ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การตรวจวัดคุณสมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิลชนิดเอบีเอสแบบไม่ทำลาย

Nondestructive Machanical Property Testing of Recycled ABS Plastic

นามผู้วิจัย นายพัฒนโชค คุนาพงษ์กิติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเนตร พรานนท์สถิตย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุรพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน.................**เดือน**......................... **พ.ศ.** …………...

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจวัดคุณสมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิลชนิด เอบีเอสแบบไม่ทำลาย

Nondestructive Machanical Property Testing of Recycled ABS Plastic

โดย

นายพัฒนโชค คุนาพงษ์กิติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พัฒนโชค คุนาพงษ์กิติ 2555: การตรวจวัดคุณสมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิลชนิดเอบีเอสแบบไม่ทำลาย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเนตร พรานนท์สถิตย์, Ph.D. 116 หน้า

กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมอย่างแพร่หลายเพื่อลดปริมาณขยะพลาสติก แต่ถึงอย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกลของพลาสที่รีไซเคิลจะด้อยลง การควบคุมคุณภาพจึงจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปแล้วการทดสอบคุณสมบัติทางกลจะเป็นแบบทำลายชิ้นงานซึ่งจะมีการใช้เวลาในการทดสอบที่นาน สำหรับงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีใหม่สำหรับการวัดคุณสมบัติทางกลโดยใช้วิธการทางแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงระดับอินฟราเรดในการวัดคุณลักษณะของพลาสติก ซึ่งวิธีนี้เป็นแบบไม่ทำลายชิ้นงานรวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่น้อยกว่าและมีขั้นตอนที่สะดวกในการทดสอบ

ชิ้นงานพลาสติกชนิดเอบีเอสเพื่อใช้ทดสอบมี150ชิ้นงานโดยมีอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล ความหนา และสีที่แตกต่างกันไป เพื่อใช้ทดสอบทั้งทางกล และทางแสง โดยทางกลใช้การทดสอบความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทก การทดสอบทางแสงจะใช้แสงความถี่ 1550 นาโนเมตรเพื่อวัดความแตกต่างทางคุณลักษณะจากอัตราการส่งผ่านของแสงของแต่ละอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล และเนื่องจากอัตราการส่งผ่านของแสงส่งผลกับอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลและคุณสมบัติทางกล ดังนั้นคุณสมบัติทางกลจึงสามารถคำนวนได้จากสมการที่ได้จากการวิเคราะข้อมูลและหาความสัมพันธ์จากการทดลองทางแสงและเปรียบเทียบกับวิธีทางกล โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดเป็นแบบเชิงเส้นโดยมีค่าอัตราการตัดสินใจ (R^2) ที่มากกว่า 0.8 โดยหลังจากนั้นได้ทำระบบเซนเซอร์ของวิธีการวัดทางแสงซึ่งประกอบด้วย เลเซอร์ไดโอดและเซนเซอร์ เครื่องวัดความหนาและเซนเซอร์วัดสี โดยทั้งหมดทำงานร่วมกับหน้าจอแสดงผลแบบสัมผัสเพื่อง่ายต่อการใช้งานซึ่งสุดท้ายจึงนำผลการทดสอบทางกลของระบบเซนเซอร์ของวิธีการทางแสงเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากวิธีการทดสอบทางกลโดยตรงด้วยวิธีการหารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง (*NRMSE*) ซึ่งได้ผลที่ยอมรับได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถสร้างเครื่องมือวัดคุณภาพพลาสติกโดยวิธีการทางแสง โดยมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสี และความหนาเพิ่มเข้ามาเพื่อความแม่นยำในการวัดปริมาณส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลที่มีสีและความหนาต่างๆกันได้ นอกจากนี้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังมีต้นทุนและค่าบำรุงรักษาต่ำ ขนาดเล็ก และรวดเร็วกว่าการใช้เครื่องมือทดสอบทางกล ซึ่งโดยทั้งหมดได้คาดหวังว่าวิธีการทดสอบนี้จะสามารถส่งเสริมการใช้งานพลาสติกรีไซเคิลที่มากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกไปได้มาก

______________________ ______________________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pattanachoke Kunapongkiti 2012: Nondestructive Machanical Property Testing of Recycled ABS Plastic. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering.
Thesis Advisor: Assistant Professor. Suneat Pranonsatit, Ph.D. 116 pages.

