

พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงจากแผ่นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อ  
แบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

นายชรัช ฉวีบุญยาศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

BEHAVIOR OF COPPER LIBERATION FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS (PCBS)  
USING GROOVE TEETH ROLL CRUSHER AND ROD MILL

Mr. Charat Chaveeboonyasilp

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงจากแผ่นวงจร  
อิเล็กทรอนิกส์ จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบ  
ลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

โดย

นายชรัช ฉวีบุญยาศิลป์

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทียนไชย ต้นไทย)

ชรัช ฉวีบุญยาศิลป์ : พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงจากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ. (BEHAVIOR OF COPPER LIBERATION FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS (PCBS) USING GROOVE TEETH ROLL CRUSHER AND ROD MILL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ขวัญชัย ลิเฝ้าพันธุ์, 97 หน้า.

การรีไซเคิลโลหะมีค่าจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนที่เกี่ยวข้องว่าเป็นขั้นตอนที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการในคัดแยกแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ ขั้นตอนการลดขนาด โดยทั่วไปเครื่องมือที่นำมาใช้ในการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คือ เครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยงและเครื่องย่อยพลาสติก ซึ่งไม่ได้ออกแบบมาสำหรับซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างเฉพาะเจาะจงที่มีลักษณะมิติความกว้างยาวมากกว่าความหนาและมีความอ่อนเหนียว อีกทั้งยังมีแผ่นทองแดงเคลือบอยู่ที่ผิวอีกด้วย จึงมีการออกแบบเครื่องย่อยชนิดใหม่ คือ เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ซึ่งอาศัยหลักการใช้แรงตัดแบบเฉือน เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพในการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการลดขนาดโดยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยร่วมกับเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะถูกย่อยโดยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยสองตัวที่มีระยะห่างของฟันเลื่อยที่แตกต่างกันที่ 4 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องบดแบบแท่งโลหะโดยใช้เวลาในการบดที่แตกต่างกัน ในแต่ละขั้นตอนการลดขนาด จะทำการศึกษาพฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงโดยใช้วิธีการนับเม็ดเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง การกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาดจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานและรูปร่าง ลักษณะหลังการบด ศึกษาโดยใช้การส่องกล้องจุลทรรศน์ และพฤติกรรมของกระบวนการลดขนาดจะศึกษาโดยใช้ฟังก์ชันการแตกหัก ซึ่งจากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของขนาดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงจะอยู่ในช่วงขนาด 504-1001 ไมครอน และผลที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันการแตกหักพบว่า มีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลอง

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ปลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี..... ปลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา 2554.....

## 5270264421: MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : PRINTED CIRCUIT BOARD / COPPER RECYCLING / LIBERATION /  
BREAKAGE FUNCTION / COMMINUTION / CRUSHER

CHARAT CHAVEEBOONYASILP : BEHAVIOR OF COPPER LIBERATION FROM  
PRINTED CIRCUIT BOARDS (PCBS) USING GROOVE TEETH ROLL CRUSHER  
AND ROD MILL. ADVISOR : ASSOC.PROF.QUANCHAI LEEPOWPANTH, Ph.D.,  
97 pp.

In recycling of valuable metals from printed circuit boards (PCBs) waste, comminution is the key step to determine the efficiency of separation. Comminution of PCBs is normally performed using equipments such as hammer mill and shredder that were not designed to comminute PCB specifically. Due to the fact, PCBs that consist of copper sheet rolled on, are flat and ductile, new crusher equipment, "Groove Teeth roll crusher" based on shear force, was used to improve the efficiency of size reduction. In this research, the Groove teeth roll crusher together with rod mill comminution was investigated. In the first step, PCB wastes were crushed by Groove Teeth roll crushers on difference teeth width between 3 mm. and 4 mm., and a rod mill, with varying of grinding time. The behaviors of copper liberation were investigated on each step of comminution, the particle size distribution of crushed PCB wastes were prepared by sieve analysis method. The degree of copper liberation was determined using grain-counting method and the shapes of crushed PCB were investigated by optical microscope for each size range. The behavior of comminution process was considered in term of the breakage function. From the results, the behavior of copper liberation was shown in size range 504-1001 micron and the distribution curves with crushing by Groove Teeth roll crusher were quite smooth. The breakage function trended to the results of experiment.

Department: Mining and Petroleum Engineering Student's Signature .....

Field of study: Georesources Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2011 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางการวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ ประธานกรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนไชย ต้นไทย กรรมการ ที่ช่วยแนะนำและเพิ่มเติมเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสมเกียรติ มงคลสมัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นตลอดการทำงานวิจัย ตลอดจนการให้ความดูแลเสมือนเป็นญาติผู้ใหญ่บุคคลหนึ่งของผู้ทำวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์อุทิศ ทองกลิ้ง และคุณระวิน อยู่ใจ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ คุณจรรุพงษ์ บุศยศักดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณลุง คุณป้า และญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ ตลอดจนการให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3    ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2    เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1    ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแมลงวงจรรอเล็กทรอนิกส์.....	4
2.1.1    โครงสร้างของแมลงวงจรรอเล็กทรอนิกส์.....	5
2.1.2    ประเภทของแมลงวงจรรอเล็กทรอนิกส์.....	5
2.1.3    ส่วนประกอบโดยประมาณของซากแมลงวงจรรอเล็กทรอนิกส์.....	8
2.1.4    กระบวนการรีไซเคิลแมลงวงจรรอเล็กทรอนิกส์.....	9
2.1.5    การประยุกต์ใช้ทองแดงในปัจจุบัน.....	10
2.2    เครื่องลดขนาดแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย (Groove Teeth Roll Crusher).....	11
2.3    การกระจายของขนาดของวัสดุที่ผ่านการลดขนาด.....	12
2.3.1    ความสัมพันธ์ของมวลสมมูลและการกระจายของขนาด.....	12
2.3.2    ฟังก์ชันการแตกหัก (breakage function).....	12
2.4    งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
3    วิธีดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1    แผนการดำเนินงานวิจัย.....	21

บทที่	หน้า
3.2	21
3.3	22
3.4	22
3.4.1	22
3.4.2	23
3.4.2.1	23
3.4.2.2	23
3.4.2.3	26
3.4.3	27
3.4.3.1	27
3.4.3.2	27
3.4.3.3	28
3.4.3.4	28
4	31
4.1	31
4.2	32
4.3	36
4.4	41
5	49



บทที่	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
5.1.1 การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจรรอเล็กทรอนิกส์ หลังผ่านการลด ขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ.	49
5.1.2 พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดง.....	49
5.1.3 ฟังก์ชันการแตกหัก.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	67
ภาคผนวก ง.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบโดยประมาณของซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ .....	9
2.2	แสดงการกระจายขนาดของมวลวัสดุบ่อนและผลผลิตที่ได้จากการลดขนาด.....	13
4.1	แสดงผลของการกระจายตัวของขนาดของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยใน การย่อยครั้งที่ 1 เพื่อนำไปคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก.....	42
4.2	การคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหักจากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง	43

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	PCB ชนิดหน้าเดียว (Single-Sided Boards).....	7
2.2	PCB ชนิดสองหน้า (Double-sided Boards).....	7
2.3	PCB ชนิดหลายชั้น (Multi-layer Boards).....	7
2.4	ภาพจำลองลูกกลิ้งแบบพื้นเลื่อยและทิศทางการหมุน.....	11
2.5	แสดงร่องฟันในเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง.....	11
2.6	แสดงแบบจำลองการลดขนาดของวัสดุ.....	14
2.7	การวิเคราะห์การกระจายขนาดของ PC และ PCB หลังการลดขนาดด้วย Hammer mill.....	15
2.8	การวิเคราะห์การกระจายขนาดของแผ่น PCB หลังการลดขนาดด้วย Hammer mill และ Hammer mill - Pin mill.....	16
2.9	เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง(สัญลักษณ์) และค่าที่ได้จากการคำนวณ(เส้น) จากการกระจายขนาดสะสมของแต่ละช่วงระยะห่างของลูกกลิ้งที่ใช้.....	18
3.1	ตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.2	ตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ตัดแล้ว.....	23
3.3	เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่หนึ่ง.....	24
3.4	เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่สอง.....	24
3.5	ลักษณะพื้นเลื่อยบนหน้าลูกกลิ้ง ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่หนึ่ง..	25
3.6	ลักษณะพื้นเลื่อยบนหน้าลูกกลิ้ง ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่สอง..	25
3.7	เครื่องบดแบบแท่งโลหะ.....	26
3.8	แสดงวิธีการเปิดฝาย่อยของเครื่องบดแบบแท่งโลหะเพื่อการเก็บตัวอย่าง.....	27
4.1	แสดงเส้นใยแก้วที่อยู่ในอีพอกซีเรซิน.....	31
4.2	แสดงทองแดงที่แยกตัวเป็นอิสระ และเส้นใยแก้วในอีพอกซีเรซินหลังจากการลดขนาด.....	32
4.3	การกระจายตัวของขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่หนึ่ง ที่ระยะห่างของพื้นเลื่อย 4 มิลลิเมตร..	33

ภาพที่	หน้า	
4.4	การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจรวีเล็กทรอนิกส์ หลังการลดขนาดด้วย เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ที่ระยะห่างของฟันเลื่อย 3 มิลลิเมตร..	33
4.5	การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจรวีเล็กทรอนิกส์ หลังการบดด้วยเครื่อง บดแบบแท่งโลหะ.....	34
4.6	เปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบ ลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ.....	35
4.7	แสดงเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อย แบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง ที่ขนาดฟันเลื่อย 4 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	37
4.8	แสดงเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง จากการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่ง โลหะ.....	38
4.9	แสดงปริมาณของพลาสติกหลังจากการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ.....	39
4.10	การกระจายตัวโดยน้ำหนักของทองแดงและพลาสติก ที่เวลาในการบด 60 นาที	40
4.11	การกระจายตัวโดยน้ำหนักของทองแดงและพลาสติก ที่เวลาในการบด 120 นาที .....	40
4.12	การกระจายตัวโดยน้ำหนักของทองแดงและพลาสติก ที่เวลาในการบด 180 นาที .....	41
4.13	การกระจายตัวของขนาดที่ได้จากสมการการแตกหักใน class 1 จากเครื่อง ย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ระยะห่างฟันที่ 4 มิลลิเมตร.....	47
4.14	การกระจายตัวของขนาดที่ได้จากสมการการแตกหักใน class 1 จากเครื่อง ย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ระยะห่างฟันที่ 3 มิลลิเมตร.....	48

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันขยะจากซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ในหลายประเทศทั่วโลก ซึ่งเป็นเพราะว่าการบริโภคอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มมากขึ้นและมีเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกคิดค้นพัฒนาขึ้นอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งยังมีการออกแบบให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สั้นลง ส่งผลให้ขยะจากซากสิ่งเหล่านี้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทุกปี ซึ่งวิธีการกำจัดขยะเหล่านี้ไม่เคยได้รับการพัฒนาเท่าที่ควรและก็มักจะใช้วิธีขุดฝังกลบหรือเผา อันตรายจึงเกิดขึ้นเมื่อมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม ทำให้สารโลหะหนัก สารพิษ ไอพิกซ์ หรือสิ่งตกค้างอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบ อาจรั่วไหลไปสู่แหล่งน้ำและดิน ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคนในท้องถิ่นเป็นอย่างมาก การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แล้วจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ซึ่งเป็นการลดขยะและลดผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและเป็นการเก็บกลับคืนทรัพยากรที่มีอยู่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การรีไซเคิลแผงวงจรจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ มีกระบวนการที่หลากหลาย อาทิเช่น ใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical processing) กระบวนการทางเคมี (Chemical processing) กระบวนการทางความร้อน (Thermal processing) กระบวนการทางชีวภาพ (Biological processing) หรือ การนำทั้ง 3 กระบวนการมารวมกัน แต่กระบวนการทางเคมี ส่วนใหญ่จะแยกวัสดุโดยใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย หากไม่มีการจัดการที่ดีอาจเกิดมลพิษไม่ว่าจะเป็นทางน้ำ ทางบก หรือทางอากาศได้ หรือการใช้กระบวนการทางความร้อนโดยมีพื้นฐานอยู่ที่กระบวนการเผาหรือหลอมเพื่อแยกเอาวัสดุออกมา ซึ่งมีผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและอากาศมาก อาจเกิดก๊าซที่มาจากกาเผาไหม้ของพลาสติกที่เป็นอันตราย และยังส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศเกิดสภาวะเรือนกระจกได้อีกด้วย

จากข้างต้นจึงเลือกใช้กระบวนการทางกายภาพเพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้น อีกทั้งยังมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีเครื่องมือหลากหลายชนิด เพื่อนำมาใช้ในการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จนสามารถแยกระหว่างส่วนที่เป็นโลหะและไม่ใช่อโลหะได้ ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลนี้

ขั้นตอนที่ถือว่าเป็นกุญแจสำคัญของกระบวนการคือ การลดขนาด โดยการบดย่อยเพื่อให้ซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลงก่อนนำไปสู่ขั้นตอนอื่นๆ แต่ในปัจจุบันเครื่องมือที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือที่เข้บดย่อยพลาสติก ทำให้มีปัญหาในการนำเอามาใช้ เพราะแผ่น PCB มีมิติของความแบนมากกว่าความหนา มาก นอกจากนี้ยังประกอบจากวัสดุ 2 ชนิด ซึ่งเสริมคุณสมบัติกัน เช่น เรซินกับทองแดง ทำให้การบดเพื่อให้แยกตัวจะยากกว่าพลาสติกทั่วไป ซึ่งการลดขนาดที่ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยงหรือเครื่องบดย่อยพลาสติกมาดัดแปลงในการใช้งาน ทำให้ผลการลดขนาดที่ได้มีประสิทธิภาพที่ต่ำ

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น โครงการวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องย่อยแมงวงจระเข้แบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยขึ้นมา เพื่อลดขนาดแมงวงจระเข้ให้มีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถแยกพลาสติกเรซินกับทองแดงได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะทำให้ขั้นตอนคัดแยกต่อไปเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาพฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงจากซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย (Groove Teeth roll crusher) และเครื่องบดแบบแท่งโลหะ (Rod mill)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1) เก็บรวบรวมซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ส่วนเกินหรือที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพจากกระบวนการผลิต

1.3.2) ลดขนาดซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย (Groove Teeth roll crusher) และเครื่องบดแบบแท่งโลหะ (Rod mill)

1.3.3) ศึกษารูปร่างพฤติกรรมการกระจายขนาด และการหลุดแยกของทองแดงจากซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) สามารถพัฒนากระบวนการลดขนาดซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2) สามารถนำกระบวนการไปใช้ได้จริง ในเชิงพาณิชย์และสามารถพัฒนาในการรีไซเคิลวัสดุประเภทเดียวกันที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (พรวรัตน์ เพชรภักดีและคณะ, 2551)

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board, PCB) คือ ส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้เป็นทางเดินสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่อยู่ในวงจร ทำหน้าที่เป็นกลไกหลักในการทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นทำงานได้ ซึ่งส่วนนี้จะทำให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบไปด้วยแผ่นฐานที่ทำจากแผ่นฉนวนบางๆอัดยึดรวมกันด้วยสารประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) เพื่อรองรับแผ่นตัวนำที่ใช้เชื่อมสัญญาณไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ (ทั่วไปใช้ทองแดง) ในครั้งแรกนั้นตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อทำขึ้นจากตัวทำหมึกที่เป็นตัวนำลงไปบนแผ่นฐาน ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า Printed Circuit Board หรือ PCB แต่ปัจจุบันนิยมใช้แผ่นทองแดงบางๆ ยึดเข้ากับผิวหน้าของแผ่นฐานด้วยกาวเรียกว่า Metal clad laminate แต่เราก็ยังเรียกกันว่า “Printed Circuit Board” อยู่ดี แผ่นฐานจะทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนน้ำหนักเบาและความแข็งแรงที่นิยมใช้มี 3 ชนิด คือ

1. ฟีนอลิก (phenolic)
2. กลาสอีพอกซี (glass epoxy)
3. สารประกอบ อีพอกซี (composite epoxy)

ในครั้งแรกๆ การใช้งานแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นฐานที่ใช้จะทำจากกระดาษบางๆ ชุบฟีนอลิกแล้วอัดรวมกันให้แข็งแรง แต่แผงวงจรที่ทำจากฟีนอลิกนั้นจะมีลักษณะประเภทแตกหักได้ง่าย มีความแข็งแรงต่ำไม่ค่อยต้านทานความชื้น ต่อมาได้มีการนำใยฝ้ายมาใช้แทนที่กระดาษ ทำให้ได้ความแข็งแรงทางกลสูงขึ้น และมีความต้านทานต่อความชื้นสูงแต่ทำให้ความแข็งแรงทางไฟฟ้าลดลงจากนั้น จึงได้มีการนำใยแก้วมาทำเป็นแผ่นฐาน โดยทอใยแก้วชั้นเดียวหรือหลายชั้นเข้าด้วยกัน แล้วยึดด้วยอีพอกซีเรซินจึงเรียกแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ว่า กลาสอีพอกซี ลักษณะการทอเป็นพื้นของใยแก้ว



### 2.1.1 โครงสร้างของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนแผ่นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า ส่วนใหญ่มักทำจากวัสดุพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งแรงขึ้น กรณีวัสดุคุณภาพต่ำก็จะใช้กระดาษที่เติมวัสดุฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) เพื่อให้แข็งแรงขึ้น สำหรับวัสดุคุณภาพสูงจะเป็นพวกเส้นใยแก้ว (Fibre glass) ที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยชั้นบางๆของกาอีพอกซี (epoxide laminates) นอกจากนี้ยังมีวัสดุคุณภาพสูงพิเศษที่สามารถทนความร้อนได้สูง ได้แก่ พอลิเมอร์จำพวกโพลีอิมิด (polyimides) และ PTFE (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งเป็นเทฟลอนชนิดหนึ่ง

สำหรับส่วนที่เป็นวงจรทำหน้าที่นำไฟฟ้านั้นส่วนใหญ่มักจะทำมาจากทองแดงเพื่อประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าที่ดี โดยลายของวงจรเกิดจากการนำวัสดุป้องกันการกัดลอก (Etch resistant material) มาเคลือบไว้ก่อนที่จะนำไปเข้ากระบวนการกัดลอกลายตามแบบที่ได้พิมพ์ไว้ วัสดุป้องกันการกัดลอกจะประกอบด้วย นิกเกิล (nickel), เงิน (silver), ดีบุก (tin), ดีบุก-ตะกั่ว (tin-lead) และ ทองคำ (gold) ในส่วนของบอร์ดของแผงวงจรพิมพ์จะประกอบด้วย วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าประเภทเรซิน (resin) ในแผงวงจรเกรดสูง มักใช้เรซิน และกาอีพอกซี (epoxy) ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่ทำให้รูเจาะบนแผงวงจรเสียรูปง่ายเมื่อมีความร้อนสูง

ในส่วนของโลหะมีค่านั้นจะอยู่ในรูปของการชุบหรือเคลือบอยู่กับวัสดุอื่น เช่น เคลือบอยู่บนแผงวงจรทองแดง, เคลือบอยู่บริเวณขั้วที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผงวงจร และเคลือบอยู่บนส่วนที่เป็นเหล็ก หรือนิกเกิลของแผงวงจรพิมพ์ โดยจะเคลือบอยู่ในลักษณะต่างๆ ในระดับไมโครเมตร

### 2.1.2 ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (พรวรัตน์ เพชรภักดีและคณะ, 2551)

#### 2.1.2.1 Single-Sided Boards

เป็นวงจรพิมพ์ชนิดมีลายทองแดงหน้าเดียว ประกอบไปด้วยแผ่นฐานและชั้นของแผ่นตัวนำเพียงด้านเดียว และมักจะใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ด้านตรงข้ามกับเส้นลายวงจร เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปที่มีความหนาแน่นของวงจรไม่มากนักที่ใช้กันอยู่มากคือ ฟีนอลิกและอีพอกซีซึ่งฟีนอลิกจะมีราคาถูกกว่า แต่มีข้อเสียคือเปราะมีความแข็งแรงต่ำและมีความต้านทานความชื้นต่ำ ไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีความถี่สูงๆ

### 2.1.2.2 Double-sided Boards

เป็นวงจรพิมพ์ชนิดมีลายทองแดงอยู่ทั้ง 2 ด้าน ส่วนใหญ่ด้านหนึ่งมักจะปล่อยให้เป็นลายทองแดงเต็มแผ่นในลักษณะเป็นกราวนด์เพลน (Ground Plane) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดสัญญาณรบกวน มักใช้ในวงจรเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ วัสดุที่นิยมนำมาใช้คือ อีพอกซีชนิดเส้นใยแก้ว

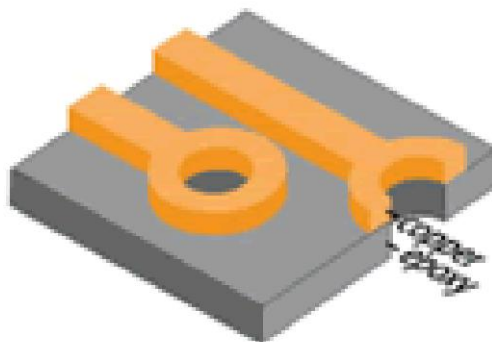
### 2.1.2.3 Multi-layer Boards

เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดหลายชั้น แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ประกอบไปด้วยชั้นของแผ่นตัวนำและแผ่นฐานมากกว่าสองชั้นขึ้นไป มีเส้นลายวงจรเพื่อเชื่อมสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างชั้นใน (Inner Layer) และชั้นนอก (Outer Layer) และภายในรูมักจะชุบด้วยทองแดง เพื่อเชื่อมสัญญาณระหว่างชั้น เหมาะสำหรับงานที่มีความหนาแน่นของตัวอุปกรณ์สูงถึงสูงมาก วัสดุอีพอกซีจะเป็นที่นิยมกันมาก เพราะคุณสมบัติที่ดีคือการทนต่ออุณหภูมิที่สูง และไม่บิดงอได้ง่ายเหมือนกับชนิดฟินอลิก ซึ่งไม่เป็นที่นิยมและมีความต้านทานความชื้นต่ำ ทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนง่ายจึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีความถี่สูงๆ

