต	ความน่าจะเป็น
114		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	105.35 16.69 100.71 64.33 106.93	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
115		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	51.683 2.868 39.713 12.639 39.267	0.000 0.993 0.000 0.007 0.000
116		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	41.371 4.271 28.394 6.031 24.871	0.000 0.707 0.000 0.293 0.000
117		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	53.196 1.574 44.237 23.813 46.322	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
118		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	39.519 2.730 27.781 8.617 26.420	0.000 0.950 0.000 0.050 0.000
119		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	84.63 15.20 73.19 21.33 59.76	0.000 0.956 0.000 0.044 0.000

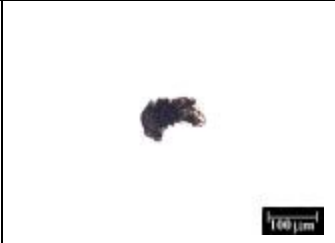
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
120		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	86.206 7.684 79.140 40.785 78.507	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
121		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	83.927 6.949 75.598 32.027 72.587	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
122		ทองแดง	ทองแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	87.026 7.964 79.961 38.877 78.229	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
123		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	40.03 53.35 16.45 49.57 44.74	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
124		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	31.15 47.94 11.66 41.01 40.41	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000
125		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	52.04 56.45 23.47 50.32 50.05	0.000 1.000 0.000 0.000 0.000

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
126		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	24.188 43.494 7.826 40.938 33.701	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
127		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	23.540 40.232 7.693 37.280 35.163	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
128		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	25.066 44.492 8.217 41.830 33.993	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
129		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	21.854 43.489 6.361 39.151 31.400	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
130		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	12.699 37.439 8.319 18.252 9.505	0.067 0.000 0.598 0.004 0.331
131		สนิมดำ	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	3.358 58.990 12.077 48.858 44.836	0.987 0.000 0.013 0.000 0.000

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
132		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	4.173 50.453 4.103 37.160 28.964	0.491 0.000 0.509 0.000 0.000
133		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	43.878 9.621 29.519 1.767 16.718	0.000 0.019 0.000 0.980 0.001
134		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	45.899 10.370 30.371 1.758 16.321	0.000 0.013 0.000 0.986 0.001
135		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	37.925 13.429 22.809 0.566 10.278	0.000 0.002 0.000 0.991 0.008
136		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	35.754 12.829 21.823 0.549 10.773	0.000 0.002 0.000 0.992 0.006
137		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	35.819 17.008 20.487 0.647 7.350	0.000 0.000 0.000 0.966 0.034

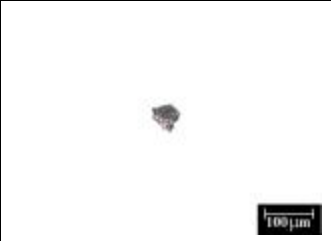
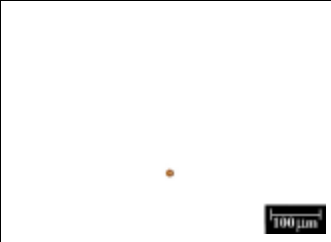
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
138		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.902 12.953 21.915 1.162 9.668	0.000 0.003 0.000 0.983 0.014
139		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.822 12.945 21.854 1.154 9.679	0.000 0.003 0.000 0.983 0.014
140		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	48.544 7.436 35.077 3.443 25.264	0.000 0.120 0.000 0.880 0.000
141		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	35.754 12.830 21.823 0.549 10.773	0.000 0.002 0.000 0.992 0.006
142		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.380 13.261 21.918 0.425 10.618	0.000 0.002 0.000 0.992 0.006
143		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.647 14.303 21.074 0.601 8.996	0.000 0.001 0.000 0.984 0.015

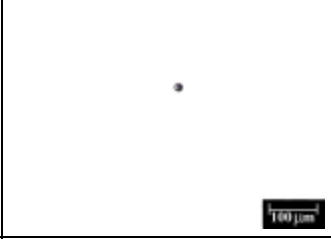
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพถ่ายอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
144		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	24.768 52.523 9.209 21.830 6.096	0.000 0.000 0.174 0.000 0.826
145		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	28.629 45.996 13.593 17.896 1.850	0.000 0.000 0.003 0.000 0.997
146		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	29.626 48.619 14.120 20.033 2.437	0.000 0.000 0.003 0.000 0.997
147		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	26.472 48.130 12.593 19.638 2.560	0.000 0.000 0.007 0.000 0.993
148		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	25.586 47.571 11.834 18.632 2.287	0.000 0.000 0.008 0.000 0.991
149		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	31.108 49.768 14.395 18.934 1.583	0.000 0.000 0.002 0.000 0.998

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
150		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	12.233 51.957 6.269 29.561 17.086	0.048 0.000 0.948 0.000 0.004
151		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	44.970 47.735 23.748 10.660 1.423	0.000 0.000 0.000 0.010 0.990
152		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.898 45.852 22.077 10.446 0.817	0.000 0.000 0.000 0.008 0.992
153		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	46.641 48.399 24.800 11.122 1.547	0.000 0.000 0.000 0.008 0.992
154		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	52.438 15.357 37.886 2.692 23.630	0.000 0.002 0.000 0.998 0.000
155		เหล็ก	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	30.563 31.368 17.220 6.273 11.977	0.000 0.000 0.004 0.942 0.054

ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
156		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	44.292 20.672 28.683 1.457 16.432	0.000 0.000 0.000 0.999 0.001
157		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	16.500 61.865 8.137 36.426 33.581	0.015 0.000 0.985 0.000 0.000
158		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	53.345 15.865 38.510 3.066 24.875	0.000 0.002 0.000 0.998 0.000
159		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	21.287 51.566 7.197 29.306 15.841	0.001 0.000 0.986 0.000 0.013
160		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	25.186 33.486 11.796 11.592 2.233	0.000 0.000 0.008 0.009 0.983
161		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	35.559 38.930 17.050 9.495 0.098	0.000 0.000 0.000 0.009 0.991

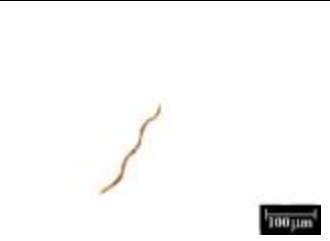
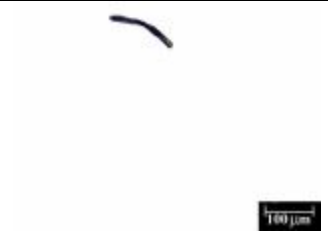
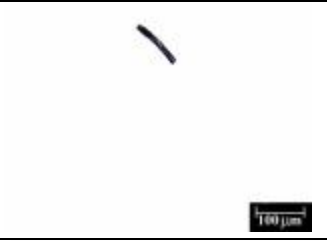
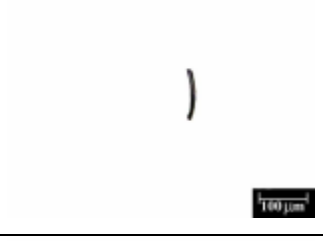
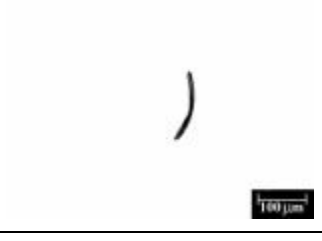
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
162		เหล็ก	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	23.692 20.780 11.854 4.971 5.208	0.000 0.000 0.017 0.521 0.462
163		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	23.273 47.116 10.824 16.845 2.256	0.000 0.000 0.014 0.001 0.986
164		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	34.598 45.145 16.584 16.028 0.874	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
165		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	17.700 32.139 8.787 11.192 6.215	0.002 0.000 0.203 0.061 0.734
166		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	18.80 37.86 10.80 28.35 28.88	0.018 0.000 0.982 0.000 0.000
167		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	36.854 39.518 17.741 9.703 0.093	0.000 0.000 0.000 0.008 0.992

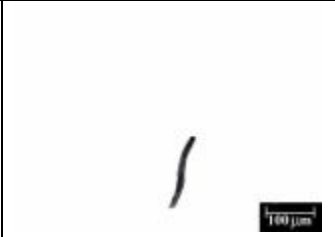
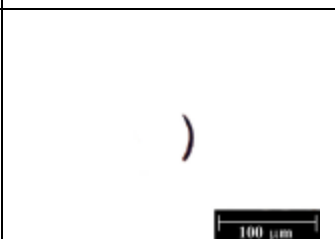
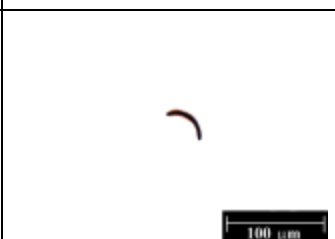
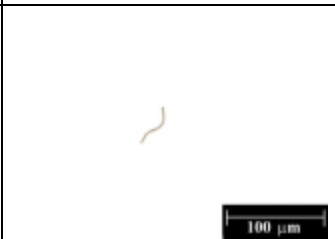
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
168		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	32.941 47.220 16.252 19.825 2.405	0.000 0.000 0.001 0.000 0.999
169		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	37.660 39.478 18.401 8.766 0.239	0.000 0.000 0.000 0.014 0.986
170		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	32.318 43.104 15.210 11.974 0.331	0.000 0.000 0.001 0.003 0.996
171		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	28.634 36.191 15.129 6.001 4.222	0.000 0.000 0.003 0.290 0.707
172		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	40.341 50.730 20.126 15.196 0.524	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999
173		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	43.602 44.457 21.909 16.589 1.627	0.000 0.000 0.000 0.001 0.999