Adding recycled plastic into the overall composition is one of widely customary methods to reduce plastic waste. However, the mechanical properties of recycled plastic products are different from virgin plastic products. Therefore, quality control is required in manufacturing. Generally, universal mechanical testing is a destructive and time-consuming method. This thesis, therefore, presents an alternative, which is a nondestructive mechanical property testing of recycled ABS plastic. Furthermore, this technique aims for a cheaper and more convenient substitution. A spectroscopic method of measuring optical transmittance characteristics in near-infrared wavelengths is employed.

ABS plastic samples were prepared with various recycled compositions, thicknesses and colors. They were tested both near infrared optical characteristics and conventional mechanical properties, that are tensile and impact strengths. These properties vary with recycled compositions and thicknesses. The optical characteristics at wavelength of 1550 nm were utilized to distinguish the differences in recycle compositions. Since the percentage of optical transmittance is a function of recycle composition and, thus, tensile and impact strengths, the resulted mechanical properties can be calculated using equations derived from previously collected data and relationships. Linear relationships were employed with coefficient of determination (R^2) over 0.8. A plastic sensor system was established. Laser diode sensor, thickness meter and color sensor were included, along with user-friendly commands and displays. Sensor measured data was collected. Finally, comparisons between results from conventional mechanical testing and calculated results were made. The comparison results showed that the normalized root mean square errors (NRMSE) are in an acceptable range.

In conclusions, the proposed recycled plastic sensor system was established and verified. The results indicate that the spectroscopic method of laser diode, integrated with colour and thickness measurement units can be employed in replacement of destructive mechanical testing. The sensor system exhibits accuracy and simplicity with conveniences and low cost maintenance. It is expected that the system can eventually help promote the addition of recycled plastics, so that the waste can be reduced.

____________________ ____________________ ____ / ____ / ____

Student’s signature Thesis Advisor’s signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุเนตร พรานนท์สถิตย์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย และอบรมสั่งสอนตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณห้องวิจัยร่วมทางโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์และระบบสมองกลฝังตัว ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ให้ความรู้ในการทำชิ้นงานตัวอย่างพลาสติกเพื่อทดสอบ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และภาควิชาวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับเครื่องทดสอบ และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

พัฒนโชค คุนาพงษ์กิติ

มีนาคม 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	67
ผล	67
วิจารณ์	83
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	89
ภาคผนวก	92
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	116

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกระหว่างเครื่องสเปกโทรมิเตอร์กับการวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด	16
2	ชื่อและลักษณะของตัวอย่างของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง	23
3	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสงกับ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล	51
4	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	84

ตารางผนวกที่

ตารางผนวกที่		หน้า
1	แสดงอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 0.73 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	93
2	แสดงค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 1.46 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	94
3	แสดงค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 2.19 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	96
4	แสดงค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติก2.92 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	97
5	แสดงค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 3.65 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	98
6	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 0.73 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	100
7	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 1.46 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	102
8	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.19 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	103

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
9	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.92 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	105
10	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 3.65 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	106
11	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 0.73 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	108
12	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 1.46 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	109
13	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.19 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	111
14	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.92 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	112
15	แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 3.65 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด	114