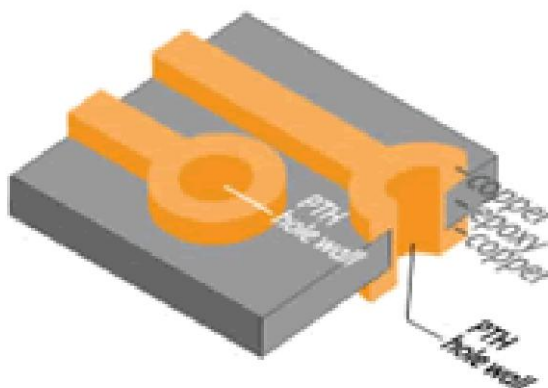
นอกจากนี้ยังมีการเรียกแผ่นวงจรพิมพ์ ตามสารที่เป็นพื้นฉนวน เช่น แผ่นวงจรพิมพ์แบบเบกาไลต์ (Bakelite) ซึ่งใช้เบกาไลต์เป็นฉนวน ส่วนใหญ่มักมีสีน้ำตาล แผ่นวงจรพิมพ์แบบกลาสอีพอกซี (Glass Epoxy) ซึ่งจะใช้ใยแก้ว เป็นฉนวน มักมีสีต่าง ๆ แต่ส่วนใหญ่มักทำเป็นสีเขียวหรือสีฟ้า

### 2.1.2.4 Flexible Circuit PCB

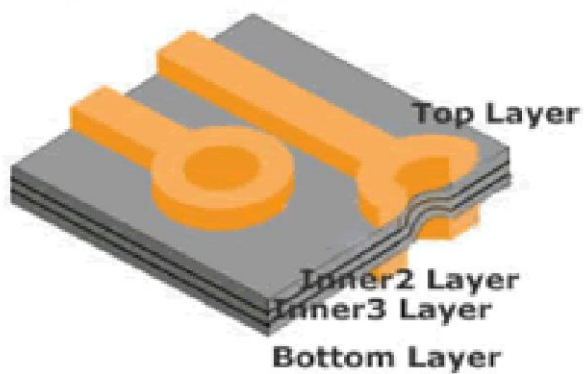
เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดอ่อนที่ใช้กับงานแผงวงจร ทั่วๆ ไปไม่สามารถติดตั้งได้ อาจเพราะถูกจำกัดด้วยพื้นที่ในการติดตั้งหรือการใช้งานจะต้องมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 PCB ชนิดหน้าเดียว (Single-Sided Boards)



ภาพที่ 2.2 PCB ชนิดสองหน้า (Double-sided Boards)



ภาพที่ 2.3 PCB ชนิดหลายชั้น (Multi-layer Boards)

จากแผงวงจรพิมพ์ในแต่ละประเภทข้างต้น จะเห็นว่ามีองค์ประกอบพื้นฐานของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 แบบ ได้แก่

1. ส่วนที่ไม่นำไฟฟ้า (a non-conducting substrate or laminate) เช่น พลาสติก, กาวเชื่อม และแก้ว ที่เป็นส่วนรองรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
2. ส่วนโลหะนำไฟฟ้าที่เป็นลายพิมพ์ ทำหน้าที่เป็นวงจรรนำไฟฟ้า (conductive circuits printed)
3. ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่อยู่บนแผงวงจรพิมพ์ (mounted components) เช่น IC, ไดโอด, ตัวเก็บประจุ, ตัวต้านทาน, ทρανซิสเตอร์ และชิปประมวลผล ต่างๆ

วงจรรนำไฟฟ้าบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะทำมาจากทองแดง เพื่อประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าที่ดี โดยลายของวงจรเกิดจากการนำวัสดุป้องกันการกัดลอกมาเคลือบไว้ก่อนที่จะนำไปเข้ากระบวนการกัดลอกลายตามแบบที่ได้พิมพ์ไว้

### 2.1.3 ส่วนประกอบโดยประมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

แผงวงจรที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันโดยเฉพาะโลหะมีค่า โดยจะพบว่าโลหะมีค่าที่อยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความเร็วในการทำงานสูง เช่น คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์สื่อสาร มักจะใช้โลหะมีค่ามากกว่า ดังนั้นจึงได้แบ่ง แผงวงจรพิมพ์ออกเป็นเกรดต่างๆ คือ แผงวงจรพิมพ์เกรดสูง, แผงวงจรพิมพ์เกรดปกติ และแผงวงจรพิมพ์เกรดต่ำ แต่ก็มีปัญหาในการแยกประเภทในตอนนี้อยู่ในรูปซากแล้ว ว่าแผงวงจรนั้นเคยเป็นของอุปกรณ์ใดมาก่อน ดังนั้นจึงได้คละรวมกันหมด (Populated PCB) ซึ่งส่วนประกอบของแผงวงจรพิมพ์โดยประมาณได้แสดงไว้ดังนี้

โลหะมีค่าที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์ เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม ฯลฯ ถึงแม้จะมีปริมาณน้อยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเครื่องใช้แต่ละชิ้น แต่หากรวบรวมให้ได้ปริมาณมาก ก่อนนำมาเข้าสู่กระบวนการคัดแยกและทำให้บริสุทธิ์ จะได้เป็นโลหะเกรดพิเศษ (Premium grade) สำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบ (secondary material) ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป กระบวนการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การนำเศษโลหะที่ได้จากการคัดแยกป้อนสู่โรงงานหลอมโลหะทองแดง เพื่อแยกเอาโลหะมีค่าออกจากทองแดง ก่อนที่จะนำโลหะมีค่านั้นเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ และเทเป็นแท่งสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป

## ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบโดยประมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

พวกโลหะ เช่น กาว, อีพ็อกซี, แก้ว เป็นต้น	~70 %
ทองแดง	~16-20 %
โลหะบัดกรี	~4 %
เหล็ก	~3-8 %
นิกเกิล	~2 %
เงิน	~0.05 %
ทองคำ	~0.03-0.1 %
พอลิเอทิลีน	~0.005-0.01 %
อื่นๆ เช่น บิสมีต, แอนติโมนี, แทนทาลัม แพลตินัม เป็นต้น	~0.01 %

ที่มา : Murugan, R.V., Bharat, S., Deshpande A.P., Varughese, S. and Haridoss, P. (2007), Yihui, Z., Keqiang, Q (2009)

โลหะมีค่าที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์ เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น ทองคำ เงิน แพลตินัม ฯลฯ ถึงแม้จะมีปริมาณน้อยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเครื่องใช้แต่ละชิ้น แต่หากรวบรวมให้ได้ปริมาณมาก ก่อนนำมาเข้าสู่กระบวนการคัดแยกและทำให้บริสุทธิ์ จะได้เป็นโลหะเกรดพิเศษ (Premium grade) สำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบ (secondary material) ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป กระบวนการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การนำเศษโลหะที่ได้จากการคัดแยกป้อนสู่โรงงานหลอมโลหะทองแดง เพื่อแยกเอาโลหะมีค่าออกจากทองแดง ก่อนที่จะนำโลหะมีค่านั้นเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ และเทเป็นแท่งสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป

### 2.1.4 กระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งได้ 3 กระบวนการใหญ่ ดังนี้

1. ขั้นกระบวนการลดขนาด (Comminution)
2. ขั้นกระบวนการคัดแยก (Separation)
3. ขั้นกระบวนการเก็บกลับคืนและทำให้บริสุทธิ์ (Recovering/Refining)

โดยกระบวนการที่ถือได้ว่าเป็นกฎเกณฑ์สำคัญของทุกขั้นตอนคือ ขั้นตอนการลดขนาด เนื่องจากเป็นขั้นตอนแรกที่จะนำไปสู่กระบวนการต่อไป หากมีการลดขนาดที่ดีกระบวนการเก็บกลับคืนโลหะทองแดงออกมาก็ดีขึ้นไปด้วย เพราะฉะนั้นเครื่องมืออุปกรณ์ที่นำมาใช้ในขั้นตอนการลดขนาดจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้เป็นเครื่องมือในการลดขนาดแผงวงจร โดยทั่วไปที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. เครื่องตัดย่อย (shredder) อุปกรณ์ประเภทนี้ทำงานคล้ายการใช้กรรไกรฉีกตัดชิ้นวัสดุอาศัยแรงตัดเฉือน อุปกรณ์ประเภทนี้ใช้กับวัสดุที่มีความเหนียวและรูปทรงไม่สม่ำเสมอ มีมิติด้านความยาวมาก รูปทรงเป็นแผ่นแบน จึงเหมาะสำหรับการลดขนาดเศษเหลือทิ้งและพลาสติก

2. เครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) อุปกรณ์ประเภทนี้เหมาะสำหรับการลดขนาดวัสดุที่แข็งและเปราะ การทำงานของอุปกรณ์ประเภทนี้ใช้การเหวี่ยงกระทกของค้อนที่ยึดกับแกนหรือแผ่นหมุน แรงเหวี่ยงจะส่งให้ค้อนหมุนไปรอบๆ ด้วยความเร็วและกระทกวัสดุที่ป้อนเข้าด้วยพลังงานสูงให้แตกหรือขาดออกจากกัน (ขวัญชัย ลีเฝ้าพันธุ์, 2553)

แต่เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับการลดขนาดแผงวงจร ซึ่งมีวัสดุหลักคือ อีพอกซีเรซิน มีสมบัติที่แข็งและเหนียว และมีโลหะทองแดงเคลือบอยู่ในลักษณะเสริมแรงกัน ทำให้ประสิทธิภาพจากการลดขนาดไม่ดี ขนาดไม่ค่อยสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้เคลือบในขั้นตอนต่อไปทำให้มีประสิทธิภาพที่ไม่ดีไปด้วย ด้วยเหตุดังกล่าว จึงมีการออกแบบพัฒนาเครื่องย่อยแบบฟันเลื่อยขึ้นมา เพื่อให้กระบวนการลดขนาดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้การหลุดแยกของทองแดงกับเรซินได้ดียิ่งขึ้น

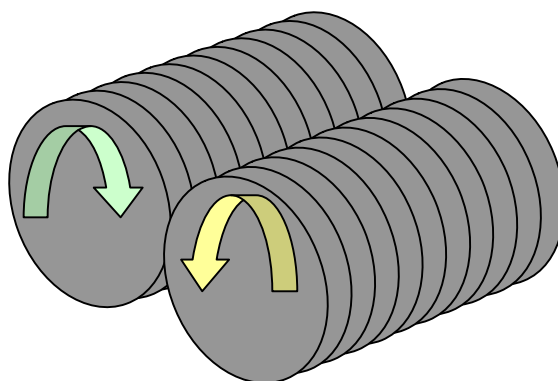
### 2.1.5 การประยุกต์ใช้ทองแดงในปัจจุบัน

เนื่องด้วยคุณสมบัติของทองแดงที่มีลักษณะดัดได้ง่าย จึงใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

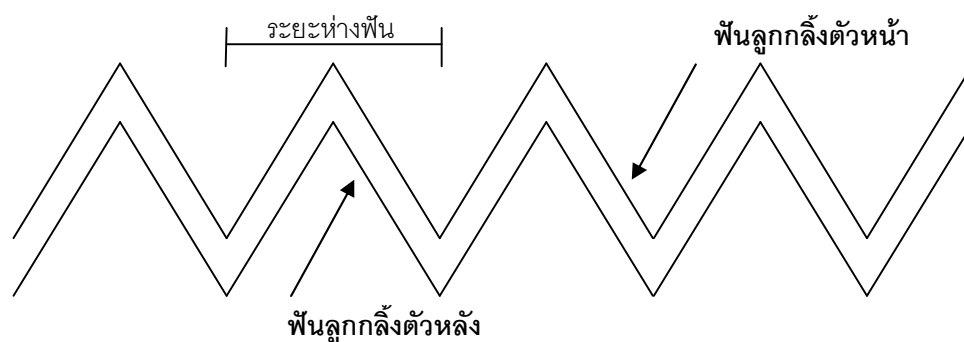
1. ใช้ทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ
2. ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง
3. ใช้ในการผลิตหม้อต้มน้ำ กาน้ำ ถังน้ำ ท่อน้ำ และขดลวด กาดม้มน้ำร้อน ฯลฯ
4. ใช้เคลือบผิวของโลหะ
5. ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

## 2.2 เครื่องลดขนาดแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย (Groove Teeth roll crusher)

หลักการทำงานเหมือนกับเครื่องบดย่อยแบบลูกกลิ้ง (Roll crusher) ทั่วไป คือ ลูกกลิ้งตัวหน้าและลูกกลิ้งตัวหลังจะหมุนเข้าหากัน แต่สิ่งที่แตกต่างจากลูกกลิ้งทั่วไป คือ ผิวหน้าลูกกลิ้งจะเซาะเป็นร่องสามเหลี่ยมด้านเท่าทั้ง 2 ลูกมีขนาดเท่ากัน เมื่อชิ้นเข้าหากันจะมีระยะชิดประมาณ 0.2 – 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งจากลักษณะของฟันที่ถูกเซาะเป็นร่องสามเหลี่ยม เมื่อฟันของลูกกลิ้งทั้งสองตัวหมุนเข้าหากัน จะทำให้เกิดแรงตัดแบบเฉือน ทำให้เหมาะกับการลดขนาดผงวงจรมิที่มีลักษณะเป็นแผ่นและแบนเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2.4 ภาพจำลองลูกกลิ้งแบบฟันเลื่อยและทิศทางการหมุน



ภาพที่ 2.5 แสดงร่องฟันในเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง

## 2.3 การกระจายของขนาดของวัสดุที่ผ่านการลดขนาด

การเปลี่ยนแปลงของการกระจายของขนาดหลังจากการลดขนาดเป็นดัชนีหนึ่งที่วัดสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ การกระจายของขนาดที่ได้จากอุปกรณ์เดียวกันในสภาวะการทำงานเหมือนกันสำหรับวัสดุต่างชนิดกันจะแตกต่างกัน (ขวัญชัย ลิเฝ้าพันธุ์, 2551)

### 2.3.1 ความสัมพันธ์ของมวลสมมูลและการกระจายของขนาด

การพิจารณาการแตกหักและมวลสมมูลของขนาดเป็นแนวทางที่แสดงข้อเท็จจริงในการลดขนาดมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการแตกหักแต่ละครั้งจะมีกิจกรรมหลักเกิดขึ้น 2 กิจกรรม คือ (1) โอกาสที่ก้อนหรืออนุภาควัสดุหรือแร่ถูกเลือกให้ถูกลดขนาด และ (2) การแตกหักของก้อนหรืออนุภาคของวัสดุหรือแร่ไปเป็นขนาดต่างๆ ที่เล็กลง แนวคิดนี้เป็นพื้นฐานของแบบจำลองที่อาศัยกลไกการแตกหักและประยุกต์ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยกำหนดให้ การแตกหักของก้อนหรืออนุภาควัสดุหรือแร่กระจายเป็นขนาดที่เล็กลง แทนได้ด้วยเมตริกซ์ lower triangular metric เรียกว่า ฟังก์ชันการแตกหัก (breakage function)

### 2.3.2 ฟังก์ชันการแตกหัก (breakage function)

เป็นค่าการกระจายขนาดสะสมที่เกิดจากการแตกหักครั้งเดียวของวัสดุก้อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยว ผลที่ได้จากการแตกหักของวัสดุก้อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยวเขียนแทนได้โดยการกระจายของขนาดชุดหนึ่ง ในทางปฏิบัติ การแตกหักเกิดขึ้นจากการแตกของวัสดุก้อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยวซ้ำๆ กันหลายๆ ก้อนพร้อมๆ กัน และก้อนที่แตกหักมาก่อนหน้าแล้วก็ถูกทำให้แตกหักซ้ำอีกให้มีขนาดเล็กลง ดังนั้น การจำลองรูปแบบการแตกหักที่เกิดขึ้นจริงในการทำงานจึงต้องพิจารณาการแตกหักของวัสดุก้อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยวหลายๆ ก้อนหรือหลายๆ อนุภาค ฟังก์ชันการแตกหักจึงประกอบด้วยปริมาณมวลของวัสดุในแต่ละช่วงขนาดที่เกิดจากการแตกหักครั้งเดียว ซึ่งเป็น พารามิเตอร์การแตกหัก (breakage parameters)

การหาค่าฟังก์ชันการแตกหัก อาจทำได้โดยใช้สมการการกระจายขนาดจากการแตกหักของบรอดเบนท์และแคลคอต (Broadbent and Callcott) ดังสมการที่ 2.1



$$B_{(x,y)} = \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{y}\right)^n\right]}{1 - \exp(-1)} \tag{2.1}$$

เมื่อ  $n = 1$

$B_{(x,y)}$  = ปริมาณมวลสะสมที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดนั้นๆ

จากสมการของบรอดเบนท์และแคลคอต เป็นสมการที่นำมาใช้กับการแตกหักของแร่ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างจากการแตกหักของแผ่น PCB ซึ่งมีมิติกว้างยาวมากกว่าความหนามาก เพราะฉะนั้นจึงหาค่าฟังก์ชันการแตกหักจากการทดลอง ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัว โดยสามารถจำลองการกระจายของขนาดและมวลของวัสดุป้อนและผลผลิตที่ได้จากการลดขนาด สามารถเขียนแทนได้โดยตารางที่ 2.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงการกระจายขนาดของมวลวัสดุป้อนและผลผลิตที่ได้จากการลดขนาด

ขนาด	วัสดุป้อน	ผลผลิตรวม	ผลผลิตแตกตามขนาดก่อนหน้า				
1	$F_1$	$P_1$	$B_{1,1}$	0	0	0	0
2	$F_2$	$P_2$	$B_{2,1}$	$B_{2,2}$	0	0	0
3	$F_3$	$P_3$	$B_{3,1}$	$B_{3,2}$	$B_{3,3}$	0	0
.	.	.	.	.	.	.	0
n	$F_n$	$P_n$	$B_{n,1}$	$B_{n,2}$	$B_{n,3}$	$B_{n,n}$	0
n+1	$F_{n+1}$	$P_{n+1}$	$B_{n+1,1}$	$B_{n+1,2}$	$B_{n+1,3}$	$B_{n+1,n}$	$B_{n+1,n+1}$

จากตารางที่ 2.2 สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการสมดุลมวลและขนาด (mass-size balance equation) ดังนี้

$$P_{ij} = B_{ij} \cdot F_j \tag{2.2}$$

โดยที่  $P_{ij}$  = การกระจายขนาดของผลผลิตที่ได้  
 $i$  = ช่วงขนาด

- $j$  = ขนาดป้อนเข้าสู่กระบวนการแตกหักใดๆ  
 $B_{i,j}$  = ฟังก์ชันการแตกหัก  
 $F_j$  = การกระจายของวัสดุป้อน



ภาพที่ 2.6 แสดงแบบจำลองการลดขนาดของวัสดุ

ดังนั้นสามารถเขียนสมการในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \cdot \\ P_n \\ P_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{2,1} & B_{2,2} & 0 & 0 & 0 \\ B_{3,1} & B_{3,2} & B_{3,3} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ B_{n,1} & B_{n,2} & B_{n,3} & B_{n,n} & 0 \\ B_{n+1,1} & B_{n+1,2} & B_{n+1,3} & B_{n+1,n} & B_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \cdot \\ F_n \\ F_{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

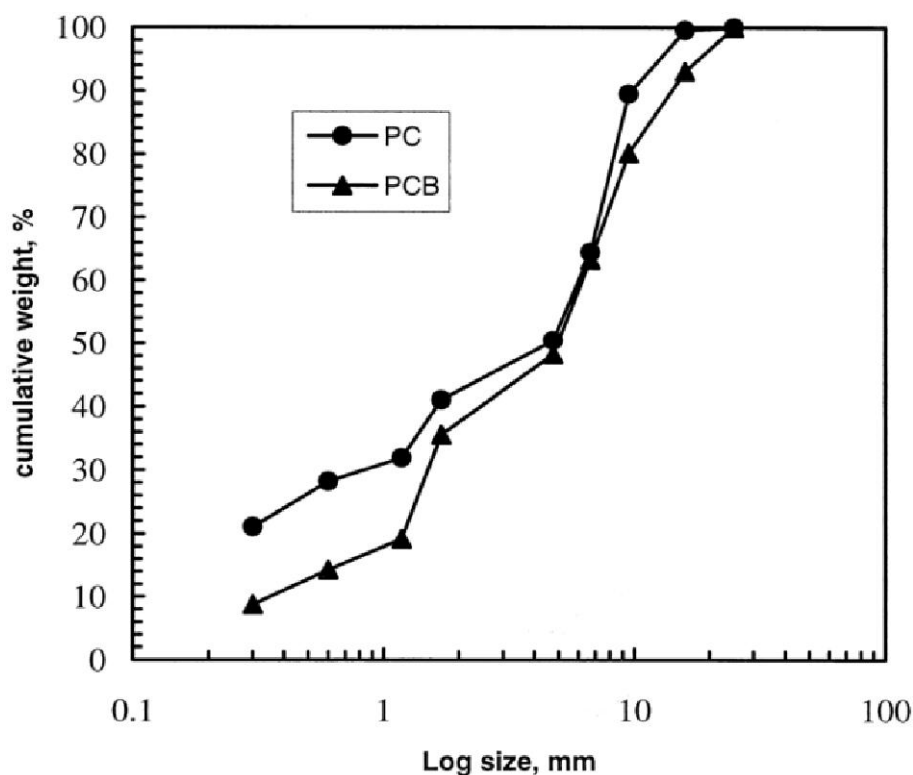
จากสมการ 2.3 สมการเมตริกซ์ข้างต้น เป็นสมการการแตกหักซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของเมตริกซ์สามเหลี่ยมล่าง (lower triangular matrix) สามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของการแตกหักของวัสดุแผ่น PCB ที่ผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยได้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 การศึกษาของ Shun Zhang และ Eric Forsberg

Shun Zhang และ Eric Forsberg (1999) ได้ศึกษาจากการนำเอาเครื่องคอมพิวเตอร์ที่หมดอายุการใช้งานแล้วกับแผ่น PCB มาใช้ในงานวิจัย เพื่อหาพฤติกรรมการหลุดแยกของโลหะ

กับพลาสติก โดยผ่านการลดขนาดด้วย Hammer Mill พบว่า หลังจากผ่านการลดขนาดแล้วเกินกว่า 50% จะมีขนาดเกินกว่า 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของโลหะทองแดงจากพลาสติกประมาณ 60% ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการลดขนาดด้วย Hammer Mill ขนาดและการหลุดแยกมีประสิทธิภาพที่ไม่ดี