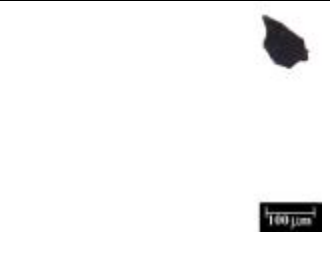
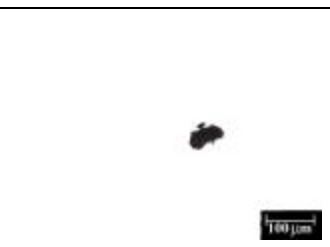
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคคิด	ความน่าจะเป็น
174		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	41.665 8.415 28.012 1.500 18.067	0.000 0.031 0.000 0.969 0.000
175		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	25.758 56.850 8.958 42.395 37.138	0.000 0.000 1.000 0.000 0.000
176		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	16.454 44.602 4.453 39.245 32.268	0.002 0.000 0.998 0.000 0.000
177		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	4.320 47.732 2.437 34.804 27.460	0.281 0.000 0.719 0.000 0.000
178		ผิวไหม้	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	5.168 54.605 9.057 42.186 37.059	0.875 0.000 0.125 0.000 0.000
179		ผิวไหม้	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	5.550 55.151 10.001 42.840 38.385	0.903 0.000 0.097 0.000 0.000

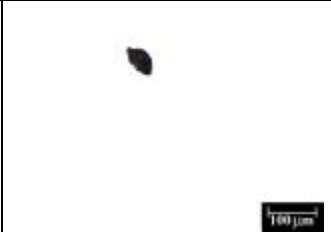
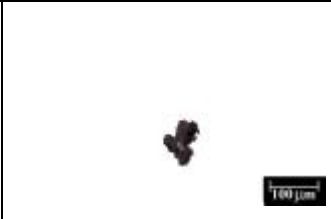
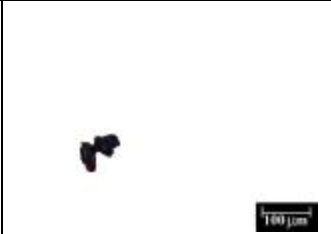
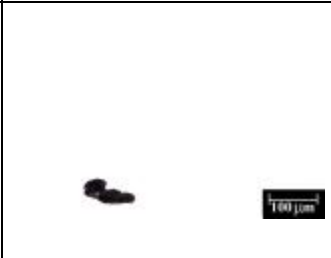
ตารางที่ ค-4 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ระยะสแควร์ ยุคลิด	ความน่าจะเป็น
180		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	4.898 46.817 3.040 36.874 32.835	0.283 0.000 0.717 0.000 0.000
181		ผิวไหม้	สนิมดำ	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	2.944 54.330 8.456 44.560 39.886	0.940 0.000 0.060 0.000 0.000
182		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	13.127 45.346 5.575 35.811 37.036	0.022 0.000 0.978 0.000 0.000
183		ผิวไหม้	ผิวไหม้	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	18.57 26.37 11.30 12.76 16.79	0.017 0.000 0.636 0.306 0.041
184		เหล็ก	เหล็ก	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	40.819 42.758 20.485 10.027 0.336	0.000 0.000 0.000 0.008 0.992
185		สนิมแดง	สนิมแดง	สนิมดำ ทองแดง ผิวไหม้ สนิมแดง เหล็ก	42.328 33.799 25.970 6.216 16.265	0.000 0.000 0.000 0.993 0.007

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครมซายประสาทเทียม

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
102		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.044 -0.050 -0.041
103		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.045 -0.047 -0.044
104		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.047 -0.050 -0.043
105		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.047 -0.049 -0.045
106		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.030 -0.034 -0.041
107		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.046 -0.049 -0.042

ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
108		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.991 -0.045 0.003
109		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.049 -0.050 -0.047
110		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.046 -0.047 -0.045
111		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.019 -0.026 -0.037
112		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.761 -0.049 0.260
113		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.021 -0.046 -0.021

ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
114		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.043 -0.050 -0.038
115		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.019 -0.032 -0.030
116		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.007 -0.022 -0.030
117		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.023 -0.046 -0.021
118		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.032 -0.051 -0.026
119		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.049 -0.050 -0.046

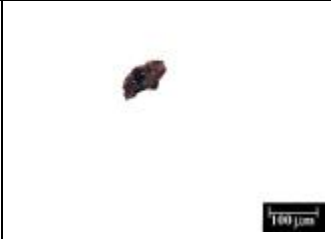
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
120	 100 μm	ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.897 -0.050 0.115
121	 100 μm	ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.024 -0.034 -0.033
122	 100 μm	ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.005 -0.046 -0.006
123	 500 μm	เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.026 1.048 -0.022
124	 500 μm	เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.018 1.044 -0.023
125	 500 μm	เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.017 1.043 -0.024

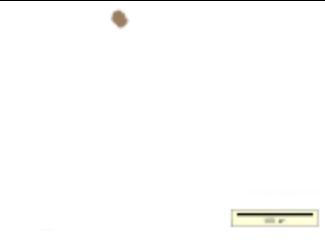
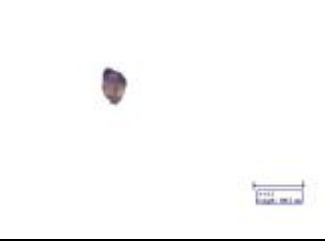
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
126		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.095 0.945 -0.036
127		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.447 0.548 -0.036
128		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.007 1.025 -0.028
129		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.178 0.853 -0.034
130		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.050 -0.052 -0.048