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	Tensile strength of recycled HDPE with $CaCO_3$ as filler	4
2	แนวโน้มการเสื่อมคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเมื่อเวลาผ่านไป	5
3	ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกลกับอัตราส่วนผสมพลาสติกบริสุทธิ์	6
4	แสดงค่าทนแรงกระแทกแบบการบากร่องหลังจากการอบพลาสติก	5
5	ผลการทดสอบความทนทางแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง	7
6	พลาสติกเอบีเอสหลังจากการอบ 120 องศาเซลเซียส ด้านซ้ายสุดอบที่ 168 ชั่วโมง ส่วนด้านขวาสุดไม่ผ่านการอบ	8
7	พฤติกรรมของแสงที่กระทำกับตัวอย่างพลาสติก	10
8	ค่าสเปกตรัมช่วง 350-2500 nm ของตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ	11
9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละการส่งผ่านแสงกับจำนวนรอบที่ผ่านเครื่องอัดรีด	12
10	ค่าการวัดด้วยอินฟราเรด เทียบกับค่าที่วัดได้จากไมโครมิเตอร์	13
11	เปรียบเทียบระบบการทำงานการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกระหว่าง (ก) ระบบการทำงานเครื่องสเปกโทรมิเตอร์และ (ข) ระบบการทำงานที่ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด	14
12	เปรียบเทียบผลของการบ่งชี้ชนิดของพลาสติก PET และ PVC ระหว่าง (ก) ผลของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์และ (ข) ผลของวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด	15
13	กราฟแสดงคุณสมบัติทางแสงอินฟราเรดความยาวคลื่นต่างๆของพลาสติกไม่มีสีที่มีการผสมพลาสติกรีไซเคิลอัตราส่วนต่างๆ	16
14	โครงสร้างโมเลกุลของ acrylonitrile butadiene styrene	20
15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งรีไซเคิลกับความทนทานแรงดึง	21
16	ตัวอย่างชิ้นงานหลังการผสมพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์	21
17	ตัวอย่างชิ้นงาน(ก) รูปทรงขั้นบันได (ข) พลาสติกตัวอย่างที่จะนำไปทดลองทางแสง	22
18	ลักษณะชิ้นงานดัมเบล	22
19	เครื่อง Universal testing machine ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงดึง	25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล	26
21	เครื่อง Pendulum impact tester ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงกระแทก	27
22	ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบ	27
23	แสดงอัตราส่วนพลาสติกรีไซเคิลต่อความทนทานแรงกระแทก	28
24	เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	29
25	การวางตัวอย่างในเครื่องสเปกโทรมิเตอร์	30
26	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 0.73 มิลลิเมตร	30
27	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 1.46 มิลลิเมตร	31
28	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 2.19 มิลลิเมตร	31
29	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 2.92 มิลลิเมตร	32
30	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 3.65 มิลลิเมตร	32
31	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 0.73 มิลลิเมตร	33
32	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 1.46 มิลลิเมตร	33
33	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 2.19 มิลลิเมตร	34
34	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 2.92 มิลลิเมตร	34

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	แสดงค่าความยาวคลื่นแสงการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 3.65 มิลลิเมตร	35
36	ระบบการทำงานของเซนเซอร์	36
37	แสดงการวางตำแหน่งของเลเซอร์ไดโอดกับโฟโตไดโอด	37
38	การบานออกของลำแสงเลเซอร์กับความเข้มแสงที่โฟโตไดโอดตรวจวัดได้	37
39	การคำนวณระยะห่างที่ทำให้โฟโตไดโอดสามารถตรวจวัดแสงได้ทั้งหมด	38
40	ระยะห่างในการติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง	38
41	การต่อเลเซอร์ไดโอดกับวงจรรวมควบคุมกระแส	39
42	การต่อโฟโตไดโอดในโหมด Photoconductive	41
43	ชุดตรวจวัดสี ZX-color	42
44	ตำแหน่งการวางพลาสติกตัวอย่างกับตัววัดสี	42
45	ไมโครมิเตอร์ MW200 DL ของบริษัท Moore & Wright	43
46	การวางไมโครมิเตอร์ลงในแท่นรองที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร	43
47	บอร์ด Friendly arm รุ่น Mini 2440	44
48	บอร์ด ETT Atmega128	44
49	วงจรขยายด้วยออปแอมป์ LM358	45
50	ภาพรวมการทำงานของฮาร์ดแวร์ทั้งหมด	46
51	ฮาร์ดแวร์ที่เสร็จสมบูรณ์	46
52	ตำแหน่งการวางเซนเซอร์วัดสี วัดความหนา เลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด	47
53	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดไม่มีสี ที่ความหนาต่างๆ	48
54	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีน้ำเงินที่ความหนาต่างๆ	48
55	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีแดง ที่ความหนาต่างๆ	49