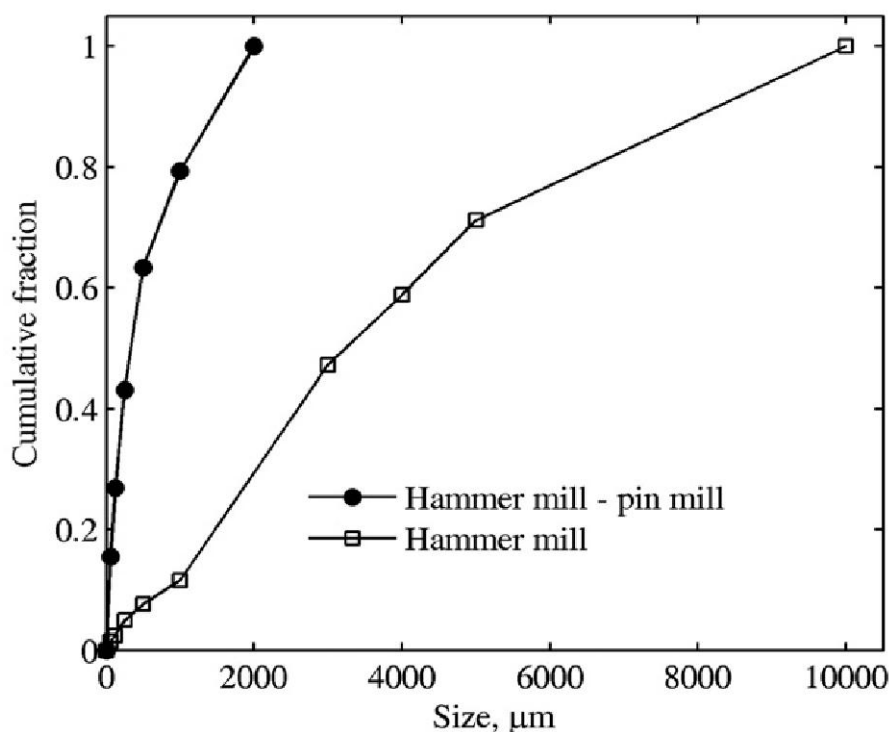


ภาพที่ 2.7 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของ PC และ PCB หลังการลดขนาดด้วย Hammer mill

#### 2.4.2 การศึกษาของ R. Vetri Murugan, S. Bharat, Abhijit P. Deshpande, Susy Varughese และ Prathap Haridoss

R. Vetri Murugan, S. Bharat, Abhijit P. Deshpande, Susy Varughese และ Prathap Haridoss (2007) ได้ศึกษาการลดขนาดแผ่น PCB และการแยกโลหะออกจากตัวพลาสติก โดยลดขนาดด้วย hammer mill จากงานวิจัยพบว่าการกระจายตัวของขนาดค่อนข้างมาก โดยกว่า 70% ของแผ่น PCB หลังการลดขนาดมีขนาดมากกว่า 2000  $\mu\text{m}$  ส่งผลให้การหลุดแยกระหว่างทองแดงกับพลาสติก ไม่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องนำ Pin Mill เข้ามาช่วยในการบด

ผลที่ได้คือ มีขนาดที่ต่ำกว่า 2000  $\mu\text{m}$  ทำให้การหลุดแยกระหว่างทองแดงกับเรซินดีขึ้น แต่เนื่องจากการบดด้วย Pin Mill นั้น ต้องใช้พลังงานสูงมาก และขนาดที่ได้ก็มีความละเอียดมากจนเกินไป จึงทำให้ไม่คุ้มค่าในการนำไปใช้จริง



ภาพที่ 2.8 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของแผ่น PCB หลังการลดขนาดด้วย Hammer mill และ Hammer mill - Pin mill

#### 2.4.3 การศึกษาของ H.W. Van Der Glas, A. Van Der Bilt, L.W. Olthoff และ F. Bosman

H.W. Van Der Glas, A. Van Der Bilt, L.W. Olthoff และ F. Bosman (1987) ได้ศึกษาการบดย่อยของอาหารจากการเคี้ยวของมนุษย์ โดยอยู่ในรูปของค่าฟังก์ชันการแตกหัก โดยใช้อาหารที่ทำมาจากยางซิลิโคน โดยใช้ขนาดของอาหารที่แตกต่างกัน 7 ขนาด ในช่วง 1.2 - 8.0 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีสีแตกต่างกันไปในแต่ละขนาด ซึ่งการกระจายตัวจากการแตกหักจะศึกษาจากการเคี้ยวเพียงครั้งเดียว หลังจากการเคี้ยวการกระจายตัวของสีจะบ่งบอกถึงการแตกหักของอาหาร จากผลการทดลองนำมาวิเคราะห์ฟังก์ชันการแตกหักและการกระจายตัวของอนุภาคที่ถูกเลือกให้แตกหัก

โดยขนาดของการแตกหักที่ใหญ่ที่สุดคือ 4 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นตัวแปรสำคัญทางกายวิภาคและสรีรวิทยาในด้านเกี่ยวกับกระบวนการเคี้ยวของมนุษย์

#### 2.4.4 การศึกษาของ Aleksandar Fistes และ Gavriilo Tanovic

Aleksandar Fistes และ Gavriilo Tanovic (2005) ศึกษาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปของสมการเมตริกซ์ เพื่อนำมาทำนายการกระจายตัวของส่วนประกอบและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแป้งสาลีจากการบดครั้งแรก โดยนำผลที่ได้จากการทำนาย (คำนวณจากสมการการแตกหักในรูปของสมการเมตริกซ์) เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและส่วนประกอบที่ได้จากการทดลองจริง

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{i1} & \cdots & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{i2} & \cdots & X_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{1j} & X_{2j} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{nj} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{1m} & X_{2m} & \cdots & X_{im} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_i \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_j \\ \cdot \\ \cdot \\ X_m \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

จากสมการ 2.4 เป็นสมการเมตริกซ์ที่ใช้ในการทำนายการกระจายขนาดของอนุภาคจากการบดแป้ง ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการมีความแม่นยำสูง โดยมีความแม่นยำสูงถึง 97.42% เมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดของอนุภาคและ มีค่า 94.66% และ 97.43% ในการทำนายจากประมาณของเถ้าและประมาณของโปรตีนของผลผลิตที่ได้ ตามลำดับ

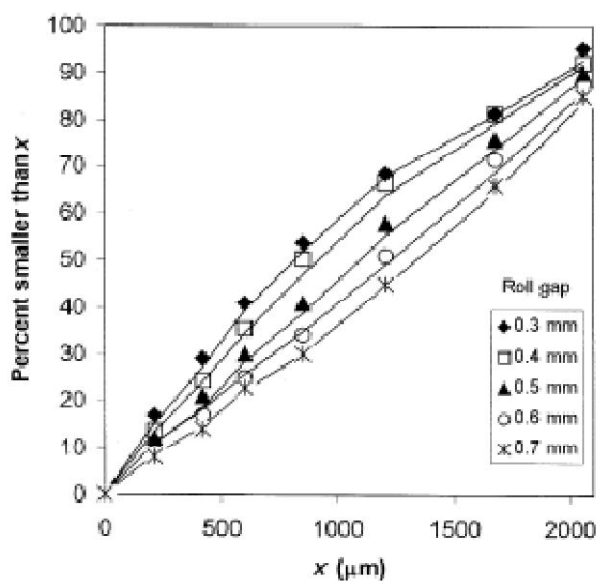
#### 2.4.5 การศึกษาของ Grant M. Campbell และ Colin Webb

Grant M. Campbell และ Colin Webb (2000) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าฟังก์ชันของการแตกหัก (Breakage equation) ระหว่างการกระจายขนาดของวัสดุป้อนเข้ากับวัสดุผลผลิตที่ได้หลังจากการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง โดยสมการการแตกหัก

จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาจากการบดข้าวสาลีด้วยเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง โดยให้การแตกหักของอนุภาคเป็นอิสระต่อกัน โดยในการทดลองจะกำหนดระยะห่างของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 มิลลิเมตรและใช้ตะแกรงขนาด 2057, 1676, 1204, 850, 600, 420 และ 211 ไมโครเมตร จากการทดลองจะได้สมการการแตกหัก ดังสมการ 2.4

$$\begin{bmatrix} 0.090 & 0.125 & 0.210 & 0.190 & 0.245 \\ 0.180 & 0.185 & 0.190 & 0.210 & 0.230 \\ 0.210 & 0.210 & 0.180 & 0.220 & 0.210 \\ 0.180 & 0.150 & 0.140 & 0.120 & 0.100 \\ 0.100 & 0.090 & 0.060 & 0.070 & 0.060 \\ 0.080 & 0.080 & 0.080 & 0.060 & 0.065 \\ 0.070 & 0.070 & 0.060 & 0.060 & 0.040 \\ 0.090 & 0.090 & 0.080 & 0.070 & 0.050 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 9.07 \\ 43.93 \\ 30.28 \\ 11.58 \\ 5.14 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.090 \\ 0.180 \\ 0.210 \\ 0.180 \\ 0.100 \\ 0.080 \\ 0.070 \\ 0.090 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

จากสมการ 2.4 ข้างต้น ที่ระยะห่างของลูกกลิ้งพื้นเลื่อย 0.7 มิลลิเมตร สามารถนำมาทำนายการกระจายขนาดในแต่ละระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งได้ ซึ่งพบว่าค่าที่ได้ระหว่างการทดลองกับการคำนวณจากสมการมีความใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 2.9 เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (เส้น) จากการกระจายขนาดสะสมของแต่ละช่วงระยะห่างของลูกกลิ้งที่ใช้บด

#### 2.4.6 การศึกษาของ ศักดิ์ชัย สมเชื้อ และ ระพีพันธ์ แดงตันกิ

ศักดิ์ชัย สมเชื้อ และ ระพีพันธ์ แดงตันกิ (2553) ได้ศึกษาการนำอีพอกซีเรซินที่ได้จากการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งพบว่าอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ชนิด Tetrabrobisphenol A และเส้นใยแก้ว (Glass fiber) เป็นส่วนประกอบหลักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้สารประกอบกลุ่มเอมีน (Amine group) เป็นตัวทำแข็ง (Hardener) โดยงานวิจัยนี้เป็นการแยกอีพอกซีเรซินจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดไนตริก (Nitric acid) รีไซเคิลเรซินที่ได้จากกระบวนการแยกมีสีเหลือง-ส้ม ลักษณะเป็นของเหลวหนืด เมื่อผสมรีไซเคิลเรซินกับอีพอกซีเรซินอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และใช้ตัวทำแข็งในกลุ่มของเอมีน เรซินสามารถขึ้นรูปได้ แต่มีสีเข้มกว่าอีพอกซีเรซินใหม่ ในส่วนของเส้นใยแก้วเมื่อผกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะได้เส้นใยแก้วที่มีสีคล้ายกับเส้นใยแก้วใหม่

#### 2.4.7 การศึกษาของ Tan Zhihai, He Yaqun, Xie Weining, Duan Chenlong, Zhou Enhui และ Yu Zheng

Tan Zhihai, He Yaqun, Xie Weining, Duan Chenlong, Zhou Enhui และ Yu Zheng (2010) ได้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เครื่องย่อยแรงกระแทกแบบเปียกโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการบดย่อยกับตัวแปรสำคัญที่ใช้ในกระบวนการ โดยวิเคราะห์กลไกการบดย่อย ลักษณะของค้อนเหวี่ยง ความเร็วรอบในการหมุน และอัตราการไหลของน้ำ ออกมาในรูปของการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution)

จากการทดลองพบว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อยู่ที่ขนาดหลังการบดของวัสดุ  $-1 + 0.75$  มิลลิเมตร อัตราการไหลของน้ำที่ 5.97 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และหัวค้อนแบบเรียบ (smooth hammerhead) ด้วยความเร็วของบดย่อย 1246.15 รอบต่อนาที

#### 2.4.8 การศึกษาของ C. Eswaraiah, T. Kavitha, S. Vidyasagar และ S.S. Narayanan

C. Eswaraiah, T. Kavitha, S. Vidyasagar และ S.S. Narayanan (2006) ได้ศึกษาการเก็บกลับคืนโลหะและพลาสติกจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้กระบวนการรีไซเคิลทาง

กายภาพในการแยกโลหะกับพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องแยกแบบอากาศ (Air classifier) และใช้วิธีการจุ่มลอยในการหาความสามารถในการแยกของเครื่องแยกแบบอากาศ ซึ่งค่าต่างๆจะแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการคัดแยก จากผลการทดลอง ประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกแบบใช้อากาศที่อัตราเร็วและความเร็วของอากาศแตกต่างกัน ที่ความเร็วของการป้อนคงที่ได้ถูกรายงานในรูปของโมเดล โดยกำหนดด้วยค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ค่า reduced efficiency curve parameter ( $\alpha$ ) ค่า corrected cut size  $(Va/Vt)50c$  และ ค่า size selectivity increment ( $\Delta S$ ) ในแต่ละกระบวนการ

#### 2.4.9 การศึกษาของ I.O. Ogunniyi, M.K.G. Vermaak และ D.R. Groot

I.O. Ogunniyi, M.K.G. Vermaak และ D.R. Groot (2009) ได้ศึกษาถึงส่วนประกอบทางเคมีและลักษณะของการหลุดแยกจากการลดขนาดผงวงจรรีโกลิธอนิกส์ โดยในการทดลองการลดขนาดใช้เครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยง หลังจากนั้นนำซากผงวงจรรีโกลิธอนิกส์มาวิเคราะห์หาปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของซากผงวงจรรีโกลิธอนิกส์ในสภาวะการเก็บกลับคืนที่แตกต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์ส่วนประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และ SEM เพื่อหาวิธีที่ดีและเหมาะสมสามารถนำไปใช้ให้คุ้มค่าต่อการลงทุนต่อไปได้



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย (Groove Teeth roll crusher) ร่วมกับเครื่องบดแบบแท่งโลหะ (Rod mill) โดยศึกษาการทดลองเชิงระดับห้องปฏิบัติการ โดยเป็นการพัฒนาการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องบดย่อยแบบค้อนเหวี่ยงที่มีการกระจายตัวของขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ค่อยดี

ทั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาสู่กระบวนการระดับอุตสาหกรรม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการรีไซเคิลวัสดุประเภทเดียวกันที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ โดยการทดลองมีแผนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1.1 เก็บรวบรวมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่เป็นส่วนเกินหรือไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ

3.1.2 ศึกษาส่วนประกอบโดยประมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

3.1.3 ศึกษากระบวนการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

3.1.4 ศึกษาการกระจายตัวของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย โดยรายงานผลในรูปแบบของฟังก์ชันการแตกหัก (Breakage Function)

#### 3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนเกินหรือไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ ชนิดมีลายทองแดงพิมพ์อยู่ทั้งสองข้าง (Double-sided Boards) โดยทั่วไปซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นโลหะ เช่น ทองแดงและส่วนที่ไม่เป็นโลหะ เช่น อีพอกซีเรซินและเส้นใยแก้ว ดังภาพที่ 3.1 แสดงตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย (Groove Teeth roll crusher) (ด้วยความอนุเคราะห์ คุณสมเกียรติ มงคลสมัย)

3.3.2 เครื่องบดแบบแท่งโลหะ (Rod mill) (ด้วยความอนุเคราะห์ คุณสมเกียรติ มงคลสมัย)

3.3.3 ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve)

3.3.4 เครื่องบดแบบวงแหวน (Ring mill)

3.3.5 เครื่องส่องจุลทรรศน์แบบออปติคัล (Optical microscopy)

3.3.6 เครื่องวิเคราะห์แบบเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)

3.3.8 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด

### 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบโดยประมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ก่อนนำตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่กระบวนการลดขนาด และการเก็บกลับคืน จะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพโดยสายตา และศึกษาส่วนประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยเครื่องวิเคราะห์แบบเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)

### 3.4.2 การลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

#### 3.4.2.1 การเตรียมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในงานวิจัยนี้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนเข้าสู่กระบวนการลดขนาดจะถูกตัดให้มีขนาด 7x7 ตารางเซนติเมตร เท่าๆกัน ดังภาพที่



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ตัดแล้ว

#### 3.4.2.2 การลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเครื่องบดย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อย

ในงานวิจัยนี้ กระบวนการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อย โดยศึกษาจากตัวแปรดังนี้

1. ขนาดของพื้นเลื่อย
2. ขั้นตอนในการลดขนาด

เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยที่นำมาใช้ในการทดลองประกอบด้วย 2 แบบ โดยมีระยะห่างของพื้นเลื่อยบนลูกกลิ้งที่แตกต่างกันที่ 4 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ในตัวที่หนึ่งและตัวที่สองตามลำดับ ดังภาพที่ 3.3 และ ภาพที่ 3.4



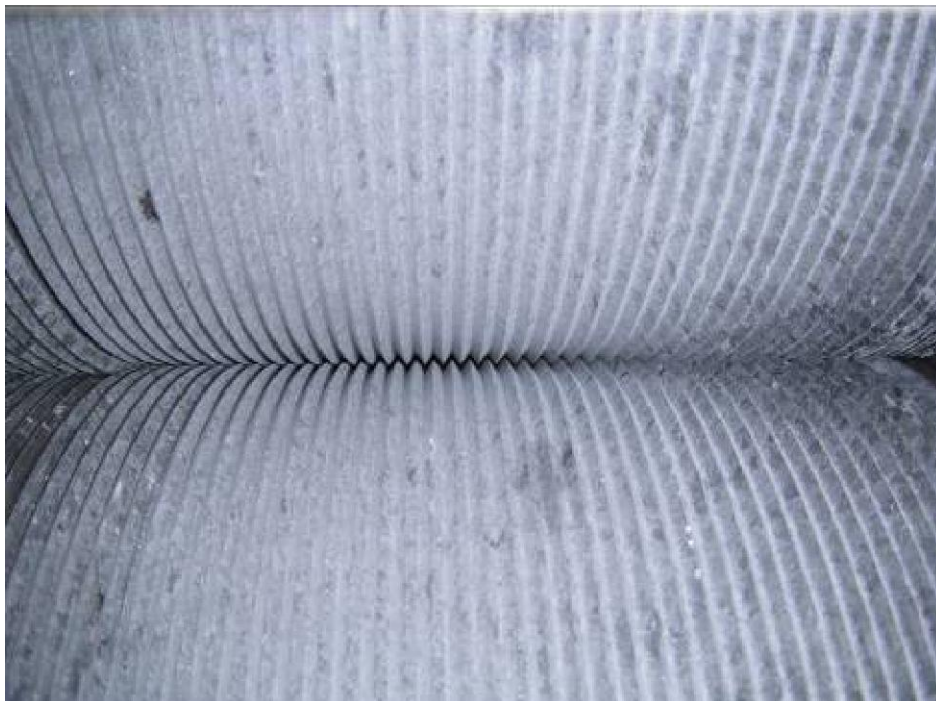
ภาพที่ 3.3 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง



ภาพที่ 3.4 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง



ภาพที่ 3.5 ลักษณะพื้นเลื่อยบนหน้าลูกกลิ้ง ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่หนึ่ง



ภาพที่ 3.6 ลักษณะพื้นเลื่อยบนหน้าลูกกลิ้ง ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่สอง

ในการทดลองเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยแต่ละตัว ใช้ความเร็วรอบในการหมุนที่ 180 รอบต่อนาที และลูกกลิ้งแต่ละตัวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 220 มิลลิเมตร

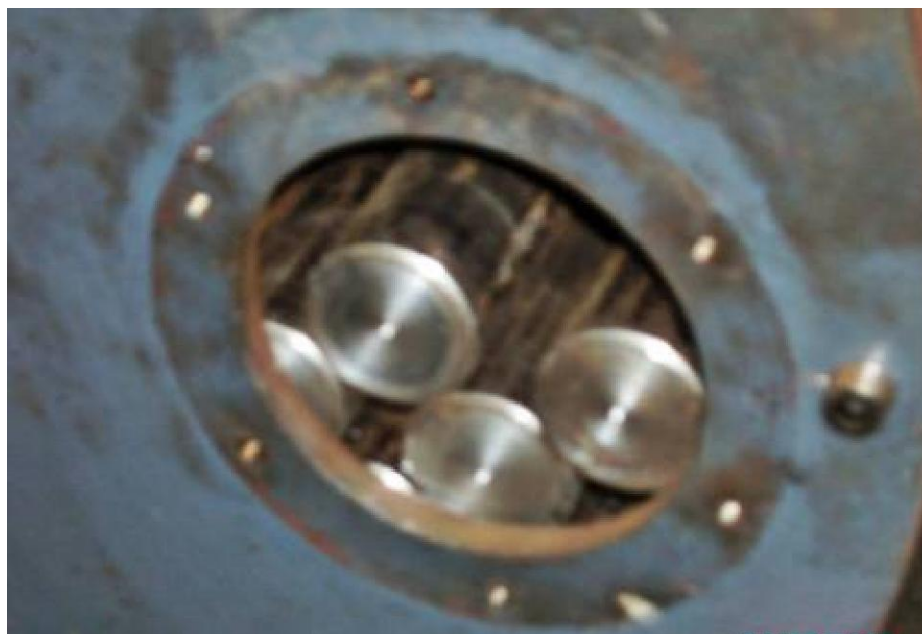
การลดขนาดซากแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อย จะเป็นไปในลักษณะที่ต่อเนื่อง โดยเครื่องย่อยตัวที่หนึ่งจะบดย่อยซากแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์ 5 ครั้ง หลังจากนั้นจะนำไปบดย่อยด้วยเครื่องตัวที่สองอีก 5 ครั้ง ก่อนนำไปบดเข้าสู่เครื่องบดแบบแท่งโลหะ

### 3.4.2.3 การลดขนาดซากแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์ ด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

หลังจากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อย ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกบดเข้าสู่เครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ความยาวของหม้อบด 90 เซนติเมตร โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที ที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที



ภาพที่ 3.7 เครื่องบดแบบแท่งโลหะ



ภาพที่ 3.8 แสดงวิธีการเปิดฝาย่อยของเครื่องบดแบบแท่งโลหะเพื่อการเก็บตัวอย่าง

### 3.4.3 การวิเคราะห์ผลและการรายงานผล

#### 3.4.3.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของซากแมงวงจระอิเล็กทรอนิกส์

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF) เพื่อศึกษาหาปริมาณทองแดงในเริ่มต้น และแสดงรูปลักษณะโดยทั่วไปของซากแมงวงจระอิเล็กทรอนิกส์