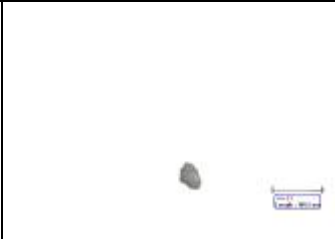
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
131		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.043 -0.047 -0.041
132		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.050 -0.051 -0.051
133		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.522 -0.051 0.508
134		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.604 -0.048 0.422
135		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.039 -0.045 -0.037
136		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.919 -0.049 0.085

ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
137		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.259 -0.042 0.746
138		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.040 -0.046 -0.037
139		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.041 -0.049 -0.036
140		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.018 -0.022 -0.042
141		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.045 -0.050 -0.041
142		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.959 -0.048 0.043

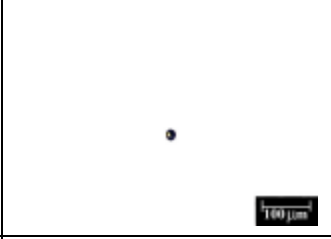
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพถ่ายอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
143		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.694 -0.047 0.310
144		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.050 -0.051 -0.048
145		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.034 -0.047 -0.030
146		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.909 -0.048 0.089
147		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.033 -0.049 -0.029
148		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.030 -0.044 -0.030

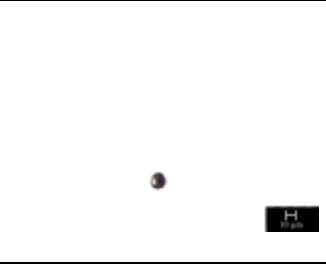
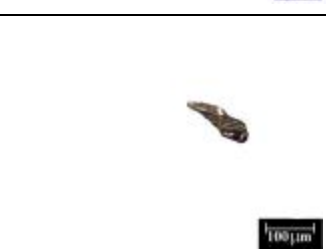
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
149		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.949 -0.050 0.061
150		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.049 -0.051 -0.048
151		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.052 -0.053 -0.053
152		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.052 -0.053 -0.052
153		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.052 -0.052 -0.053
154		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.078 -0.041 0.934

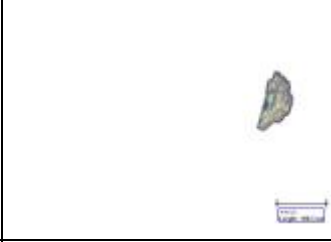
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
155		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.018 -0.035 1.023
156		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.004 -0.038 1.004
157		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.001 -0.037 1.006
158		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.013 -0.034 1.018
159		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.019 -0.034 1.024
160		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.029 -0.041 0.982

ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
161		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.082 -0.041 0.931
162		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.005 -0.038 1.013
163		ทรงกลม	ทรงกลม	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.008 -0.037 1.015
164		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.024 -0.030 -0.038
165		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.902 0.082 -0.037
166		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.049 -0.051 -0.048

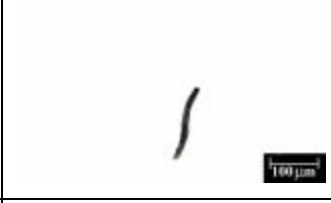
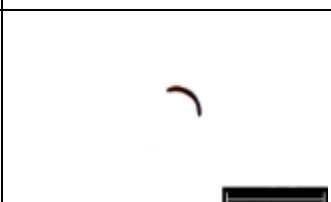
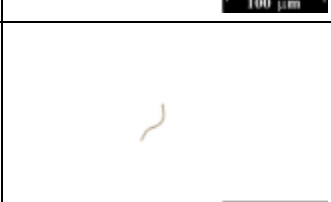
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
167		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.879 0.104 -0.037
168		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.044 -0.048 -0.041
169		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.967 0.013 -0.029
170		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.051 -0.053 -0.050
171		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.051 -0.052 -0.051
172		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	0.988 0.006 -0.045

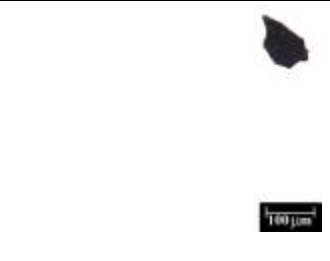
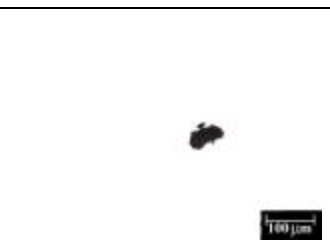
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
173		ผิดปกติ	ผิดปกติ	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	1.053 -0.054 -0.053
174		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.033 1.052 -0.013
175		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.030 1.051 -0.018
176		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.021 1.045 -0.021
177		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.003 1.033 -0.024
178		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.030 1.050 -0.018

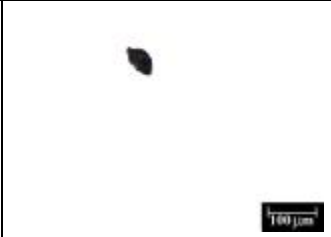
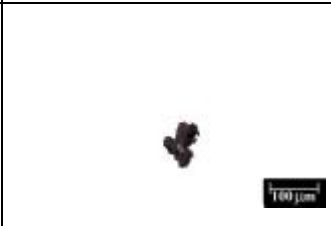
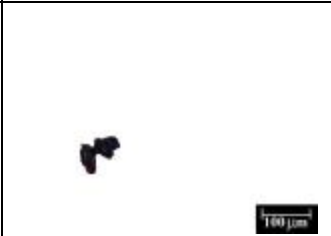
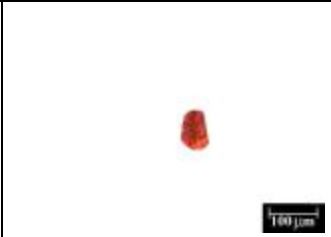
ตารางที่ ค-5 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม รูปร่าง	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
179		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.032 1.052 -0.016
180		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.029 1.050 -0.019
181		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.022 1.046 -0.021
182		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.031 1.051 -0.017
183		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.020 1.045 -0.022
184		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.033 1.052 -0.014
185		เป็นเส้น	เป็นเส้น	ผิดปกติ เป็นเส้น ทรงกลม	-0.033 1.052 -0.014

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวอนุภาคการสีกหรือด้วยวิธีโครนช่ายประสาทเทียม

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
102		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.024 0.891 0.092
103		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.082 0.530 0.075
104		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.584 0.611 -0.021
105		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.859 0.227 -0.014
106		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.041 0.790 0.036
107		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.990 -0.003 0.003

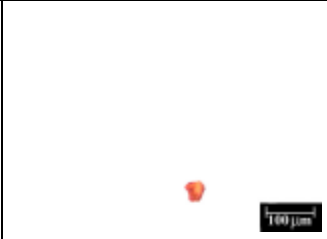
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
108		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.956 0.085 -0.013
109		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.123 0.714 0.022
110		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.671 0.047 0.078
111		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.464 0.083 -0.031
112		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.308 0.560 0.016
113		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.900 0.017 0.030

ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
114		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.544 0.241 0.038
115		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.610 0.308 0.009
116		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.293 0.188 0.122
117		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.938 -0.030 0.079
118		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.897 0.094 0.000
119		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.804 -0.010 0.104

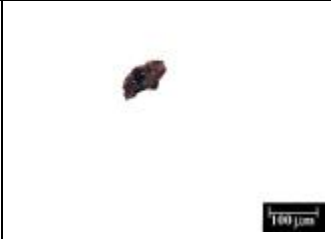
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
120		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.934 -0.037 0.108
121		ผิวเรียบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.984 -0.037 0.052
122		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.928 -0.031 0.089
123		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.508 0.097 0.098
124		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.943 -0.049 0.169
125		รอยขีดยาว	หยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.961 -0.023 0.043

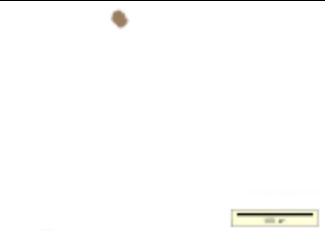
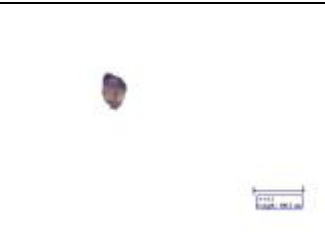
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
126		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.084 0.632 0.058
127		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.716 0.022 0.093
128		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.843 0.004 0.066
129		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.689 0.116 0.044
130		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.055 0.333 0.891

ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
131		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.098 0.567 0.062
132		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.053 0.418 0.581
133		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.834 0.046 0.037
134		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.848 0.024 0.047
135		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.916 0.017 0.022
136		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.992 -0.031 0.028

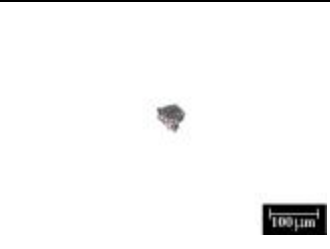
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
137		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.025 -0.045 0.022
138		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.926 -0.006 0.039
139		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.955 -0.006 0.023
140		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.380 0.185 0.095
141		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.277 0.288 0.081
142		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.824 0.033 0.048

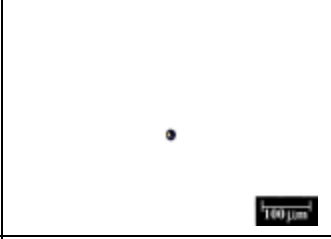
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
143		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.794 0.094 0.028
144		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.673 -0.027 0.243
145		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.426 0.029 0.203
146		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.883 -0.040 0.166
147		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.147 0.183 0.194
148		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.505 0.034 0.165