#### 3.4.3.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาด

ในการวิเคราะห์หากการกระจายตัวของขนาดหลังจากการบด ในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ด้วยตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analyzed) โดยจะทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดทุกขั้นตอนการย่อยด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย และการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

ขนาดของตะแกรงมาตรฐานที่ใช้สำหรับเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย คือ 4750, 2000, 1190, 841, 594, 420 ไมครอน และสำหรับเครื่องบดแบบแท่งโลหะ คือ 2000, 1190, 841, 420, 210, 63 ไมครอน

หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากตะแกรงมาตรฐานมาวาดกราฟโดยแกน Y แสดงเปอร์เซ็นต์มวลสะสมค้ำงตะแกรง และแกน X แสดงขนาดของอนุภาคเป็นหน่วยไมครอน

### 3.4.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณการหลุดแยกของทองแดง (Liberation degree)

(Shunli Z., Eric F., 1999 และ A.-Z.M. Abouzeid, 1990)

การวิเคราะห์การหลุดแยกของทองแดงในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการนับจำนวนเม็ด (Grain counting method) โดยการสุ่มจากตัวอย่างที่ได้หลังจากการลดขนาดในแต่ละขั้นตอน หลังจากนั้นทำการคัดแยกออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทองแดงที่หลุดแยกเป็นอิสระ (Free particle) มีปริมาณทองแดง มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

ส่วนที่ 2 ทองแดงที่ติดอยู่กับส่วนที่เป็นพลาสติก (Locked particle)

ส่วนที่ 3 ส่วนที่เป็นพลาสติก (Gangue particle) โดยมีปริมาณของทองแดงอยู่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยก โดยแทนค่าในสมการที่ 3.1

$$LD = \left( \sum_{i=1}^n \frac{N_{fi}}{N_{fi} + N_{gi} + N_{li}} / n \right) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ LD = ปริมาณการหลุดแยกของทองแดง (Liberation degree),  
เปอร์เซ็นต์

n = จำนวนของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

$N_{fi}$  = จำนวนอนุภาคทองแดงอิสระในแต่ละตัวอย่าง

$N_{li}$  = จำนวนอนุภาคทองแดงที่ติดอยู่กับพลาสติกในแต่ละตัวอย่าง

$N_{gi}$  = จำนวนอนุภาคพลาสติกที่ไม่มีทองแดงในแต่ละตัวอย่าง

### 3.4.3.4 การวิเคราะห์หาฟังก์ชันการแตกหัก (Breakage function)

ฟังก์ชันการแตกหัก เป็นค่าการกระจายขนาดสะสมที่เกิดจากการแตกหักครั้งเดียวของวัสดุก้อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยว ผลที่ได้จากการแตกหักของวัสดุก้อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยวเขียนแทน



ได้โดยการกระจายของขนาดชุดหนึ่ง ฟังก์ชันการแตกหักจึงประกอบด้วยปริมาณมวลของวัสดุในแต่ละช่วงขนาดที่เกิดจากการแตกหักครั้งเดียว ซึ่งเป็น พารามิเตอร์การแตกหัก (Breakage parameters)

การหาค่าฟังก์ชันการแตกหัก อาจทำได้โดยใช้สมการการกระจายขนาดจากการแตกหักของบรอดเบนท์และแคลคอต (Broadbent and Callcott)

$$B_{(x,y)} = \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{y}\right)^n\right]}{1 - \exp(-1)} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $n = 1$

$$B_{(x,y)} = \text{ปริมาณมวลสะสมที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดนั้นๆ}$$

จากสมการของบรอดเบนท์และแคลคอต เป็นสมการที่นำมาใช้กับการแตกหักของแร่ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างจากการแตกหักของแผ่น PCB ซึ่งมีมิติกว้างยาวมากกว่าความหนามาก เพราะฉะนั้นจึงหาค่าฟังก์ชันการแตกหักจากการทดลอง ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัว โดยทั่วไปการกระจายของขนาดและมวลของวัสดุป้อนและผลผลิตที่ได้จากการลดขนาด สามารถเขียนแทนได้โดยด้วยเมตริกซ์สามเหลี่ยมล่าง (lower triangular matrix) (A. Gupta และ D.S. Yan, 2006)

จากการทดลองสมการแตกหักที่นำมาใช้คำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีของ Austin และ Luckie หรือเรียกว่า BII method โดยคำนวณจากค่าการกระจายตัวของขนาดในแต่ละชั้นตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งฟังก์ชันการแตกหักถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์สามเหลี่ยมล่าง และกำหนดให้ค่าฟังก์ชันการกระจายการเลือกที่จะแตกหัก (Breakage distribution function) มีค่าคงที่ สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.3 ดังนี้

$$B_{i1} = \frac{\log\left[\frac{1 - P_i(0)}{1 - P_i(t)}\right]}{\log\left[\frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)}\right]} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $P_i(0) =$  สัดส่วนมวลสะสมของขนาดที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา 0

$P_i(t) =$  สัดส่วนมวลสะสมของขนาดที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา  $t$  ใดๆ

$B_{i,1} =$  สัดส่วนมวลสะสมของอนุภาคจากการแตกหักของอนุภาคขนาด

ที่ 1 ในช่วงขนาดที่  $i$  ใดๆที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา

จากการคำนวณในแต่ละค่าของเมตริกซ์การแตกหัก โดยมีสมมติฐานที่ว่า การแตกหักที่ขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันแตกตามปกติและไม่มีการจับรวมตัวเป็นก้อนเกิดขึ้น ซึ่งกำหนดให้  $B$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $N \times N$  และเป็นเมตริกซ์สามเหลี่ยมล่าง (lower triangular matrix) ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ B_2 & B_1 & 0 & \dots & 0 \\ B_3 & B_2 & B_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ B_N & B_{N-1} & B_{N-2} & \dots & B_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

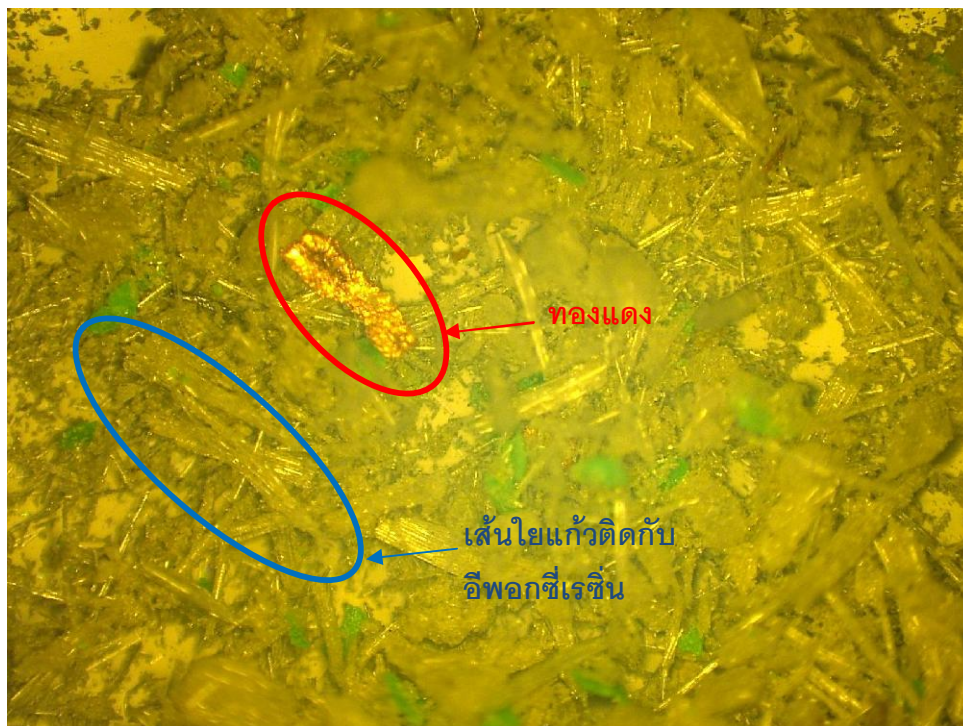
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบโดยประมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากลักษณะทางกายภาพของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีลักษณะมีมิติความกว้างยาวมากกว่ามิติความหนามาก โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอีพอกซีเรซินที่เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติง และมีเส้นใยแก้ว (Fiber glass) เป็นตัวเสริมความแข็งแรงของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ามีเส้นใยแก้วอยู่ในอีพอกซีเรซิน และภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นเส้นใยแก้วหลังจากทำการบดแล้ว ในส่วนของโลหะ ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยทองแดงเพราะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและระบายความร้อนได้ดี โดยทองแดงจะถูกนำมาตีดแบนเป็นแผ่นบางๆ กับแผ่นพลาสติก

จากการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปวิเคราะห์โดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ พบว่าปริมาณของทองแดงในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยเบื้องต้นมีอยู่ 21.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



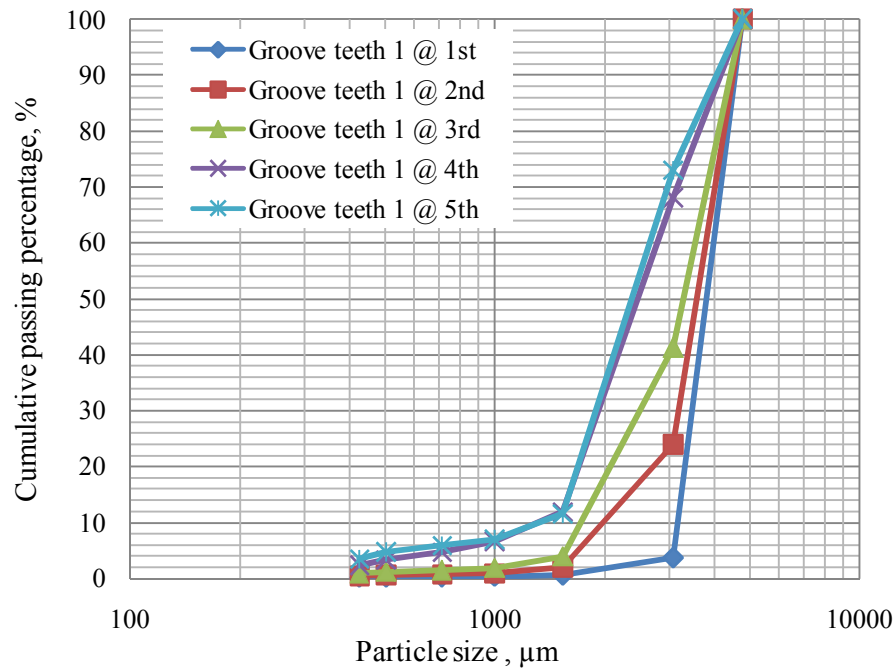
ภาพที่ 4.1 แสดงเส้นใยแก้วที่อยู่ในอีพอกซีเรซิน



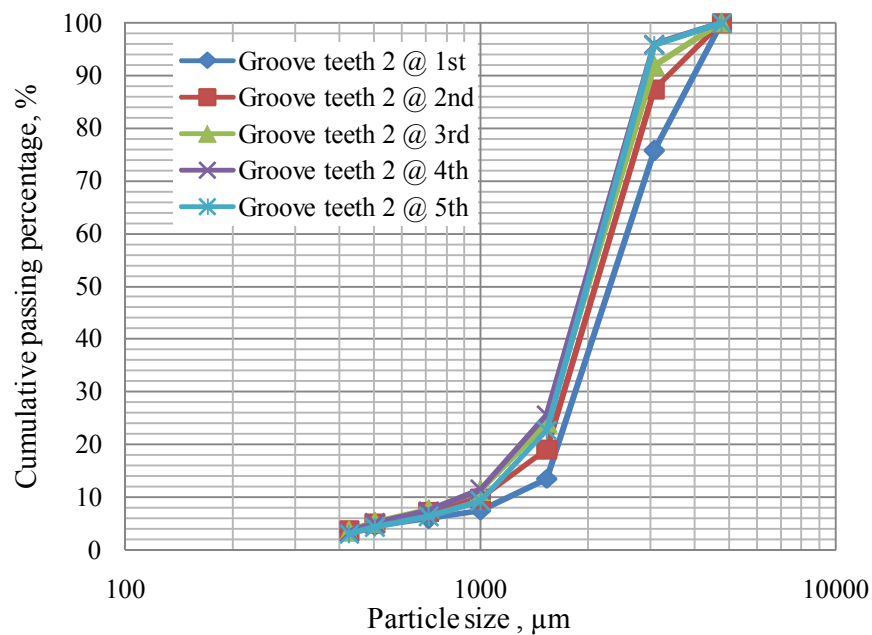
ภาพที่ 4.2 แสดงทองแดงที่แยกตัวเป็นอิสระ และเส้นใยแก้วในอีพอกซีเรซินหลังจากการลดขนาด

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หลังผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

จากการทดลอง ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะถูกลดขนาดลงด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยสองตัวที่มีขนาดของพื้นเลื่อยแตกต่างกันที่ 4 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ซึ่งเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยแต่ละตัวจะทำการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 5 ครั้ง โดยเริ่มจากการบดย่อยด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่หนึ่ง 5 ครั้ง แล้วจึงนำไปสู่เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่สองอีก 5 ครั้ง ผลที่ได้จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยตัวที่หนึ่งและตัวที่สองแสดงดังภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 ตามลำดับ

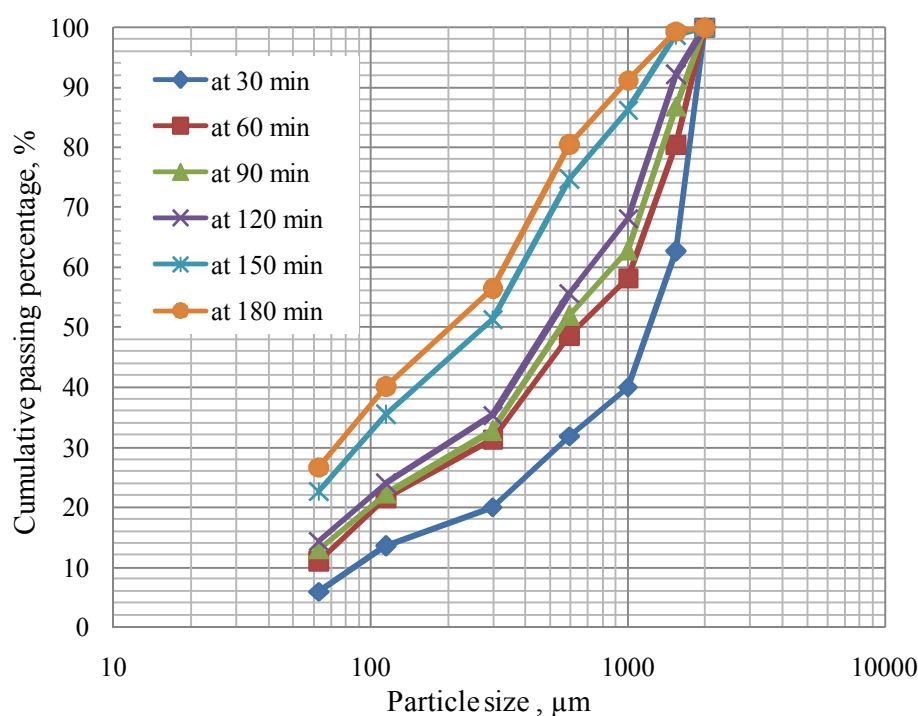


ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจระจิดเล็กทรอนิกส์ หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ที่ระยะห่างของฟันเลื่อย 4 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจระจิดเล็กทรอนิกส์ หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ที่ระยะห่างของฟันเลื่อย 3 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อย พบว่าหลังจากการบดครั้งที่ 4 ของเครื่องย่อยทั้งสองตัว จะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องมาจากว่าความจำกัดของลักษณะของพื้นเลื่อยที่ขบกันและขนาดของพื้นเลื่อยในเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยแต่ละตัว เมื่อถึงขีดจำกัดค่าหนึ่ง จะทำให้วัสดุหลุดผ่านช่องระหว่างพื้นเลื่อยออกไป ทำให้ไม่ได้รับแรงตัดและแรงกระแทกจึงส่งผลต่อความสามารถในการลดขนาดลง



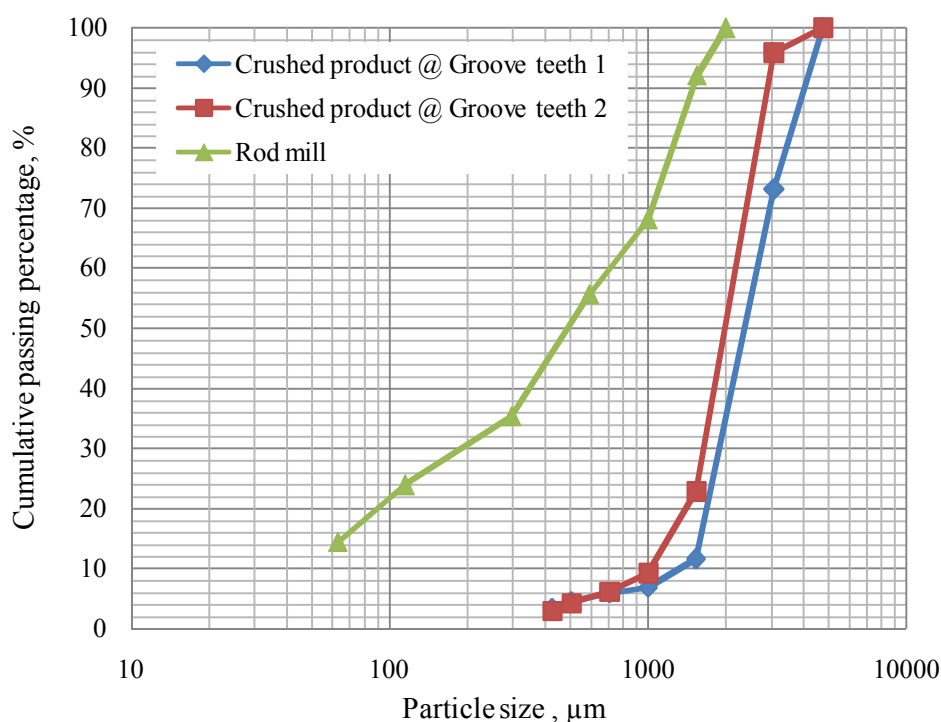
ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์ หลังการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

จากงานวิจัยของ C. Eswaraiah, T. Kavitha, S. Vidyasagar, S.S. Narayanan (2006) ได้ทำการลดขนาดซากแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์โดยใช้เครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยง ผลที่ได้คือการกระจายตัวของขนาดอนุภาคค่อนข้างไม่สม่ำเสมอซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟ ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และเครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยงเป็นเครื่องที่อาศัยแรงกระแทกในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก แต่แมงวงจรีเล็กทรอนิกส์มีความเหนียวอีกทั้งยังมีทองแดงที่อยู่ในลักษณะเสริมแรงกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการลดขนาดไม่ได้ แต่การลดขนาดซากแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อย จากภาพที่ 4.3

และ ภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ได้มีความสม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของขนาดที่แน่นอน เนื่องจากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ถูกออกแบบมาสำหรับการลดขนาดผงวงจรรูเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะ โดยอาศัยหลักการใช้แรงตัดเฉือน ไม่ใช่แรงกระแทก อีกทั้งยังมีระยะห่างระหว่างฟันเลื่อยและระยะระหว่างลูกกลิ้งที่ค่อนข้างแน่นอน ทำให้ผลที่ได้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพที่ดี

จากการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยทั้งสองแล้วมาป้อนเข้าสู่หีบอบค จากนั้นทำการชั่งตัวอย่างออกมาที่เวลาแตกต่างกัน 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

การกระจายตัวของขนาดหลังจากบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด โดยอนุภาคเกือบทั้งหมดมีขนาดเล็กกว่า 2000 ไมโครเมตร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคหลังการย่อยด้วยเครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยงเพียงอย่างเดียวที่ 4000 ไมโครเมตร ถือได้ว่าบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะมีประสิทธิภาพที่ดีมาก



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

จากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าหลังเวลาในการบด 150 นาที การกระจายตัวของขนาดค่อนข้างที่จะเริ่มคงที่ อาจจะเป็นเพราะในส่วนของโหลหะไม่สามารถที่จะถูกลดขนาดลงไปอีกแล้วและในส่วนของพลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่ามาก เมื่อถูกลดขนาดลงการกระจายตัวของมวลพลาสติก ทำให้การกระจายตัวในการลดขนาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และจากภาพที่ 4.6 สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโหลหะ สามารถลดขนาดได้ดียิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์การหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง โดยวิธีการนับเม็ด (Grain counting method)

หลังจากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย และเครื่องบดแบบแท่งโหลหะแล้ว นำมาวิเคราะห์การหลุดแยกของทองแดงออกจากเรซิน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการนับจำนวนเม็ด โดยการชั่งตัวอย่างที่ได้จากการลดขนาดในแต่ละขั้นตอน หลังจากนั้นทำการคัดแยกออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทองแดงที่หลุดแยกเป็นอิสระ (Free particle) มีปริมาณทองแดง มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

ส่วนที่ 2 ทองแดงที่ติดอยู่กับส่วนที่เป็นพลาสติก (Locked particle)

ส่วนที่ 3 ส่วนที่เป็นพลาสติก (Gangue particle) โดยมีปริมาณของทองแดงอยู่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยก ในสมการที่ 4.1

$$LD = \left( \sum_{i=1}^n \frac{N_{fi}}{N_{fi} + N_{gi} + N_{li}} / n \right) \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ  
เปอร์เซ็นต์