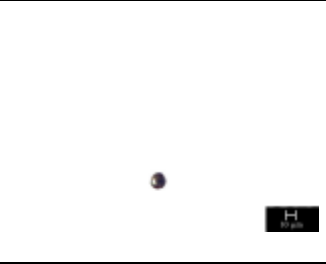
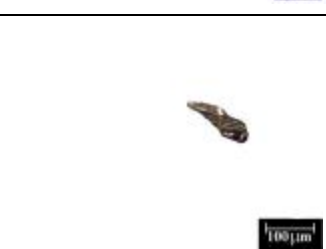
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
149		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.761 -0.039 0.254
150		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.864 -0.037 0.146
151		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.443 0.832
152		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.045 0.161 0.623
153		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.274 0.828
154		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.048 -0.045 -0.024

ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
155		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.027 -0.051 0.051
156		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.015 -0.047 0.049
157		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.027 -0.053 0.079
158		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.043 -0.047 -0.009
159		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.039 -0.051 0.019
160		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.941 0.069 -0.005

ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
161		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.001 -0.046 0.049
162		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.937 0.009 -0.011
163		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.013 -0.048 0.064
164		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.055 0.749 0.419
165		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.014 0.407 0.248
166		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.288 0.704

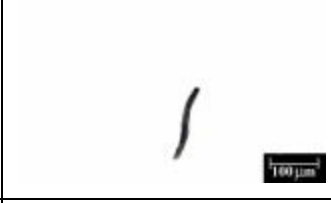
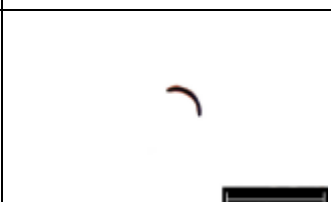
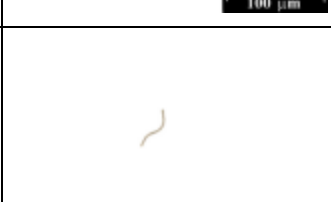
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
167		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.055 0.941 0.303
168		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.041 0.474 0.358
169		ผิวหยาบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.055 0.212 0.978
170		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.223 0.906
171		รอยขีดยาว	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.314 0.659
172		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.643 0.467

ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
173	 100 μm	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	-0.056 0.244 0.683
174	 100 μm	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.370 -0.042 0.514
175	 100 μm	ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.833 0.138 0.005
176	 100 μm	รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.953 -0.028 0.054
177	 100 μm	ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.984 -0.053 0.186
178	 100 μm	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.984 -0.053 0.186

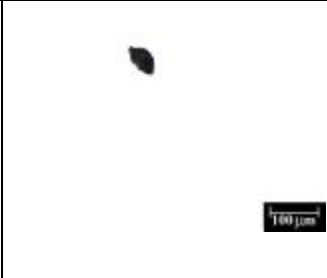
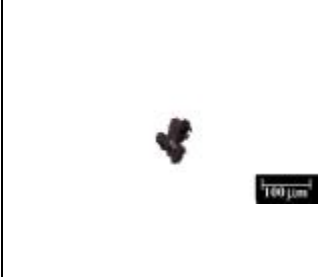
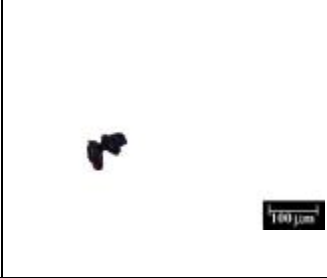
ตารางที่ ค-6 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม พื้นผิว	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
179		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.898 -0.048 0.218
180		ผิวเรียบ	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.692 0.004 0.124
181		ผิวเรียบ	ผิวหยาบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.987 -0.046 0.087
182		รอยขีดยาว	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.996 -0.054 0.237
183		ผิวหยาบ	รอยขีดยาว	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.014 -0.047 0.053
184		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	1.042 0.001 -0.036
185		รอยขีดยาว	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ ผิวหยาบ รอยขีดยาว	0.890 -0.055 0.459

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสีอนุภาคการสึกหรอด้วยวิธีโครมเข้ายาสภาพเทียม

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
102		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.400 0.707 -0.048 -0.008 -0.045
103		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	-0.030 0.843 -0.006 -0.035 0.370
104		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.514 0.649 -0.046 -0.009 -0.050
105		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.413 0.701 -0.047 -0.023 -0.029
106		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.371 0.733 -0.048 -0.009 -0.045

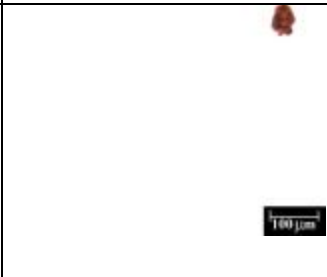
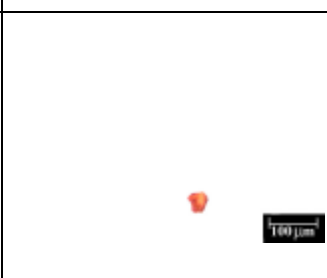
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
107		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.567 0.612 -0.045 -0.004 -0.051
108		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.478 0.664 -0.045 -0.020 -0.043
109		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.450 0.681 -0.046 -0.023 -0.040
110		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.501 0.657 -0.046 -0.011 -0.049
111		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.589 0.613 -0.045 -0.008 -0.050

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
112		ทองแดง	ทองแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.159 0.031 0.360 -0.044 0.981
113		ทองแดง	ทองแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.149 0.037 0.358 -0.045 0.986
114		ทองแดง	ทองแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.161 0.075 0.337 -0.047 1.005
115		ทองแดง	ทองแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.139 -0.049 0.839 -0.029 0.802
116		ทองแดง	ทองแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.164 -0.054 0.622 0.073 0.935

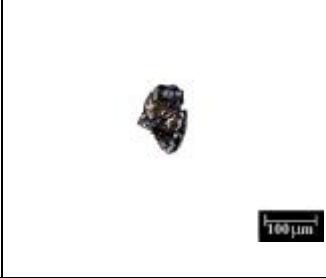
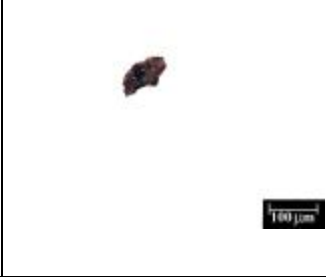
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
117		ทองแดง	ทองแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.177 -0.012 0.386 -0.005 0.964
118		ทองแดง	ทองแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.175 -0.052 0.789 0.069 0.807
119		ทองแดง	ทองแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.050 -0.054 1.037 0.032 0.584
120		ทองแดง	ทองแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.089 -0.027 0.636 -0.038 0.893
121		ทองแดง	ทองแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.073 -0.046 0.740 -0.039 0.791

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
122		ทองแดง	ทองแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.082 -0.041 0.735 -0.037 0.805
123		ผิวใหม่	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.789 0.249 0.158 -0.038 0.417
124		ผิวใหม่	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.744 0.199 0.186 -0.041 0.418
125		ผิวใหม่	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.766 0.110 0.300 -0.043 0.370
126		ผิวใหม่	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.707 0.279 0.010 -0.031 0.449

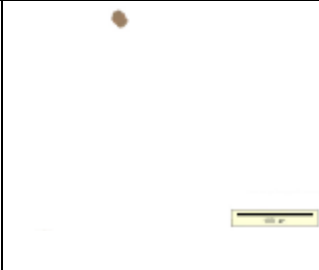
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
127		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.590 0.262 0.070 -0.038 0.546
128		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.731 0.279 0.009 -0.030 0.426
129		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.744 0.274 -0.005 -0.029 0.373
130		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.427 -0.021 -0.042 0.402 -0.038
131		สนิมดำ	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.403 0.711 -0.049 -0.018 -0.039

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
132		ผิวใหม่	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.605 0.516 -0.046 -0.011 -0.047
133		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.176 -0.055 0.715 0.308 0.327
134		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.182 -0.055 0.808 0.316 0.325
135		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.199 -0.055 0.739 0.334 0.198
136		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.194 -0.055 0.754 0.326 0.198

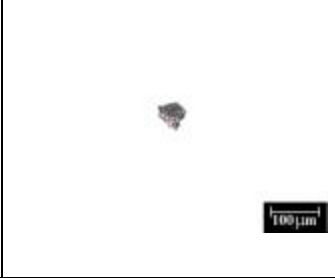
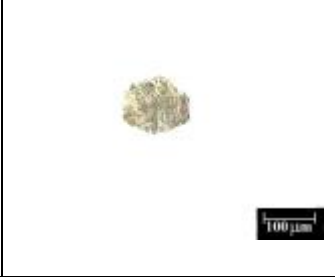
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
137		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.204 -0.055 0.683 0.368 0.121
138		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.204 -0.055 0.728 0.337 0.196
139		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.205 -0.055 0.728 0.337 0.194
140		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.153 -0.055 0.965 0.161 0.469
141		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.194 -0.055 0.745 0.326 0.198

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
142		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.200 -0.055 0.746 0.327 0.195
143		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.202 -0.055 0.732 0.331 0.186
144		เหล็ก	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.912 -0.054 -0.035 0.362 -0.037
145		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.426 -0.054 -0.039 0.902 -0.010
146		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.506 -0.054 -0.040 0.844 -0.012

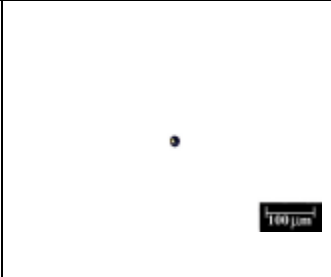
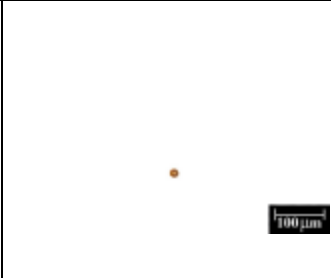
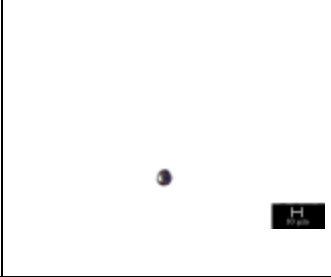
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
147		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.572 -0.054 -0.041 0.784 -0.025
148		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.613 -0.054 -0.041 0.747 -0.031
149		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.528 -0.055 -0.038 0.888 -0.018
150		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.827 0.047 -0.046 0.063 -0.053
151		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.272 -0.055 -0.021 1.008 0.033