LD = ปริมาณการหลุดแยกของทองแดง (Liberation degree),

n = จำนวนของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

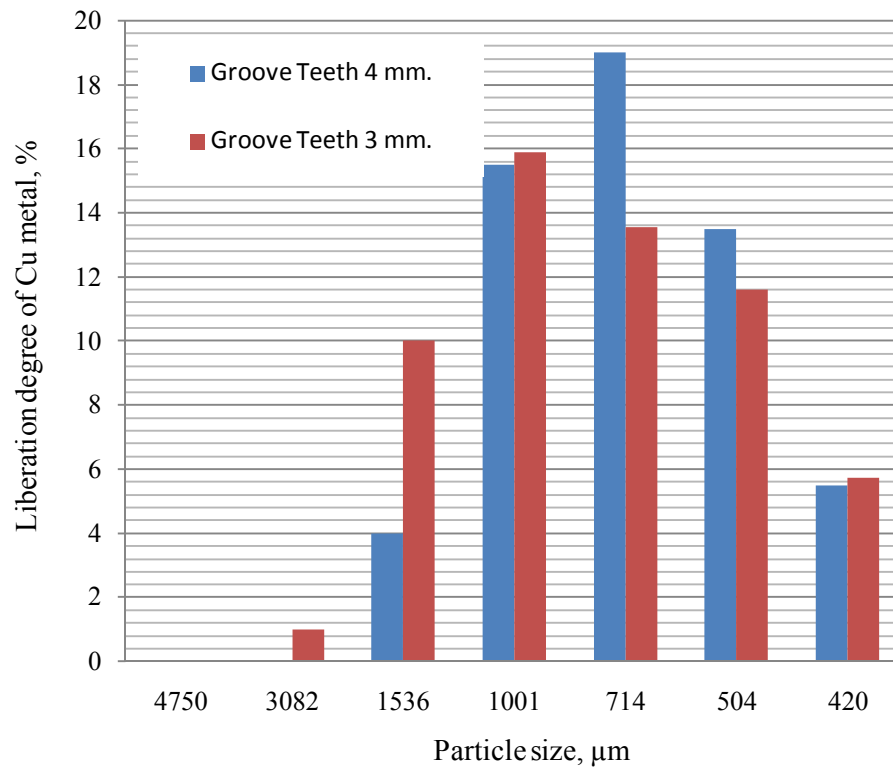
$N_{fi}$  = จำนวนอนุภาคทองแดงอิสระในแต่ละตัวอย่าง

$N_{li}$  = จำนวนอนุภาคทองแดงที่ติดอยู่กับพลาสติกในแต่ละตัวอย่าง

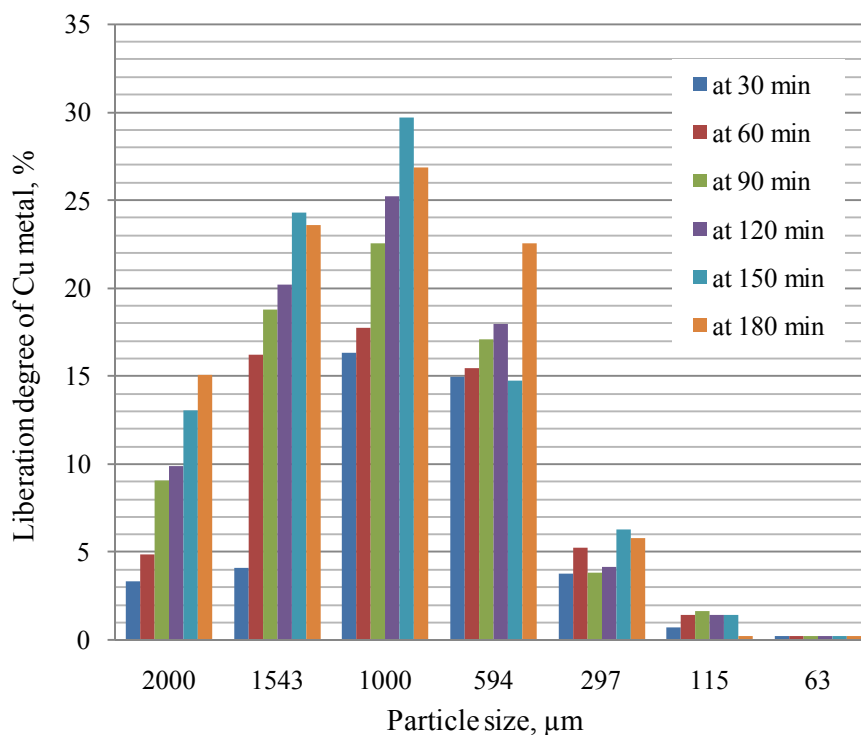
$N_{gi}$  = จำนวนอนุภาคพลาสติกที่ไม่มีทองแดงในแต่ละตัวอย่าง



ผลจากการคำนวณตามสมการ 4.1 และนำมาวิเคราะห์ โดยให้อยู่ในรูปของแผนภูมิแท่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบ ลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง ที่ขนาดฟันเลื่อย 4 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ



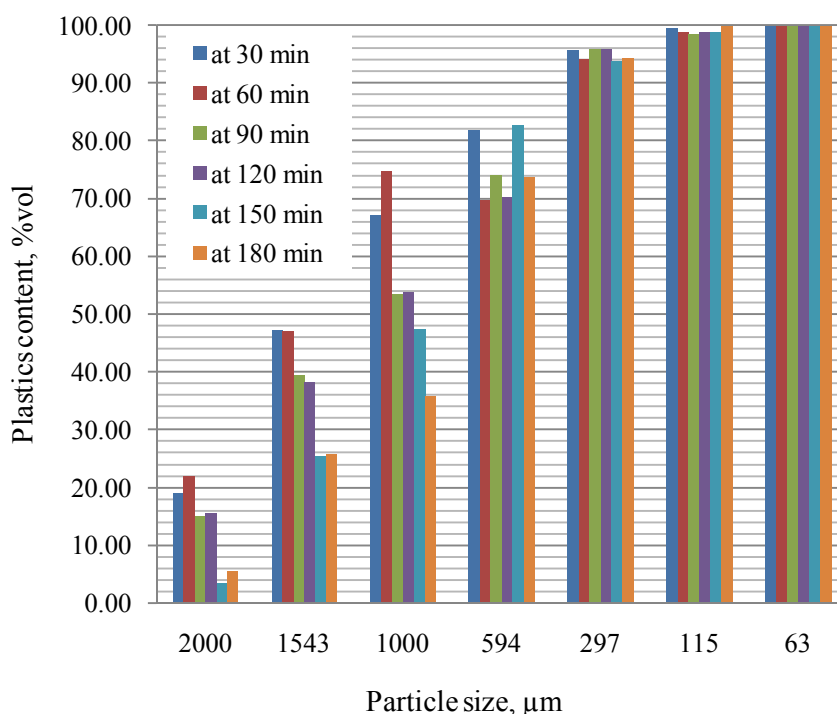
ภาพที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง จากการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดงที่ขนาดใหญ่กว่า 1500 ไมครอน ทองแดงไม่หลุดแยกออกพลาสติก (จากการสังเกตด้วยตาเปล่า) แต่การหลุดแยกของทองแดงกับพลาสติกที่สูงที่สุด จะอยู่ในช่วง 1001-504 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา กล่าวคือ การหลุดแยกของทองแดงกับพลาสติก จะเกิดในช่วงที่ขนาดของอนุภาคตั้งแต่ 1000 ไมครอนลงไป (R. Vetri M., S. Bharat, Abhijit P.D., Susy V. และ Prathap H., 2007)

จากภาพที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดงที่สูงที่สุดของเครื่องย่อยตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง อยู่ที่ขนาดประมาณ 714 ไมครอน และ 1001 ไมครอน ตามลำดับ ทั้งนี้การที่เครื่องย่อยตัวที่สองแสดงผลการหลุดแยกของทองแดงที่ลดน้อยลง แทนที่จะเพิ่มมากขึ้น อาจจะเป็นเพราะว่าการแตกหักและการหลุดแยกระหว่างพลาสติกกับทองแดงยังไม่เสถียร จึงทำให้เมื่อเข้าสู่เครื่องย่อยตัวที่สอง จึงเกิดการกระจายตัวของทองแดงและพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้น

การวิเคราะห์การหลุดแยกของทองแดงหลังจากบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ จากการสังเกตพบว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีการหลุดแยกของทองแดงที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากว่าเครื่องบดแบบแท่งโลหะ จะอาศัยแรงกระแทกจากการที่แท่งบดมากระทบกัน และ

เกิดการหมุนของแท่งบดทำให้เกิดเป็นแรงขัดสี ส่งผลให้พลาสติกที่ติดอยู่กับทองแดงหลุดแยกได้ดียิ่งขึ้น จากภาพที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการบดมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดงก็จะเพิ่มมากยิ่งขึ้นโดยที่ 1000 ไมครอน จะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกมากที่สุด

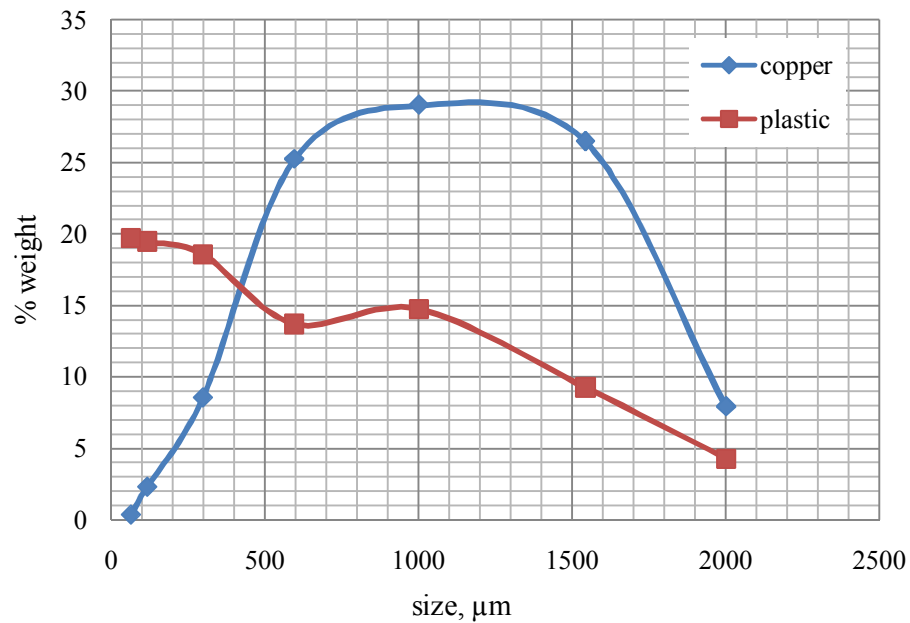


ภาพที่ 4.9 แสดงปริมาณของพลาสติกหลังจากการบดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

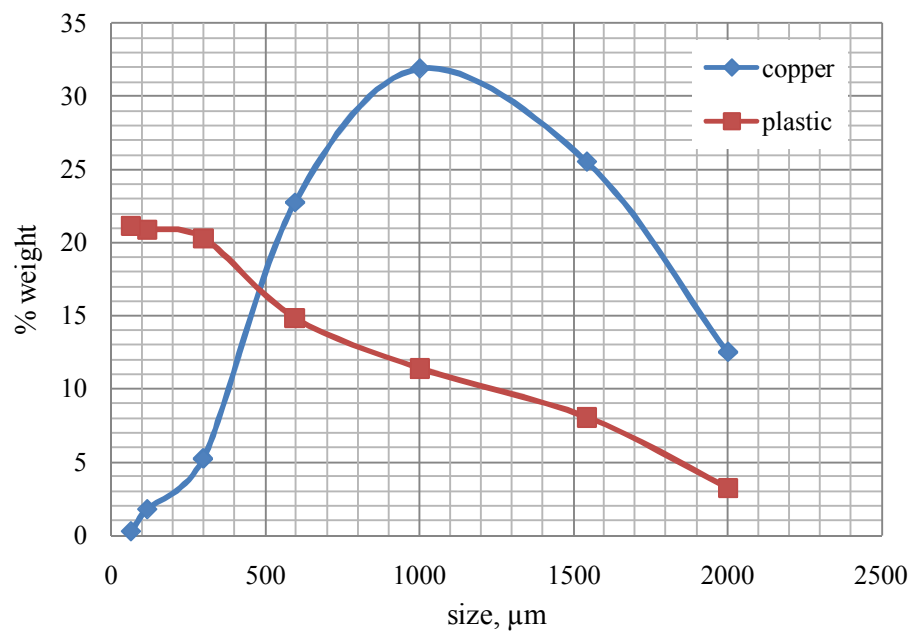
เมื่อนำแผนภูมิที่แสดงถึงปริมาณของพลาสติกหลังจากการบด เปรียบเทียบกับปริมาณของทองแดงในแต่ละช่วงขนาดของตะแกรงมาตรฐาน พบว่าความเกี่ยวข้องกันระหว่างภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากว่าส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ พวกอีพอกซีเรซิน เส้นใยแก้ว ซึ่งมีความเปราะกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดง จะเห็นได้ว่า ภาพที่ 4.9 เมื่อขนาดของอนุภาคลดลง ปริมาณของพลาสติกก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นที่ละน้อย แต่ปริมาณทองแดงกลับมีปริมาณลดลง และที่ 63 ไมครอน จะเห็นว่ามีปริมาณของทองแดงมีน้อยมาก จนเกือบจะเป็นศูนย์

จากภาพที่ 4.10-4.12 ที่ขนาดอนุภาค 1000 ไมครอน จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างเส้นกราฟของทองแดงและพลาสติกมีระยะห่างเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการบดมากยิ่งขึ้น แสดงว่าทองแดงสามารถหลุดแยกจากพลาสติกได้มากยิ่งขึ้น และเมื่อศึกษาจากกราฟจะเห็นได้ว่า

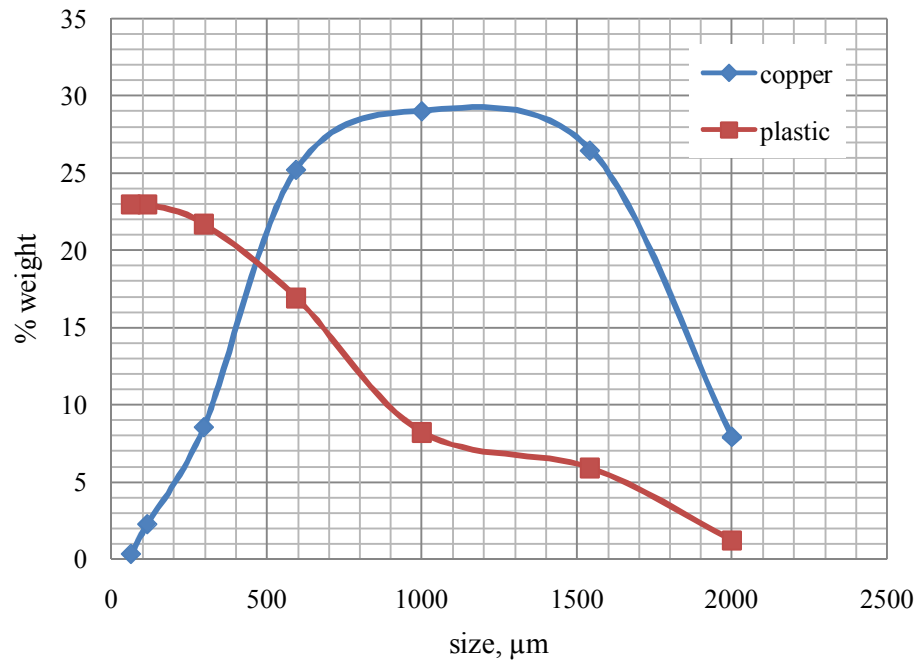
สามารถแยกทองแดงกับพลาสติกออกจากกันได้โดยใช้ตะแกรงที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 500 ไมครอน และที่ขนาดต่ำกว่า 500 ไมครอน สามารถนำไปแยกโดยใช้โตะสั้นได้ต่อไป



ภาพที่ 4.10 การกระจายตัวโดยน้ำหนักของทองแดงและพลาสติก ที่เวลาในการบด 60 นาที



ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวโดยน้ำหนักของทองแดงและพลาสติก ที่เวลาในการบด 120 นาที



ภาพที่ 4.12 การกระจายตัวโดยน้ำหนักของทองแดงและพลาสติก ที่เวลาในการบด 180 นาที

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์การหาฟังก์ชันการแตกหัก

ฟังก์ชันการแตกหักจะถูกนำมาอธิบายการลดขนาดของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยทั้งสองตัว โดยใช้ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค สามารถนำมาคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหักโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในแต่ละขั้นตอนการย่อย โดยกำหนดช่วงขนาดของอนุภาคตามอนุกรมตะแกรงมาตรฐาน ที่ 4750, 3360, 2380, 1680, 1190, 841 และ 594 ไมครอน

ในงานวิจัยนี้ วิธีการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก จะใช้วิธีของ Austin และ Luckie หรือวิธี BII ตามสมการที่ 4.2 โดยกำหนดให้ B เป็นเมตริกซ์สามเหลี่ยมล่าง ขนาด  $N \times N$  ดังสมการที่ 4.3

$$B_{i1} = \frac{\log \left[ \frac{1-P_i(0)}{1-P_i(t)} \right]}{\log \left[ \frac{1-P_2(0)}{1-P_2(t)} \right]} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $P_i(0)$  = สัดส่วนมวลสะสมของขนาดที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา 0

$P_i(t)$  = สัดส่วนมวลสะสมของขนาดที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา  $t$  ใดๆ  
 $B_{i,1}$  = สัดส่วนมวลสะสมของอนุภาคจากการแตกหักของอนุภาคขนาด  
 ที่ 1 ในช่วงขนาดที่  $i$  ใดๆที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ B_2 & B_1 & 0 & \dots & 0 \\ B_3 & B_2 & B_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ B_N & B_{N-1} & B_{N-2} & \dots & B_1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

**ตารางที่ 4.1** แสดงผลของการกระจายตัวของขนาดของเครื่องย่อยแบบลูกกิ้งกิ้งฟันเลื่อยในการ  
 ย่อยครั้งที่ 1 เพื่อนำไปคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก

Interval	Size, $\mu\text{m}$	Retained size, $\mu\text{m}$	Feed, %retain	Cumulative, %passing
1	4750	3359	81.000	100.000
2	3359	2375	15.500	19.000
3	2375	1679	2.500	3.500
4	1679	1188	0.500	1.000
5	1188	840	0.200	0.500
6	840	594	0.100	0.300
7	594	0	0.200	0.200

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหักได้ โดยกำหนดให้  $P_2(0)$  เป็นสัดส่วนของวัสดุใน interval 2 ก่อนการบดย่อยและควรมีค่าน้อยๆ ทั้งนี้จะกำหนดให้ค่า  $P_2(0)$  มีค่าเท่ากับ 0.01 และ  $P_1(0)$  ควรมีค่าเท่ากับ 0 และ  $B_{1,1}$  มีค่าเท่ากับ 1 เพราะว่าเมื่อวัสดุเกิดการแตกหักให้สันนิษฐานว่าเกิดการแตกหักจนหมด เช่นเดียวกันกับ  $B_{2,1}$  ก็มีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากวัสดุที่แตกหักจาก interval 1 จะต้องมีย่านน้อยกว่าขนาดสูงสุดใน interval 2 จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการที่ 4.2

ฟังก์ชันการแตกหัก ( $b_{ij}$ ) สามารถคำนวณได้โดยสมการ 4.4

$$b_{i,1} = B_{i,1} - B_{i+1,1} \quad (4.4)$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ จากตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณ  $b_{3,1}$  ได้จากสมการ 4.4

$$b_{3,1} = B_{3,1} - B_{4,1}$$

ดังนั้น 
$$b_{3,1} = 0.178 - 0.050 = 0.127$$

**ตารางที่ 4.2** การคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหักจากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง

Interval	Size , $\mu\text{m}$	Cumulative fraction, $\mu\text{m}$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	1.000	1.000	0.000
2	3359	0.190	1.000	0.822
3	2375	0.035	0.178	0.127
4	1679	0.010	0.050	0.025
5	1188	0.005	0.025	0.010
6	840	0.003	0.015	0.005
7	594	0.002	0.010	0.010

จากตัวอย่างการคำนวณในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาเขียนแทนในสมการที่ 4.3 ได้ดังนี้

$$B_{1st} (GT1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.822 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.127 & 0.822 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.025 & 0.127 & 0.822 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.010 & 0.025 & 0.127 & 0.822 & 0 & 0 & 0 \\ 0.005 & 0.010 & 0.025 & 0.127 & 0.822 & 0 & 0 \\ 0.010 & 0.005 & 0.010 & 0.025 & 0.127 & 0.822 & 1 \end{bmatrix}$$

จากการคำนวณโดยวิธี BII จะได้สมการเมตริกซ์การแตกหักของแต่ละขั้นตอนในการบัดของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยทั้งสองตัว กำหนดให้ GT1 หมายถึง เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ระยะห่างฟันเลื่อย 4 มิลลิเมตร และ GT2 หมายถึง เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ระยะห่างฟันเลื่อย 3 มิลลิเมตร (การคำนวณดูได้จาก ภาคผนวก ข) ดังนี้

$$B_{2nd} (GT1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.654 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.252 & 0.654 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.059 & 0.252 & 0.654 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.012 & 0.059 & 0.252 & 0.654 & 0 & 0 & 0 \\ 0.012 & 0.012 & 0.059 & 0.252 & 0.654 & 0 & 0 \\ 0.011 & 0.012 & 0.012 & 0.059 & 0.252 & 0.654 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{3rd} (GT1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.610 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.279 & 0.610 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.075 & 0.279 & 0.610 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.015 & 0.075 & 0.279 & 0.610 & 0 & 0 & 0 \\ 0.007 & 0.015 & 0.075 & 0.279 & 0.610 & 0 & 0 \\ 0.014 & 0.007 & 0.015 & 0.075 & 0.279 & 0.610 & 1 \end{bmatrix}$$



$$B_{4th} (GT1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.587 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.272 & 0.587 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.074 & 0.272 & 0.587 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.024 & 0.074 & 0.272 & 0.587 & 0 & 0 & 0 \\ 0.012 & 0.024 & 0.074 & 0.272 & 0.587 & 0 & 0 \\ 0.031 & 0.012 & 0.024 & 0.074 & 0.272 & 0.587 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{5th} (GT1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.596 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.282 & 0.596 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.062 & 0.282 & 0.596 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.015 & 0.062 & 0.282 & 0.596 & 0 & 0 & 0 \\ 0.011 & 0.015 & 0.062 & 0.282 & 0.596 & 0 & 0 \\ 0.035 & 0.011 & 0.015 & 0.062 & 0.282 & 0.596 & 1 \end{bmatrix}$$

สำหรับเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง

$$B_{1st} (GT2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.597 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.271 & 0.597 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.069 & 0.271 & 0.597 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.020 & 0.069 & 0.271 & 0.597 & 0 & 0 & 0 \\ 0.010 & 0.020 & 0.069 & 0.271 & 0.597 & 0 & 0 \\ 0.032 & 0.010 & 0.020 & 0.069 & 0.271 & 0.597 & 1 \end{bmatrix}$$