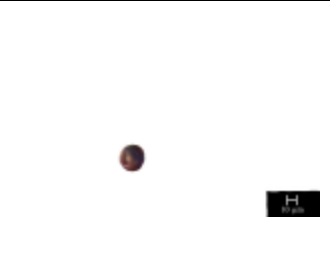
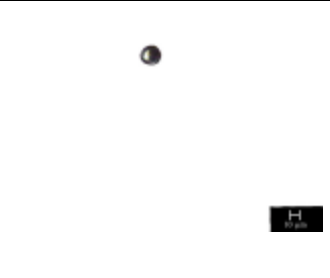
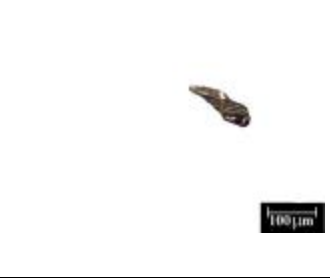
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
152		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.273 -0.055 -0.020 1.003 0.031
153		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.272 -0.055 -0.021 1.010 0.040
154		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.134 -0.055 0.885 0.267 0.347
155		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.235 -0.055 0.420 0.482 0.006
156		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.170 -0.055 0.796 0.294 0.203

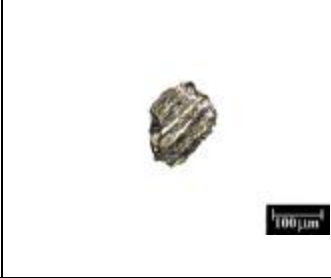
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
157		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	1.023 -0.050 -0.002 0.031 -0.037
158		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.129 -0.055 0.913 0.237 0.363
159		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.915 -0.030 -0.040 0.035 -0.035
160		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.292 -0.055 -0.028 0.818 0.009
161		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.267 -0.055 -0.014 0.973 0.029

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
162		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.221 -0.055 0.295 0.398 0.041
163		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.515 -0.054 -0.041 0.834 -0.037
164		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.320 -0.055 -0.031 0.971 0.022
165		เหล็ก	เหล็ก	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.327 -0.052 -0.028 0.466 -0.023
166		ผิวใหม่	ผิวใหม่	ผิวใหม่ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.529 0.004 0.022 -0.026 0.272

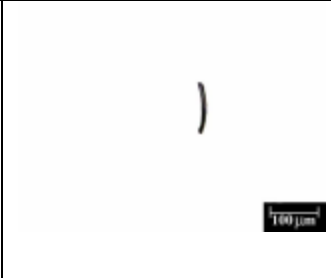
ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
167		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.269 -0.055 -0.014 0.977 0.035
168		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.372 -0.054 -0.037 0.924 0.013
169		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.259 -0.055 -0.010 0.977 0.031
170		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.283 -0.055 -0.026 0.973 0.002
171		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.213 -0.055 0.013 0.921 -0.017

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
172		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.320 -0.055 -0.027 0.999 0.014
173		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.304 -0.055 -0.022 0.988 0.080
174		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.167 -0.055 0.872 0.257 0.376
175		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	1.035 -0.050 0.089 -0.001 -0.026
176		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.970 0.056 -0.016 -0.019 -0.015

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
177		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.858 0.242 -0.043 -0.009 -0.050
178		ผิวไหม้	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.445 0.664 -0.048 -0.017 -0.044
179		ผิวไหม้	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.430 0.671 -0.048 -0.018 -0.042
180		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.878 0.237 -0.039 -0.024 -0.041
181		ผิวไหม้	สนิมดำ	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.443 0.677 -0.047 -0.020 -0.038

ตารางที่ ค-7 (ต่อ)

ลำดับ	ภาพตัวอย่าง	สมมุติฐาน กลุ่ม	พยากรณ์ กลุ่ม	ชนิดกลุ่ม สีอนุภาค	ค่าน้ำหนัก การแยกกลุ่ม
182		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.737 0.220 0.022 -0.038 0.257
183		ผิวไหม้	ผิวไหม้	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.371 -0.052 0.140 0.217 0.136
184		เหล็ก	เหล็ก	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.284 -0.055 -0.018 0.998 0.039
185		สนิมแดง	สนิมแดง	ผิวไหม้ สนิมดำ สนิมแดง เหล็ก ทองแดง	0.209 -0.055 0.675 0.371 0.049

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายพีระวัตร นันทวงศ์

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะอนุภาคการสีกหรือด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการติดตามสภาพเครื่องจักร

สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2523 สถานที่เกิดอำเภอเมือง จังหวัดลำปาง เป็นบุตรคนเดียว ของนายวีระสุขและนางลัดดา นันทวงศ์ ที่อยู่ปัจจุบันเลขที่ 77/7 ถนนปัว-บ่อเกลือ ตำบลวรนคร อำเภอปัว จังหวัดน่าน รหัสไปรษณีย์ 55120

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนวัดศรีรัตนาราม อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2545

ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2546 - 2548 ตำแหน่งวิศวกร บริษัทสยามซีเมนต์ จำกัด