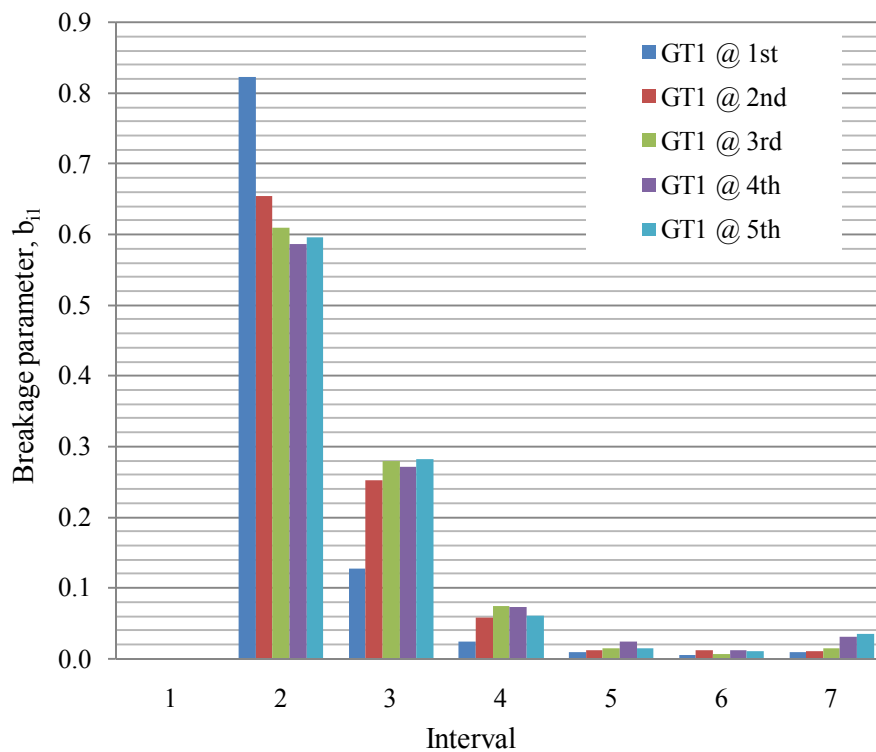
$$B_{2\text{nd}}(\text{GT2}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.634 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.238 & 0.634 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.066 & 0.238 & 0.634 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.066 & 0.238 & 0.634 & 0 & 0 & 0 \\ 0.014 & 0.022 & 0.066 & 0.238 & 0.634 & 0 & 0 \\ 0.025 & 0.014 & 0.022 & 0.066 & 0.238 & 0.634 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{3\text{rd}}(\text{GT2}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.654 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.215 & 0.654 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.069 & 0.215 & 0.654 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.025 & 0.069 & 0.215 & 0.654 & 0 & 0 & 0 \\ 0.012 & 0.025 & 0.069 & 0.215 & 0.654 & 0 & 0 \\ 0.025 & 0.012 & 0.025 & 0.069 & 0.215 & 0.654 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{4\text{th}}(\text{GT2}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.694 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.190 & 0.694 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.063 & 0.190 & 0.694 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.063 & 0.190 & 0.694 & 0 & 0 & 0 \\ 0.011 & 0.022 & 0.063 & 0.190 & 0.694 & 0 & 0 \\ 0.019 & 0.011 & 0.022 & 0.063 & 0.190 & 0.694 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{5th} (GT2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.191 & 0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.057 & 0.191 & 0.707 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.057 & 0.191 & 0.707 & 0 & 0 & 0 \\ 0.008 & 0.022 & 0.057 & 0.191 & 0.707 & 0 & 0 \\ 0.015 & 0.008 & 0.022 & 0.057 & 0.191 & 0.707 & 1 \end{bmatrix}$$

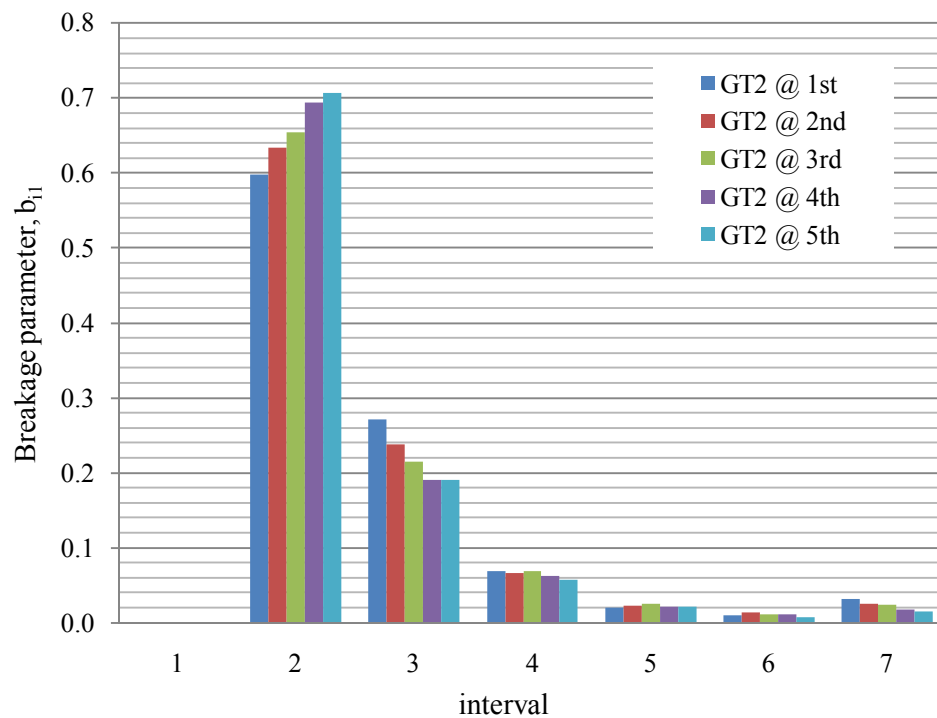
จากสมการเมตริกซ์การแตกหักของแต่ละขั้นตอนการบดย่อย สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังภาพที่ 4.13 และ ภาพที่ 4.14 จากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของขนาดที่ได้จากสมการการแตกหักใน class 1 จากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ระยะห่างฟันที่ 4 มิลลิเมตร

การกระจายตัวของขนาดจากการคำนวณโดยใช้วิธี BII จากภาพที่ 4.13 เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการย่อย ขนาดของอนุภาคก็จะลดลง จนกระทั่งถึงการย่อยครั้งที่ 5 จะเริ่มคงที่ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองในการหากระจายขนาดของอนุภาค

จากภาพที่ 4.14 ที่ interval 2 สัดส่วนมวลเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งที่ทำการย่อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าข้อจำกัดของระยะห่างของฟันเลื่อยที่มีอิทธิพลต่อการลดขนาด ทำให้เมื่อเข้าสู่เครื่องย่อยที่สองแล้วไม่สามารถลดขนาดของซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ลงไปสู่ interval 3 ได้ อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันการแตกหักโดยวิธี BII มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง และสามารถนำไปอธิบายพฤติกรรมของการแตกหักของซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์และข้อจำกัดของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยได้



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของขนาดที่ได้จากสมการการแตกหักใน class 1 จากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ระยะห่างฟันที่ 3 มิลลิเมตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดง ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ โดยเก็บรวบรวมซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนเกินหรือไม่ผ่านกระบวนการผลิตมาใช้ในงานวิจัย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 การกระจายตัวของขนาดซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ หลังผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยและเครื่องบดแบบแท่งโลหะ

จากการลดขนาดซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์จะถูกลดขนาดลงด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย พบว่าหลังจากการบดครั้งที่ 4 ของเครื่องย่อยทั้งสองตัว จะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากความจำกัดของลักษณะของฟันเลื่อยที่ขบกันและขนาดของฟันเลื่อยในเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยแต่ละตัว

การลดขนาดซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ได้มีความสม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของขนาดที่แน่นอนเนื่องจากเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย ถูกออกแบบมาสำหรับการลดขนาดแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะ โดยอาศัยหลักการใช้แรงตัดเฉือน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยงที่อาศัยแรงกระแทก ทำให้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ

##### 5.1.2 พฤติกรรมการหลุดแยกของทองแดง

เปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดงที่สูงที่สุดของเครื่องย่อยตัวที่หนึ่งและตัวที่สอง อยู่ที่ขนาดประมาณ 714 ไมครอน และ 1001 ไมครอน ตามลำดับ และซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์มีการหลุดแยกของทองแดงที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย และเครื่องบดแบบแท่งโลหะ จะทำให้ประสิทธิภาพในการรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น

### 5.1.3 ฟังก์ชันการแตกหัก

ฟังก์ชันการแตกหัก เป็นค่าการกระจายขนาดสะสมที่เกิดจากการแตกหักครั้งเดียวของวัสดุ ก่อนเดี่ยวหรืออนุภาคเดี่ยว ผลจากการใช้วิธีของ Austin และ Luckie หรือวิธี BII เพื่อคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก โดยผลที่ได้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองในการหาการกระจายขนาดของอนุภาค และสามารถนำไปอธิบายพฤติกรรมของการแตกหักของซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์และข้อจำกัดของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยได้

ดังนั้นการลดขนาดซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปสู่กระบวนการรีไซเคิลนั้น สามารถนำเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยมาใช้ในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากการออกแบบของเครื่องย่อยที่มีหลักการอาศัยแรงตัดแบบเฉือน ซึ่งเหมาะสมกับการลดขนาดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีมิติความกว้างยาวมากกว่ามิติความหนา และการนำเครื่องบดแบบแท่งโลหะมาร่วมใช้ในกระบวนการรีไซเคิล จะเห็นว่าการหลุดแยกของทองแดงนั้นมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ได้ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ปราศจากการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกระบวนการต่างๆ ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีความคล้ายคลึงกันหรือมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยการหลุดแยกของทองแดง จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อย และเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ยังสามารถทำการศึกษาวิจัยต่อไปได้อีก โดยการศึกษา ครั้งต่อไป อาจจะใช้กระบวนการทางไฟฟ้าสถิตย์ อาทิเช่น เครื่อง eddy current เพื่อทำการแยกเอาส่วนที่เป็นโลหะและไม่ใช่โลหะออกจากกัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกและเก็บกลับคืนทองแดงให้มากขึ้น

ทั้งนี้ยังสามารถพัฒนากระบวนการโดยนำเอาพลาสติกที่แยกออกมาแล้วนำมาใช้ประโยชน์ เช่น การศึกษาของ ศักดิ์ชัย สมเชื้อและระพีพันธ์ แดงตันกี (2553) ได้ศึกษาการนำอีพอกซีเรซินที่ได้จากการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำเรซินที่ได้จากกระบวนการแยกมีสีเหลือง-ส้ม ลักษณะเป็นของเหลวหนืด เมื่อผสมรีไซเคิลเรซินกับอีพอกซีเรซินอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก เรซินสามารถขึ้นรูปได้ แต่มีสีเข้มกว่าอีพอกซีเรซิน หรืออาจนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น คอนกรีตมวลเบา หินประดับมวลเบา เป็นต้น

สำหรับการนำผลการศึกษาวิจัยไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม และการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์นั้น ควรมีการพิจารณาตัวแปรต่างๆอย่างละเอียด เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเชิงระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงควรปรับตัวแปรต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์. 2553. การเก็บกลับคืนทรัพยากรและการนำกลับมาใช้ใหม่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรวิรัตน์ เพชรภักดีและกฤษฎา จันทรเสนา. 2551. เทคโนโลยีการรีไซเคิล PCB. สถาบันสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย.
- ภิญโญ มีชำนะ. 2550. เอกสารประกอบการเรียน รายวิชา Mineral and Processing Engineering. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศักดิ์ชัย สมเชื้อและระพีพันธ์ แดงตันกี. 2553. การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Recycling of epoxy resin in printed circuit board (PCB)). บัณฑิตวิทยาลัย. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

### ภาษาอังกฤษ

- A., Gupta, D.S., Yan. Mineral Processing Design and Operations : An Introduction. First edition. Elsevier. 2006.
- Aleksandar, F., Gavriilo, T. 2005. Predicting the size and compositional distributions of wheat flour stocks following first break roller milling using the breakage matrix approach. Journal of Food Engineering 75: 527-534.
- C., Eswaraiah, T., Kavitha, S., Vidyasagar, S.S., Narayanan. 2006. Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier. Chemical Engineering and Processing 47: 565-576.
- Grant, M.C. and Colin, W. 2000. On predicting roller milling performance Part I: the breakage equation. Powder Technology 115: 234-242.
- H.W., Van Der Glas, A., Van Der Bilt, L.W., Olthoff and F., Bosman.1987. Measurement of Selection Chances and Breakage Function During Chewing in Man. Journal of Dental Research: 1547-1550.



- I.O., Ogunniyi, M.K.G., Vermaak, D.R. Groot. 2009. Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations. Waste Management 29: 2140–2146.
- R., Vetri, M., S., Bharat, Abhijit, P.D., Susy, V., Prathap, H. 2007. Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model. Powder Technology 183: 169-176.
- Shunli, Z., Eric, F. 1999. Intelligent Liberation and classification of electronic scrap. Powder Technology 105: 295-301.
- Tan, Z., He, Y., Xie, W., Duan, C., Zhou, E. and Yu Z. 2010. Size distribution of wet crushed waste printed circuit boards. Mining Science and Technology (China) 21: 359-363.
- Yihui, Z., Keqiang, Q. 2009. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. Journal of Hazardous Materials 175: 823–828.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผู้ผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

## ข้อมูลผู้ผลิตแผงวงจรไฟฟ้าในประเทศไทย

ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้าสามารถแบ่งตามฐานะการจัดตั้งสถานประกอบการได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ผู้ผลิตที่มีฐานะเป็นบริษัทสาขาที่มีบริษัทแม่ในต่างประเทศ โดยผู้ผลิตประเภทนี้จะเป็นการโยกย้ายฐานการผลิตจากต่างประเทศมายังประเทศไทย และทำหน้าที่เป็นแหล่งวัตถุดิบสารกึ่งตัวนำประเภทแผงวงจรไฟฟ้าให้แก่อุตสาหกรรมต่อเนื่องประเภทต่างๆ ภายในสายการผลิต หรือบริษัทในเครือเดียวกัน โดยการนำเข้าชิ้นส่วนประกอบจากบริษัทแม่มาประกอบเป็นแผงวงจรไฟฟ้าสำเร็จรูปตามสเปกการใช้งานแล้วจึงส่งออกแผงวงจรไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปยังบริษัทแม่หรือบริษัทในเครือเดียวกันในต่างประเทศ ได้แก่ บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) บริษัท โรห์ม อิทธิเกรเด็ด เซมิคอนดักเตอร์(ประเทศไทย) บริษัท โซนี่ เซมิคอนดักเตอร์(ประเทศไทย) บริษัท ชันโย เซมิคอนดักเตอร์(ประเทศไทย) บริษัท โอกิ(ประเทศไทย) บริษัท ไตชิบา เซมิคอนดักเตอร์(ประเทศไทย) บริษัท ไมโครชิพ เทคโนโลยี(ประเทศไทย) เป็นต้น โดยผู้ผลิตในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นการลงทุนของประเทศญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา

2. ผู้ผลิตที่ไม่มีบริษัทแม่ในต่างประเทศ โดยหน่วยผลิตประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นการร่วมลงทุนระหว่างประเทศในลักษณะของการบุกเบิกจัดตั้งกิจการใหม่ หรือเป็นการเทกอเวอร์ (takeover) กิจการเดิมที่เคยเปิดดำเนินการอยู่ก่อนแล้ว โดยทำหน้าที่เป็นผู้รับจ้างประกอบชิ้นส่วนแผงวงจรไฟฟ้าเป็นแผงวงจรไฟฟ้าสำเร็จรูปตามสเปกของผู้ว่าจ้างจากต่างประเทศโดยอาศัยการทำสัญญาจ้าง (subcontracting) และส่งมอบสินค้าเป็นคราวๆไป โดยผู้ว่าจ้างจะเป็นผู้จัดหาชิ้นส่วนประกอบที่สำคัญให้แก่ผู้รับจ้างประกอบ ดังนั้นผู้ผลิตประเภทนี้จึงเป็นผู้รับช่วงการผลิตต่อจากผู้ผลิตชิ้นส่วนหรือผู้รับจ้างประกอบชิ้นส่วนรายอื่นๆ ก่อนหน้านี้อีกต่อหนึ่ง(Subcontractor) บริษัทที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ บริษัท อัลฟาเทค อิเล็กทรอนิกส์ บริษัท ฮานา เซมิคอนดักเตอร์ (กรุงเทพฯ) บริษัท เอ็นเอส อิเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพฯ(1993) และบริษัท เซอร์กิต อิเล็กทรอนิกส์ อินดัสทรีส์

เป็นที่น่าสังเกตว่าสัดส่วนความเป็นเจ้าของของคนไทยในอุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้าและส่วนประกอบนี้มีค่อนข้างน้อย กล่าวคือ บริษัทในอุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้าและส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นบริษัทต่างชาติ(โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น) ที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยเนื่องจากประเทศไทยมีค่าจ้างแรงงานที่ต่ำ และมีสิทธิพิเศษต่างๆจาก BOI โดยที่บริษัทต่างชาติเหล่านี้มีทั้งต่างชาติเป็นเจ้าของบริษัททั้งหมดประมาณ 46.1% ของ

บริษัททั้งหมดในอุตสาหกรรม ร่วมทุนกับชาติอื่น 23% และร่วมทุนกับคนไทย 26.9% โดยบริษัทที่ไทยเป็นเจ้าของทั้งหมดนั้นมีเพียงบริษัทเดียว คือ บ.เซ็นพลาส จำกัด คิดเป็นร้อยละ 3.85% ของบริษัททั้งหมด (ตารางที่ ก1)

ตารางที่ ก1 รายละเอียดผู้ผลิตในอุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้าและส่วนประกอบของไทย

บริษัท	ปีที่ได้รับการส่งเสริม	มูลค่า (ล้านบาท)	ผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผู้ถือหุ้น
1. ซันโย เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด	1992	1,132,075	IC 150,401,000 pieces	ญี่ปุ่น, ยองกง 100%
	1995	839,484	IC 121,535,000 pieces	ญี่ปุ่น, ยองกง 100%
	2000	2,192,000	IC 328,064,000 pieces	ญี่ปุ่น, ยองกง 100%
2. ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) จำกัด	1984	864,500	IC 575 M. Peices	เนเธอร์แลนด์, สหรัฐอเมริกา 100%
	1990	621,904	IC 530 Mpieces	เนเธอร์แลนด์, สหรัฐอเมริกา 100%
	1995	3,273,000	IC 1,400 M Pieces	เนเธอร์แลนด์, สหรัฐอเมริกา 100%
	1999	13,310,864	IC 3,600 MP	เนเธอร์แลนด์, สหรัฐอเมริกา 100%
3. มินิแบไทย จำกัด	1992	76,958	IC 12,000 Units	ญี่ปุ่น 100%
	1993	545,800	Conductive IC Tube 12 MP	ญี่ปุ่น 100%
4. ลำพูน ซิงเดนเกิน จำกัด	1991	170,000	Semiconductor 240 MP	ญี่ปุ่น 100%
	2000	431,938	Semiconductor 56,347,800 Pieces	ญี่ปุ่น 100%
5. สตาร์ส ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด	1997	225,000	IC 95 MPs, PCBA 36 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 22% ไทย 78%
6. อัลฟา เมโมรี่ จำกัด	1997	2,031,000	IC 150 MPs	ไต้หวัน, สหรัฐ 49% ไทย 51%
7. อัลฟาเทค อีเล็กทรอนิกส์ จำกัด (มหาชน)	1989	600,000	IC 48 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 20.60% ไทย 79.40%
	1995	700,000	IC 484.4 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 20.60% ไทย 79.40%
8. อัลฟาเทค เซมิคอนดักเตอร์แพคเกจจิ้ง จำกัด	1999	1,805,000	IC 300 MPs	เคย์แมน ไอส์แลนด์ 100%
	1999	203,290	IC 15.6 MPs	เคย์แมน ไอส์แลนด์ 100%
	2000	1,062,251	IC 101 MPs	เคย์แมน ไอส์แลนด์ 100%
	2001	1,710,000	IC 600 MPs	เคย์แมน ไอส์แลนด์ 100%
9. ซีทีเอ (ประเทศไทย) จำกัด	1989	210,000	IC 4 MPs, Ball Bearing 1 MPs, Module Assembly 4.5 MPs	สวิตเซอร์แลนด์ 100%
	2002	63,200	IC 60 MPs, Probed Wafer 250 MPs	สวิตเซอร์แลนด์ 100%

บริษัท	ปีที่ได้รับการส่งเสริม	มูลค่า (พันบาท)	ผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผู้ถือหุ้น
10. อเกีย ซีสเต็มส์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ไทย) จำกัด	1980	149,421	IC 60 MPs, PCB 15 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
	1984	445,000	IC 70 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
	1985	900,000	IC 106 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
	1998	2,200,000	IC 148 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
	2001	2,893,000	IC 150 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
11. ฮานา เซมิคอนดักเตอร์ (กรุงเทพ) จำกัด	1992	140,000	IC 60 MPs, LED 12 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
	1994	140,000	IC 80 MPs, LED 12 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%
12. ฮานา เซมิคอนดักเตอร์ (อยุธยา) จำกัด	2000	1,375,100	IC Dicing 200 MPs, IC 1,425 MPs	ไทย 13%, อื่นๆ 87%
	2000	516,454	IC 48.1 MPs	ไทย 13%, อื่นๆ 87%
	2001	351,000	Hybrid IC 15 MPs, IC Opto 62 MPs	ไทย 13%, อื่นๆ 87%
	2002	143,080	IC opto 70 MPs	ไทย 13%, อื่นๆ 87%
13. เซอร์คิท อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด (มหาชน)	1985	368,096	IC 150 MPs	ไทย 92.30% อื่นๆ 7.7%
	1993	557,058	IC 250 MPs	ไทย 92.30% อื่นๆ 7.7%
	1996	1,281,000	IC 400 MPs	ไทย 92.30% อื่นๆ 7.7%
	1996	1,487,000	IC & Chip on Board 250 MPs	ไทย 92.30% อื่นๆ 7.7%
	1999	500,000	IC & IC Testing 200 MPs	ไทย 92.30% อื่นๆ 7.7%
14. เซ็นพลาส จำกัด	1993	557,000	IC 250 MPs	ไทย 100%
15. เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ออฟมินิแบ จำกัด	1987	597,000	Hybrid IC 8 MPs	ญี่ปุ่น 100%
	1997	76,958	Hybrid IC 228,000 Pieces	ญี่ปุ่น 100%
16. เอเอ็มดี (ไทยแลนด์) จำกัด			Hybrid IC & PCBA 8 MPs	ญี่ปุ่น 100%
	1997	132,039	IC 375 MPs, Wafer Back Grinding 197,600 sheets	สิงคโปร์, สหรัฐอเมริกา 100%
	1984	1,322,900		สิงคโปร์, สหรัฐอเมริกา 100%
	1998	2,168,010	IC 145 MPs	100%
17. เอ็น เอส อีเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพฯ (1993) จำกัด	1985	609,737	IC 629 MPs	สหรัฐอเมริกา 71% ไทย 29%
	1988		IC 554 MPs	สหรัฐอเมริกา 71% ไทย 29%
	2000	241,000	IC 900 MPs, Electronics Wafer Testing 500,000 Pieces, Wafer Grinding 500,000 Pieces	สหรัฐอเมริกา 71% ไทย 29%
		845,000	IC 1,657,580,000 Pieces, Electronics Wafer Testing	
	2001	4,442,160	700,000 Pieces, Wafer Grinding 700,000 Pieces	สหรัฐอเมริกา 71% ไทย 29%
18. โรห์ม อินทิเกรเต็ด เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) จำกัด	1997	800,000	IC 203,540,000 Pieces	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	1998	200,000	IC 605 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	1998	100,000	IC 232 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	1998	100,000	IC 129 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	2000	300,000	IC 91 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	2001	500,000	IC 317 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%

บริษัท	ปีที่ได้รับการส่งเสริม	มูลค่า (พันบาท)	ผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผู้ถือหุ้น
19. ไมโครชิพ เทคโนโลยี (ไทยแลนด์) จำกัด	1995	1,357,325	IC 300 MPs IC 900 MPs, IC Testing 900	บาร์บาตอส 100%
	1999	2,257,232	MPs, Sawed Dice 450 MPs	บาร์บาตอส 100%
	2001	10,603,390	IC 900 MPs, IC Testing 1200 MPs, Sawed Dice 450 MPs	บาร์บาตอส 100%
	2001	11,823,100	IC 900 MPs, IC Testing 1200 MPs, Sawed Dice 450 MPs	บาร์บาตอส 100%
20. ไทย เอ็น เจ อาร์ จำกัด	1989	524,000	Bipolar & C-MOS IC 158 MPs	ญี่ปุ่น 100%
	1993	153,000	IC 180 MPs	ญี่ปุ่น 100%
	2000	66,340	IC 70 MPs	ญี่ปุ่น 100%
	2001	825,249	IC 357.6 MPs	ญี่ปุ่น 100%
	2002	138,909	IC 60,576,000 Pieces	ญี่ปุ่น 100%
21. โซนี่ เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด	1989	130,000	IC 112 MPs	เนเธอร์แลนด์, ญี่ปุ่น 100%
	1989	391,000	IC 48 MPs	เนเธอร์แลนด์, ญี่ปุ่น 100%
	1992	1,771,650	IC 160 MPs	เนเธอร์แลนด์, ญี่ปุ่น 100%
	1996	846,368	IC 80 MPs	เนเธอร์แลนด์, ญี่ปุ่น 100%
	1998	1,547,000	IC 120 MPs	เนเธอร์แลนด์, ญี่ปุ่น 100%
	2001	2,075,800	IC 144 MPs	เนเธอร์แลนด์, ญี่ปุ่น 100%
22. โอ๊กิ (ประเทศไทย) จำกัด	1990	965,000	IC 108 MPs IC 132 MPs, IC Testing	ญี่ปุ่น 100%
	1999	1,972,000	Service 12 MPs	ญี่ปุ่น 100%
23. โรม อพอลโล อีเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด	1987	103,206	Semiconductor 600 MPs Semiconductor 2,400 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	1989	100,000	Semiconductor 1,800 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	1993	799,542	Semiconductor 4,600 MPs,	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	1995	1,075,800	Carrier Tape 6,281 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
24. โตชิบา เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด	1998	524,288	Semiconductor 4,000 MPs, Carrier Tape 242 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
	2000	2,530,000	Semiconductor 10,000 MPs	สิงคโปร์, ญี่ปุ่น 100%
25. โซนี่ แมกเนติก โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด	2001	546200	IC Testing 54 MPs	เนเธอร์แลนด์ 100%
26. แม็กซิม อินทริเกรตเต็ด โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด	2002	496200	IC Testing 950 MPs	สหรัฐอเมริกา 100%

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน, 2545

ภาคผนวก ข

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลอง



## ข-1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ KEYENCE



ภาพที่ ข1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ส่องดูวัตถุที่มีขนาดเล็ก ขยายให้เป็นภาพขนาดใหญ่และมองเห็นรายละเอียดมากขึ้น ปกติตาคนเราจะมีความสามารถในการจำแนกรายละเอียด (Resolving power) เพียง 0.25 มิลลิเมตร ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์ช่วยจะสามารถแยกแยะรายละเอียดได้ถึง  $0.25 \mu\text{m}$  โดยทั่วไปถ้ากล่าวถึงกล้องจุลทรรศน์จะหมายถึงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical or Light Microscope) ซึ่งสามารถขยายภาพสูงสุดไม่เกิน 2,000 เท่า ใช้ประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้างานทางด้านวิทยาศาสตร์ได้หลายสาขาวิชา

กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ส่งลำแสงผ่านเลนส์ไปตกกระทบบนแผ่นแก้วสะท้อนแสง ทำให้แสงสะท้อนตกลงบนผิวตัวอย่างในลักษณะตั้งฉาก ผิวที่ขูดเรียบของตัวอย่างจะสะท้อนแสงกลับขึ้นไปผ่านเลนส์วัตถุ แล้วไปผ่านเลนส์ตา ก่อนจะผ่านเข้าตาผู้ดูทำให้เห็นภาพขยายของโครงสร้าง กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 50 เท่า จนถึง 1,000 เท่า ซึ่งภาพที่ได้จะถูกแสดงในจอมอนิเตอร์และสามารถบันทึกรูปภาพได้

ที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/กล้องจุลทรรศน์>

## ข-2 เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)



ภาพที่ ข2 เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

X-ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy เป็น เทคนิคที่นิยมใช้แพร่หลายในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การวิเคราะห์ธาตุที่มีความเป็นพิษที่อยู่ในอากาศ ด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ ดิน หิน โดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อย และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ด้านชีววิทยา/ด้านการแพทย์ เช่น การวิเคราะห์สารที่อยู่ในเส้นผมและเล็บ การตรวจวัดโบรมีนในซีรัม ด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการควบคุมกระบวนการและควบคุมคุณภาพ การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษในน้ำมันดิบ และอื่นๆ อีกมากมาย

โดยทั่วไปแล้วเครื่อง X-ray Spectrometer จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray tube หรือใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray tube เร่ง อิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าหมายขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241

เครื่อง XRF Spectrometer สามารถแบ่งย่อยออกเป็นหลายประเภทตามเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งผู้เขียนจะขอกล่าวถึงเฉพาะเทคนิคที่มีการใช้งานทั่วไปคือ Wavelength Dispersive XRF (WDXRF) และ Energy Dispersive XRF (EDXRF)

ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็น AAS, ICPS คือ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายๆ ตัวพร้อมกัน ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง

ที่มา : วารสาร LAB. TODAY ปีที่ 5 ฉบับที่ 37 ตุลาคม 2549

### ข-3 ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve)



ภาพที่ ข3 เครื่องวิเคราะห์ตะแกรงมาตรฐาน

ตะแกรงมาตรฐาน เป็นเครื่องมือคัดขนาดในห้องทดลองเกี่ยวกับด้านแต่งแร่ เพื่อตรวจสอบผลของการบดว่า แร่ที่มีค่าแยกตัวออกจากแร่ที่ไม่ต้องการขนาดใด ในการคัดขนาดผลของการบดจากเครื่องบดแบบต่างๆ ก็จะสามารถได้ว่า เครื่องบดเหล่านั้นทำงานได้ดีเพียงใด ยังมีแร่ขนาดใหญ่เหลือเพื่อที่จะต้องบดต่อไปอีกมากน้อยเท่าไร จากการพิจารณาผลของการคัดขนาดจะทำให้ทราบว่า จะต้องใช้เครื่องบดชนิดใดจึงจะเหมาะสม ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการแต่งแร่ต่อไป

การคัดขนาดในห้องทดลองโดยใช้ตะแกรง อาจจะได้ละเอียดถึง 37 ไมครอน (1 ไมครอน เท่ากับ 0.001 มิลลิเมตร) โดยทั่วไปแล้ว การคัดขนาดจะทำเพียงแค่ว่า 70 ไมครอน แต่ถ้าใช้วิธีการต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วอาจจะคัดขนาดลงไปได้ถึง 5 ไมครอน ตะกอนที่มีขนาดต่ำกว่า 5 ไมครอน ส่วนใหญ่มักจะอยู่ในสภาพของสารแขวนลอย คือ จะไม่จมตัวลงมา

ตารางที่ ข1 ตารางเปรียบเทียบขนาดของตะแกรงมาตรฐานต่างๆ

มาตรฐานอเมริกา (ASTM)			มาตรฐานอังกฤษ (BSI)			มาตรฐานกานาดา			แบบไทเลอร์ (U.S.)		
ขนาดตะแกรง	ขนาดรูตะแกรง		ขนาดตะแกรง	ขนาดรูตะแกรง		ขนาดตะแกรง	ขนาดรูตะแกรง		ขนาดตะแกรง	ขนาดรูตะแกรง	
	นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.		นิ้ว	มม.
2.5	0.315	8	-	-	-	-	-	-	2.5	0.312	7.925
3	0.265	6.73	-	-	-	-	-	-	3	0.263	6.68
3.5	0.223	5.66	-	-	-	-	-	-	3.5	0.221	5.613
4	0.187	4.76	-	-	-	-	-	-	4	0.185	4.699
5	0.157	4	5	0.132	3.34	-	-	-	5	0.156	3.962
6	0.132	3.36	6	0.1107	2.81	-	-	-	6	0.131	3.327
7	0.111	2.83	7	0.0949	2.41	-	-	-	7	0.11	2.794
8	0.0937	2.38	8	0.081	2.05	-	-	-	8	0.093	2.362
10	0.0787	2	10	0.066	1.67	10	0.0787	2	9	0.078	1.981
12	0.0661	1.68	12	0.0553	1.4	-	-	-	10	0.065	1.651
14	0.0555	1.41	14	0.0474	1.2	-	-	-	12	0.055	1.397
16	0.0469	1.19	16	0.0395	1	-	-	-	14	0.046	1.168
18	0.0394	1	18	0.0336	0.85	18	0.0395	1	16	0.039	0.991
20	0.0331	0.84	22	0.0275	0.7	-	-	-	20	0.0358	0.833
25	0.028	0.71	25	0.0236	0.6	-	-	-	24	0.0276	0.701
30	0.0232	0.59	30	0.0197	0.5	-	-	-	28	0.0232	0.589
35	0.0197	0.5	36	0.0166	0.421	35	0.0197	0.5	32	0.0195	0.495
40	0.0165	0.42	-	-	-	-	-	-	35	0.0164	0.417
45	0.0138	0.35	44	0.0139	0.353	45	0.0139	0.355	42	0.0138	0.351
50	0.0117	0.297	52	0.0116	0.295	-	-	-	48	0.0116	0.295
60	0.0098	0.25	60	0.0099	0.252	60	0.0098	0.25	60	0.0097	0.246
70	0.0083	0.21	72	0.0083	0.211	-	-	-	65	0.0082	0.208
80	0.007	0.177	85	0.007	0.177	80	0.0071	0.18	80	0.0069	0.175
100	0.0059	0.149	100	0.006	0.152	100	0.0059	0.15	100	0.0058	0.147
120	0.0049	0.125	120	0.0049	0.125	120	0.0049	0.125	115	0.0049	0.124
140	0.0041	0.105	150	0.0041	0.105	140	0.0041	0.106	150	0.0041	0.104
170	0.0035	0.088	170	0.0035	0.088	170	0.035	0.09	170	0.0035	0.088
200	0.0029	0.074	200	0.003	0.076	200	0.003	0.075	200	0.0029	0.074
230	0.0024	0.062	240	0.0026	0.065	230	0.0024	0.063	250	0.0024	0.061
270	0.0021	0.053	300	0.0021	0.053	270	0.0021	0.053	270	0.0021	0.053
325	0.0017	0.044	-	-	-	325	0.0017	0.045	325	0.0017	0.043

ตะแกรงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยลวดนำมาสานกันทำให้เกิดเป็นช่องและบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็น เมช (mesh) ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความ

ยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช หมายถึง ระยะความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกเสียด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ตะแกรงชุดหนึ่งๆ มันจะมีกฎเกณฑ์ขนาดของรูลดหลั่นไป ถ้าจะใช้หลักการก้าวหน้าทางเลขคณิต (Arithmetic Series) อย่างง่าย ๆ คือ 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 และ 1 นิ้วตามลำดับ จะเห็นว่าหลักนี้ไม่เหมาะสม เพราะว่าอนุภาคขนาด 1 นิ้ว และ 10 นิ้ว ซึ่งดูแล้วเกือบจะไม่เห็นความแตกต่าง ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นขึ้นใหม่โดยหาตัวคูณที่เหมาะสม เช่น ใช้ 2 เป็นตัวคูณ ตัวเลขจะออกมา 8, 4, 2 และ 1.5 นิ้ว เป็นต้น ซึ่งอยู่ในระบบความก้าวหน้าทางเรขาคณิต (Geometric Series) แต่ต่อมาได้มีการแก้ไข  $\sqrt{2}$  เป็นตัวคูณ และได้กลายเป็นมาตรฐานของตะแกรงที่ใช้กันในประเทศสหรัฐอเมริกาในปัจจุบัน

สิ่งที่ควรระวังในการคัดขนาด ก็คือ อย่าใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะจะทำให้เม็ดแร่ไปอุดตามช่อง หรืออาจจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งแร่จะเกิดรวมตัวเป็นก้อน ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดไป นอกจากนี้ความชื้นจะต้องทำให้มีน้อยที่สุด

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี. คู่มือการแต่งแร่. 2527.

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ

**ตารางที่ ค1** ข้อมูลการทดลองจากการหาการกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่หนึ่ง ระยะห่างพื้นเลื่อย 4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน

ขนาด µm	การย่อยครั้งที่ (ครั้งที่ทดลอง) , กรัม														
	ครั้งที่ 1 (1)	ครั้งที่ 1 (2)	ครั้งที่ 1 (3)	ครั้งที่ 2 (1)	ครั้งที่ 2 (2)	ครั้งที่ 2 (3)	ครั้งที่ 3 (1)	ครั้งที่ 3 (2)	ครั้งที่ 3 (3)	ครั้งที่ 4 (1)	ครั้งที่ 4 (2)	ครั้งที่ 4 (3)	ครั้งที่ 5 (1)	ครั้งที่ 5 (2)	ครั้งที่ 5 (3)
4750	265.1	257.9	258.2	193	181.9	187.45	133.4	132.1	132.75	88.6	84.1	86.35	44.3	40.3	42.3
3082	7.9	7.8	9.2	49.3	59	54.15	84.9	83.9	84.4	150.4	152.9	151.65	95.9	97.5	96.7
1536	0.6	0.6	0.6	2.3	2.6	2.45	4.6	5	4.8	14.9	14.2	14.55	7.5	7.4	7.45
1001	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.45	0.8	1	0.9	4.1	5.8	4.95	1.6	1.5	1.55
714	0.2	0.2	0.2	0.5	0.6	0.55	0.7	0.6	0.65	3.7	3.7	3.7	1.1	1.1	1.1
504	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.35	0.5	0.5	0.5	2.7	3.2	2.95	0.7	0.7	0.7
425	0.3	0.3	0.3	1	1.1	1.05	1.8	2.3	2.05	6.4	5.9	6.15	1.5	1.4	1.45



**ตารางที่ ค2** ข้อมูลการทดลองจากการหาการกระจายตัวของขนาดหลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเลื่อยตัวที่สอง ระยะห่างพื้นเลื่อย 3 มิลลิเมตร ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน

ขนาด µm	การย่อยครั้งที่ (ครั้งที่ทดลอง) , กรัม														
	ครั้งที่ 1 (1)	ครั้งที่ 1 (2)	ครั้งที่ 1 (3)	ครั้งที่ 2 (1)	ครั้งที่ 2 (2)	ครั้งที่ 2 (3)	ครั้งที่ 3 (1)	ครั้งที่ 3 (2)	ครั้งที่ 3 (3)	ครั้งที่ 4 (1)	ครั้งที่ 4 (2)	ครั้งที่ 4 (3)	ครั้งที่ 5 (1)	ครั้งที่ 5 (2)	ครั้งที่ 5 (3)
4750	49.5	48.2	48.85	27.8	28.2	28	17.7	17.2	17.45	5.8	5.9	5.85	10.3	9.8	10.05
3082	124.3	125.1	124.7	150.4	152.6	151.5	143.7	144.1	143.9	104.4	102.5	103.45	176.4	175	175.7
1536	12.2	11.8	12	21.9	19.5	20.7	27.5	26.9	27.2	20.7	21.3	21	32	33.2	32.6
1001	3.2	3.3	3.25	5.7	5.6	5.65	7.2	8	7.6	5.4	6	5.7	7.1	7.2	7.15
714	2.9	2.5	2.7	4.8	5	4.9	5.5	4.9	5.2	3.9	3.5	3.7	4.9	4.4	4.65
504	2.1	2.3	2.2	3.3	3.4	3.35	3.5	3.6	3.55	2.2	2.3	2.25	2.8	3.1	2.95
425	6.8	7.1	6.95	8	7.9	7.95	7.4	7.6	7.5	4.9	5.3	5.1	7.2	7.8	7.5

**ตารางที่ ค3** ข้อมูลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์สะสมน้ำหนักค้างตะแกรง หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ระยะห่างฟันเลื่อย 4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน

ขนาด µm	การย่อยครั้งที่ (ครั้งที่ทดลอง) , กรัม														
	ครั้งที่ 1 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 2 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 3 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 4 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 5 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %
4750	48.85	24.35	100.00	28.00	12.61	100.00	17.45	8.22	100.00	5.85	3.98	100.00	10.05	4.18	100.00
3082	124.70	62.15	75.65	151.50	68.23	87.39	143.90	67.75	91.78	103.45	70.35	96.02	175.70	73.03	95.82
1536	12.00	5.98	13.51	20.70	9.32	19.16	27.20	12.81	24.03	21.00	14.28	25.67	32.60	13.55	22.80
1001	3.25	1.62	7.53	5.65	2.54	9.84	7.60	3.58	11.23	5.70	3.88	11.39	7.15	2.97	9.25
714	2.70	1.35	5.91	4.90	2.21	7.30	5.20	2.45	7.65	3.70	2.52	7.51	4.65	1.93	6.28
504	2.20	1.10	4.56	3.35	1.51	5.09	3.55	1.67	5.20	2.25	1.53	5.00	2.95	1.23	4.34
425	6.95	3.46	3.46	7.95	3.58	3.58	7.50	3.53	3.53	5.10	3.47	3.47	7.50	3.12	3.12
		100			100			100			100			100	

ตารางที่ ค4 ข้อมูลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์สะสมน้ำหนักค้างตะแกรง หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเหลี่ยมตัวที่สอง ระยะห่างฟันเลื่อย 3 มิลลิเมตร ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน

ขนาด µm	การย่อยครั้งที่ (ครั้งที่ทดลอง) , กรัม														
	ครั้งที่ 1 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 2 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 3 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 4 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %	ครั้งที่ 5 (av)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง, %	ค้าง ตะแกรง สะสม, %
4750	260.4	96.37	100	187.45	76.06	100	132.75	58.72	100	86.35	31.94	100	42.3	26.88	100
3082	8.3	3.07	3.62	54.15	21.97	23.93	84.4	37.33	41.27	151.65	56.10	68.05	96.7	61.45	73.11
1536	0.6	0.22	0.55	2.45	0.99	1.96	4.8	2.12	3.93	14.55	5.38	11.94	7.45	4.73	11.66
1001	0.2	0.07	0.33	0.45	0.18	0.97	0.9	0.39	1.81	4.95	1.83	6.56	1.55	0.98	6.93
714	0.2	0.07	0.25	0.55	0.22	0.79	0.65	0.28	1.41	3.7	1.36	4.73	2	1.27	5.94
504	0.2	0.07	0.18	0.35	0.14	0.56	0.5	0.22	1.12	2.95	1.09	3.36	1.78	1.13	4.67
425	0.3	0.11	0.11	1.05	0.42	0.42	2.05	0.90	0.90	6.15	2.27	2.27	5.58	3.54	3.54
		100			100			100			100			100	

ตารางที่ ค5 ข้อมูลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์สะสมน้ำหนักค่าคงที่ตะแกรง หลังการบดด้วยเครื่องบดแบบแบ่งโลหะที่เวลาในการบดแตกต่างกัน ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน

ขนาด µm	เวลาในการบด , นาที															180 (av)	น้ำหนัก ค่าคง ตะแกร ง, %	ค่าคง ตะแกร ง, %
	30 (av)	น้ำหนัก ค่าคง ตะแกร ง, %	ค่าคง ตะแกร ง, %	60 (av)	น้ำหนัก ค่าคง ตะแกร ง, %	ค่าคง ตะแกร ง, %	90 (av)	น้ำหนัก ค่าคง ตะแกร ง, %	ค่าคง ตะแกร ง, %	120 (av)	น้ำหนัก ค่าคง ตะแกร ง, %	ค่าคง ตะแกร ง, %	150 (av)	น้ำหนัก ค่าคง ตะแกร ง, %	ค่าคง ตะแกร ง, %			
4750	100.30	37.34	100.00	60.80	19.49	100.00	49.20	13.30	100.00	30.50	7.90	100.00	2.70	1.28	100.00	1.50	0.59	100.0
3082	60.80	22.64	62.66	69.30	22.22	80.51	88.40	23.90	86.70	92.40	23.94	92.10	26.30	12.46	98.72	21.00	8.21	99.41
1536	22.00	8.19	40.02	30.40	9.75	58.29	40.30	10.89	62.80	48.30	12.51	68.16	24.50	11.61	86.26	27.60	10.79	91.20
1001	31.80	11.84	31.83	53.50	17.15	48.54	71.00	19.19	51.91	78.20	20.26	55.65	49.20	23.31	74.66	61.40	24.00	80.41
714	17.40	6.48	19.99	30.50	9.78	31.39	38.90	10.52	32.71	44.20	11.45	35.39	33.60	15.92	51.35	41.80	16.34	56.41
504	20.50	7.63	13.51	33.20	10.64	21.61	34.10	9.22	22.20	36.80	9.53	23.94	26.80	12.70	35.43	34.10	13.33	40.07
425	15.80	5.88	5.88	34.20	10.97	10.97	48.00	12.98	12.98	55.60	14.40	14.40	48.00	22.74	22.74	68.40	26.74	26.74
		100			100			100			100			100			100	

**ตารางที่ ค6** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเดี่ยวตัวที่หนึ่ง การย่อยครั้งที่ 1

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	198	2	0
4750 – 2000	3082	0	186	14	0
2000 – 1190	1536	0	156	44	0
1190 – 841	1001	5	160	35	2.5
841 – 594	714	13	140	47	6.5
594 – 420	504	16	55	129	8
< 420	420	11	7	182	5.5

**ตารางที่ ค7** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเดี่ยวตัวที่หนึ่ง การย่อยครั้งที่ 2

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	191	9	0
4750 – 2000	3082	0	181	19	0
2000 – 1190	1536	3	147	50	1.5
1190 – 841	1001	10	159	31	5
841 – 594	714	25	109	66	12.5
594 – 420	504	21	62	117	10.5
< 420	420	7	8	185	3.5

**ตารางที่ ค8** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง การย่อยครั้งที่ 3

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	191	9	0
4750 – 2000	3082	0	186	14	0
2000 – 1190	1536	6	129	62	3.04
1190 – 841	1001	17	131	55	8.4
841 – 594	714	22	102	76	11
594 – 420	504	18	40	142	9
< 420	420	5	2	193	2.5

**ตารางที่ ค9** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง การย่อยครั้งที่ 4

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	189	11	0
4750 – 2000	3082	0	171	29	0
2000 – 1190	1536	8	111	90	3.8
1190 – 841	1001	23	117	60	11.5
841 – 594	714	26	76	98	13
594 – 420	504	29	37	134	14.5
< 420	420	8	5	187	4

**ตารางที่ ค10** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเดี่ยวตัวที่หนึ่ง การย่อยครั้งที่ 5

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	148	52	0
4750 – 2000	3082	0	172	28	0
2000 – 1190	1536	8	94	98	4
1190 – 841	1001	31	65	104	15.5
841 – 594	714	38	77	85	19
594 – 420	504	27	32	141	13.5
< 420	420	11	1	188	5.5

**ตารางที่ ค11** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งพื้นเดี่ยวตัวที่สอง การย่อยครั้งที่ 1

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	164	36	0
4750 – 2000	3082	0	159	41	0
2000 – 1190	1536	8	94	98	4
1190 – 841	1001	31	83	124	13.02
841 – 594	714	27	77	134	11.34
594 – 420	504	27	45	141	12.68
< 420	420	22	23	228	8.06

**ตารางที่ ค12** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง การย่อยครั้งที่ 2

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	163	37	0
4750 – 2000	3082	2	145	53	1
2000 – 1190	1536	19	98	83	9.5
1190 – 841	1001	34	91	142	12.73
841 – 594	714	38	46	151	16.17
594 – 420	504	35	45	141	15.84
< 420	420	22	16	247	7.72

**ตารางที่ ค13** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง การย่อยครั้งที่ 3

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	172	28	0
4750 – 2000	3082	1	151	48	0.5
2000 – 1190	1536	15	76	109	7.5
1190 – 841	1001	28	70	121	12.79
841 – 594	714	31	37	128	15.82
594 – 420	504	26	31	153	12.38
< 420	420	24	11	241	8.70



**ตารางที่ ค14** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง การย่อยครั้งที่ 4

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	154	46	0
4750 – 2000	3082	4	132	64	2
2000 – 1190	1536	15	76	109	7.5
1190 – 841	1001	38	67	142	15.38
841 – 594	714	26	47	127	13
594 – 420	504	21	25	169	9.77
< 420	420	23	12	267	7.61

**ตารางที่ ค15** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง การย่อยครั้งที่ 5

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
4750	4750	0	171	29	0
4750 – 2000	3082	2	161	37	1
2000 – 1190	1536	20	111	69	10
1190 – 841	1001	31	62	102	15.90
841 – 594	714	34	54	163	13.55
594 – 420	504	26	12	186	11.61
< 420	420	16	6	258	5.71

**ตารางที่ ค16** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่เวลา 30 นาที

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
2000	2000	7	164	40	3.32
2000 – 1190	1543	11	131	127	4.09
1190 – 841	1000	45	46	185	16.30
841 – 420	594	35	8	191	14.96
420 – 210	297	8	1	202	3.79
210 - 63	115	3	0	422	0.71
< 63	63	1	0	424	0.24

**ตารางที่ ค17** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่เวลา 60 นาที

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
2000	2000	10	151	45	4.85
2000 – 1190	1543	41	93	119	16.21
1190 – 841	1000	57	24	240	17.76
841 – 420	594	40	39	180	15.44
420 – 210	297	15	2	269	5.24
210 - 63	115	6	0	419	1.41
< 63	63	1	0	424	0.24

**ตารางที่ ค18** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่เวลา 90 นาที

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
2000	2000	25	209	41	9.09
2000 – 1190	1543	31	69	65	18.79
1190 – 841	1000	57	61	135	22.53
841 – 420	594	49	26	212	17.07
420 – 210	297	13	1	325	3.83
210 - 63	115	7	0	418	1.65
< 63	63	1	0	424	0.24

**ตารางที่ ค19** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่เวลา 120 นาที

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
2000	2000	20	151	31	9.90
2000 – 1190	1543	44	91	83	20.18
1190 – 841	1000	60	50	128	25.21
841 – 420	594	50	33	195	17.99
420 – 210	297	14	0	324	4.14
210 - 63	115	6	0	419	1.41
< 63	63	1	0	424	0.24

**ตารางที่ ค20** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่เวลา 150 นาที

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
2000	2000	52	333	13	13.07
2000 – 1190	1543	43	89	45	24.29
1190 – 841	1000	49	38	78	29.70
841 – 420	594	58	11	325	14.72
420 – 210	297	19	0	283	6.29
210 - 63	115	6	0	419	1.41
< 63	63	1	0	424	0.24

**ตารางที่ ค21** ข้อมูลการทดลองการหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง ด้วยวิธีการนับเม็ด (Grain counting) จากการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบแท่งโลหะ ที่เวลา 180 นาที

Particle Size range ( $\mu\text{m}$ )	Mean size ( $\mu\text{m}$ )	Free (grain)	Locked (grain)	Gangue (grain)	%Liberation
2000	2000	25	132	9	15.06
2000 – 1190	1543	66	142	72	23.57
1190 – 841	1000	61	85	81	26.87
841 – 420	594	98	17	320	22.53
420 – 210	297	23	0	376	5.76
210 - 63	115	1	0	424	0.24
< 63	63	1	0	424	0.24

**ตารางที่ ค22** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่หนึ่ง ในการย่อยครั้งที่ 1

Interval	Size $\mu\text{m}$	Retained size $\mu\text{m}$	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	81.000	100.000	1.000	0.087	1.000	0.000
2	3359	2375	15.500	19.000	0.190	0.087	1.000	0.822
3	2375	1679	2.500	3.500	0.035	0.087	0.178	0.127
4	1679	1188	0.500	1.000	0.010	0.087	0.050	0.025
5	1188	840	0.200	0.500	0.005	0.087	0.025	0.010
6	840	594	0.100	0.300	0.003	0.087	0.015	0.005
7	594	0	0.200	0.200	0.002	0.087	0.010	0.010

**ตารางที่ ค23** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่หนึ่ง ในการย่อยครั้งที่ 2

Interval	Size $\mu\text{m}$	Retained size $\mu\text{m}$	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	64.000	100	1.000	0.189	1.000	0
2	3359	2375	22.000	36.000	0.360	0.189	1.000	0.654
3	2375	1679	10.000	14.000	0.140	0.189	0.346	0.252
4	1679	1188	2.500	4.000	0.040	0.189	0.094	0.059
5	1188	840	0.500	1.500	0.015	0.189	0.035	0.012
6	840	594	0.500	1.000	0.010	0.189	0.023	0.012
7	594	0	0.500	0.500	0.005	0.189	0.011	0.011

**ตารางที่ ค24** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่หนึ่ง ในการย่อยครั้งที่ 3

Interval	Size μm	Retained size μm	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	49.000	100	1.000	0.305	1.000	0
2	3359	2375	27.000	51.000	0.510	0.305	1.000	0.610
3	2375	1679	16.500	24.000	0.240	0.305	0.390	0.279
4	1679	1188	5.000	7.500	0.075	0.305	0.111	0.075
5	1188	840	1.000	2.500	0.025	0.305	0.036	0.015
6	840	594	0.500	1.500	0.015	0.305	0.021	0.007
7	594	0	1.000	1.000	0.010	0.305	0.014	0.014

**ตารางที่ ค25** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่หนึ่ง ในการย่อยครั้งที่ 4

Interval	Size μm	Retained size μm	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	26.500	100	1.000	0.572	1.000	0
2	3359	2375	31.500	73.500	0.735	0.572	1.000	0.587
3	2375	1679	25.000	42.000	0.420	0.572	0.413	0.272
4	1679	1188	8.500	17.000	0.170	0.572	0.141	0.074
5	1188	840	3.000	8.500	0.085	0.572	0.067	0.024
6	840	594	1.500	5.500	0.055	0.572	0.043	0.012
7	594	0	4.000	4.000	0.040	0.572	0.031	0.031

**ตารางที่ ค26** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่หนึ่ง ในการย่อยครั้งที่ 5

Interval	Size $\mu\text{m}$	Retained size $\mu\text{m}$	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	22.500	100	1.000	0.643	1.000	0
2	3359	2375	32.500	77.500	0.775	0.643	1.000	0.596
3	2375	1679	28.500	45.000	0.450	0.643	0.404	0.282
4	1679	1188	8.000	16.500	0.165	0.643	0.122	0.062
5	1188	840	2.000	8.500	0.085	0.643	0.060	0.015
6	840	594	1.500	6.500	0.065	0.643	0.045	0.011
7	594	0	5.000	5.000	0.050	0.643	0.035	0.035

**ตารางที่ ค27** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่สอง ในการย่อยครั้งที่ 1

Interval	Size $\mu\text{m}$	Retained size $\mu\text{m}$	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	20.000	100	1.000	0.695	1.000	0
2	3359	2375	32.500	80.000	0.800	0.695	1.000	0.597
3	2375	1679	28.500	47.500	0.475	0.695	0.403	0.271
4	1679	1188	9.500	19.000	0.190	0.695	0.132	0.069
5	1188	840	3.000	9.500	0.095	0.695	0.062	0.020
6	840	594	1.500	6.500	0.065	0.695	0.042	0.010
7	594	0	5.000	5.000	0.050	0.695	0.032	0.032

**ตารางที่ ค28** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่สอง ในการย่อยครั้งที่ 2

Interval	Size μm	Retained size μm	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	10.500	100	1.000	0.974	1.000	0
2	3359	2375	33.500	89.500	0.895	0.974	1.000	0.634
3	2375	1679	31.000	56.000	0.560	0.974	0.366	0.238
4	1679	1188	12.000	25.000	0.250	0.974	0.128	0.066
5	1188	840	4.500	13.000	0.130	0.974	0.062	0.022
6	840	594	3.000	8.500	0.085	0.974	0.040	0.014
7	594	0	5.500	5.500	0.055	0.974	0.025	0.025

**ตารางที่ ค29** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่สอง ในการย่อยครั้งที่ 3

Interval	Size μm	Retained size μm	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	6.500	100	1.000	1.183	1.000	0
2	3359	2375	32.500	93.500	0.935	1.183	1.000	0.654
3	2375	1679	31.000	61.000	0.610	1.183	0.346	0.215
4	1679	1188	14.500	30.000	0.300	1.183	0.131	0.069
5	1188	840	6.000	15.500	0.155	1.183	0.062	0.025
6	840	594	3.000	9.500	0.095	1.183	0.037	0.012
7	594	0	6.500	6.500	0.065	1.183	0.025	0.025



**ตารางที่ ค30** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่สอง ในการย่อยครั้งที่ 4

Interval	Size $\mu\text{m}$	Retained size $\mu\text{m}$	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	3.500	100	1.000	1.452	1.000	0
2	3359	2375	32.500	96.500	0.965	1.452	1.000	0.694
3	2375	1679	32.000	64.000	0.640	1.452	0.306	0.190
4	1679	1188	16.000	32.000	0.320	1.452	0.115	0.063
5	1188	840	6.500	16.000	0.160	1.452	0.052	0.022
6	840	594	3.500	9.500	0.095	1.452	0.030	0.011
7	594	0	6.000	6.000	0.060	1.452	0.019	0.019

**ตารางที่ ค31** ผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟัน  
เดี่ยวตัวที่สอง ในการย่อยครั้งที่ 5

Interval	Size $\mu\text{m}$	Retained size $\mu\text{m}$	Feed %retain	Cumulative %passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	3.500	100	1.000	1.452	1.000	0
2	3359	2375	34.000	96.500	0.965	1.452	1.000	0.707
3	2375	1679	33.500	62.500	0.625	1.452	0.293	0.191
4	1679	1188	15.000	29.000	0.290	1.452	0.102	0.057
5	1188	840	6.500	14.000	0.140	1.452	0.045	0.022
6	840	594	2.500	7.500	0.075	1.452	0.023	0.008
7	594	0	5.000	5.000	0.050	1.452	0.015	0.015

ตารางที่ ค32 การหาค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทองแดงและของพลาสติก หลังการบดด้วยเครื่องบดแบบแบ่งโลหะที่ 60 120 และ 180 นาที

เวลาการบด 60 นาที								
mean size, $\mu\text{m}$	%Cu	S.G. Cu	wt.Cu	Cu. Distribution	%plastic	S.G. plastic	plastic wt.	plastic distribution
2000	4.9	8.9	43.2	7.9	21.8	1.4	30.6	4.3
1543	16.2	8.9	144.2	26.5	47.0	1.4	65.8	9.3
1000	17.8	8.9	158.0	29.0	74.8	1.4	104.7	14.8
594	15.4	8.9	137.5	25.3	69.5	1.4	97.3	13.7
297	5.2	8.9	46.7	8.6	94.1	1.4	131.7	18.6
115	1.4	8.9	12.6	2.3	98.6	1.4	138.0	19.5
63	0.2	8.9	2.1	0.4	99.8	1.4	139.7	19.7
			544.3				707.8	100.0
เวลาการบด 120 นาที								
mean size, $\mu\text{m}$	%vol. Cu	S.G. Cu	wt. Cu	Cu. Distribution	%vol. plastic	S.G. plastic	plastic wt.	plastic distribution
2000	9.9	8.9	88.1	12.5	15.3	1.4	21.5	3.3
1543	20.2	8.9	179.6	25.5	38.1	1.4	53.3	8.1
1000	25.2	8.9	224.4	31.9	53.8	1.4	75.3	11.4
594	18.0	8.9	160.1	22.7	70.1	1.4	98.2	14.9
297	4.1	8.9	36.9	5.2	95.9	1.4	134.2	20.3
115	1.4	8.9	12.6	1.8	98.6	1.4	138.0	20.9
63	0.2	8.9	2.1	0.3	99.8	1.4	139.7	21.2
			703.7				660.2	100.0
เวลาการบด 180 นาที								
mean size, $\mu\text{m}$	%Cu	S.G. Cu	Cu wt	Cu. Distribution	%plastic	S.G. plastic	plastic wt.	plastic distribution
2000	15.1	8.9	43.2	7.9	5.4	1.4	7.6	1.2
1543	23.6	8.9	144.2	26.5	25.7	1.4	36.0	5.9
1000	26.9	8.9	158.0	29.0	35.7	1.4	50.0	8.2
594	22.5	8.9	137.5	25.3	73.6	1.4	103.0	16.9
297	5.8	8.9	46.7	8.6	94.2	1.4	131.9	21.7
115	0.2	8.9	12.6	2.3	99.8	1.4	139.7	23.0
63	0.2	8.9	2.1	0.4	99.8	1.4	139.7	23.0
			544.3				607.8	100.0

## ตัวอย่างการคำนวณ

### 1. การคำนวณหาเฉลี่ยช่วงของขนาด (Mean particle size)

ช่วงขนาดตะแกรงมาตรฐาน ที่ 4750 – 2000  $\mu\text{m}$

$$\text{จากสมการ Mean particle size} = \sqrt{x_i x_{i+1}}$$

เพราะฉะนั้น Mean particle size ของช่วงขนาด 4750 – 2000 เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{Mean particle size} &= \sqrt{4750 \times 2000} \\ &= 3082 \mu\text{m} \end{aligned}$$

### 2. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหลุดแยกของทองแดง

$$\text{จากสมการที่ 3.1 } LD = \left( \sum_{i=1}^n \frac{N_{fi}}{N_{fi} + N_{gi} + N_{li}} / n \right) \times 100$$

เช่น Free = 34, Locked = 91, Gangue = 142

$$\begin{aligned} \% \text{ Liberation} &= \left( \frac{34}{34+91+142} \right) \times 100 \\ &= 12.73 \% \end{aligned}$$

### 3. การคำนวณฟังก์ชันการแตกหัก

$$\text{จากสมการที่ 3.3 } B_{i1} = \frac{\log \left[ \frac{1-P_i(0)}{1-P_i(t)} \right]}{\log \left[ \frac{1-P_2(0)}{1-P_2(t)} \right]}$$

เมื่อ  $P_i(0)$  = สัดส่วนมวลสะสมของขนาดที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา 0

$P_i(t)$  = สัดส่วนมวลสะสมของขนาดที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา  $t$  ใดๆ

$B_{i,1}$  = สัดส่วนมวลสะสมของอนุภาคจากการแตกหักของอนุภาคขนาด

ที่ 1 สู้ช่วงขนาดที่  $i$  ใดๆที่น้อยกว่าขนาด  $d_i$  ที่เวลา

ตารางที่ ค33 ตัวอย่างการคำนวณจากผลการทดลองการคำนวณหาฟังก์ชันการแตกหัก ของเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ในการย่อยครั้งที่ 2

Interval	Size µm	Retained Size, µm	Feed %retain	%Cumulative passing	Cumulative fraction	term below $\log \left[ \frac{1 - P_2(0)}{1 - P_2(t)} \right]$	$B_{i,1}$	$b_{i,1}$
1	4750	3359	10.500	100	1.000	0.974	1.000	0
2	3359	2375	33.500	89.500	0.895	0.974	1.000	0.634
3	2375	1679	31.000	56.000	0.560	0.974	0.366	0.238
4	1679	1188	12.000	25.000	0.250	0.974	0.128	0.066
5	1188	840	4.500	13.000	0.130	0.974	0.062	0.022
6	840	594	3.000	8.500	0.085	0.974	0.040	0.014
7	594	0	5.500	5.500	0.055	0.974	0.025	0.025

การคำนวณ

$$B_{3,1} = \frac{\log \left[ \frac{1-0}{1-0.56} \right]}{\log \left[ \frac{1-0.001}{1-0.89} \right]}$$

เพราะฉะนั้น ค่า  $B_{3,1} = 0.366$

และ

$$B_{4,1} = \frac{\log \left[ \frac{1-0}{1-0.250} \right]}{\log \left[ \frac{1-0.001}{1-0.89} \right]}$$

เพราะฉะนั้น ค่า  $B_{4,1} = 0.128$

การคำนวณฟังก์ชันการแตกหัก สามารถคำนวณได้โดย

$$b_{i,1} = B_{i,1} - B_{i+1,1}$$

ตัวอย่างเช่น  $b_{3,1} = 0.366 - 0.128 = 0.238$

เมื่อคำนวณฟังก์ชันการแตกหักทุกช่วงการแตกหักแล้ว จะได้ตารางที่ ค33 จากนั้นจึงนำมาเขียนฟังก์ชันการแตกหัก ดังนี้

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ B_2 & B_1 & 0 & \dots & 0 \\ B_3 & B_2 & B_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ B_N & B_{N-1} & B_{N-2} & \dots & B_1 \end{bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$B_{2nd} (GT2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.634 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.238 & 0.634 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.066 & 0.238 & 0.634 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.066 & 0.238 & 0.634 & 0 & 0 & 0 \\ 0.014 & 0.022 & 0.066 & 0.238 & 0.634 & 0 & 0 \\ 0.025 & 0.014 & 0.022 & 0.066 & 0.238 & 0.634 & 1 \end{bmatrix}$$

### ภาคผนวก ง

ภาพแสดงซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบ  
ลูกกลิ้งฟันเลื่อย

ง-1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง



ภาพที่ ง1 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ย่อยครั้งที่ 1



ภาพที่ ง2 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ย่อยครั้งที่ 2



ภาพที่ ง3 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ย่อยครั้งที่ 3



ภาพที่ ง4 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่หนึ่ง ย่อยครั้งที่ 4





ภาพที่ ๖5 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเดี่ยวตัวที่หนึ่ง ย่อยครั้งที่ 5

ง-2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง



ภาพที่ ง1 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ย่อยครั้งที่ 1



ภาพที่ ง2 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ย่อยครั้งที่ 2



ภาพที่ ๓3 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ย่อยครั้งที่ 3



ภาพที่ ๓4 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ย่อยครั้งที่ 4



ภาพที่ ๖5 เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้งฟันเลื่อยตัวที่สอง ย่อยครั้งที่ 5

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ : นายชรัช ฉวีบุญยาศิลป์
- วัน เดือน ปี เกิด : 13 มิถุนายน พ.ศ. 2530
- สถานที่เกิด : จังหวัดตรัง
- ที่อยู่ติดต่อได้ : 40/21 หมู่ 2 ซอยสุขาภิบาล 4 ตำบลท่าตำหนัก  
อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม 73120
- โทรศัพท์ : 034-333093, 085-1683037
- อีเมลล์ : Charat.C1987@gmail.com
- การศึกษา
- ประถมศึกษา : โรงเรียนพุทธยาธรรม จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- มัธยมศึกษา : โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม
- ปริญญาตรี : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์  
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ  
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา  
2551
- ปัจจุบัน : ได้เข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่  
และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ในปีการศึกษา 2552