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

ภาพที่		หน้า
56	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีเหลือง ที่ความหนาต่างๆ	49
57	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีเขียว ที่ความหนาต่างๆ	50
58	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีม่วงที่ความหนาต่างๆ	50
59	แผนภาพของการปรับค่าจากการวัดความหนา และวัดค่าจากเซ็นเซอร์สี	59
60	แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีเหลือง	60
61	แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีน้ำเงิน	61
62	แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีเหลือง	62
63	แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีม่วง	63
64	แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีเขียว	64
65	แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกชนิดไม่มีสี	65
66	การคำนวณค่าทนแรงดึง และทนแรงกระแทก	66
67	หน้าจอของโปรแกรม	66
68	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร	67
69	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 1.46 มิลลิเมตร	68
70	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงาน หนา 2.19 มิลลิเมตร	69
71	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.92 มิลลิเมตร	70
72	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 3.65 มิลลิเมตร	71

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

73 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร 73

74 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 1.46 มิลลิเมตร 74

75 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.19 มิลลิเมตร 75

76 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.92 มิลลิเมตร 76

77 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 3.65 มิลลิเมตร 77

78 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร 78

79 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 1.46 มิลลิเมตร 79

80 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.19 มิลลิเมตร 80

81 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.92 มิลลิเมตร 81

82 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 3.65 มิลลิเมตร 82

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจวัดคุณสมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิลชนิดเอบีเอสแบบไม่ทำลาย

Nondestructive Machanical Property Testing of Recycled ABS Plastic

คำนำ

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมในการผลิตสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆมากมาย เช่น ถุงพลาสติก ขวดน้ำดื่ม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ฯลฯ ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น

สำหรับประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก เพื่อส่งออก นำรายได้เข้าสู่ประเทศมากกว่า 150,000 ล้านบาทต่อปี ซึ่งนับได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออก 1 ใน 10 อันดับของประเทศ จากความนิยมในการใช้พลาสติกที่มากขึ้น ทำให้ส่งผลต่อการเกิดปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและกลายเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นกระบวนการนำมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งในการช่วยลดปริมาณขยะ นอกจากจะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมแล้วยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมหาศาลเนื่องจากพลาสติกรีไซเคิลมีราคาถูกกว่าพลาสติกบริสุทธิ์

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้เทคนิคทางแสงซึ่งวิธีการสเปกโทร-สโคปี ย่านใกล้อินฟราเรด เป็นเทคนิคหนึ่งในการบ่งชี้ชนิดและปริมาณของสสารจากการพิจารณาสเปกตรัมการส่งผ่านหรือดูดกลืนแสง โดยไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงานทดสอบ อย่างไรก็ตามเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ (Spectrometer) ที่ใช้ทดสอบนั้นมีราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งขอบเขตของงานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบพลาสติกเอบีเอส เพียงชนิดเดียวดังนั้นค่าสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบจึงคล้ายคลึงกัน ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องสแกนช่วงความยาวคลื่นกว้าง แต่สามารถเจาะจงเลือกเฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อตรวจวัดความแตกต่างของพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล โดยประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยวและโฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจวัดแสงแทนการใช้เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ และพัฒนาเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกลบางประการได้แก่ความทนแรงดึง (Tensile strength) และความทนแรงกระแทก (Impact strength) ได้จากการหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับค่าการส่งผ่านแสงโดยเซนเซอร์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ใช้พลังงานน้อย และยังบำรุงรักษาได้ง่าย และงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มวิธีการวัดความหนา และสี ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบโดยตรงต่อเทคนิคการวัดด้วยวิธีทางแสง วิธีการวัดได้เพิ่มเซนเซอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ความแม่นยำและสะดวกในการตรวจสอบเพิ่มอีกด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

โดยทั่วไปพลาสติกรีไซเคิลมีคุณสมบัติด้อยกว่าพลาสติกบริสุทธิ์ จึงต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติ แต่ในปัจจุบันการจะตรวจสอบส่วนผสมรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยังต้องใช้การทดสอบแบบทำลายชิ้นงานเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกลตามมาตรฐาน จึงเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกรีไซเคิลยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก

ปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือตรวจวัดอัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่รวดเร็วและไม่ทำลายชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพ (สมบัติทางกายภาพและทางกล) ให้ได้ตามมาตรฐาน จากข้อจำกัดของการใช้พลาสติก รีไซเคิลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการคิดค้นวิธีการตรวจวัดอัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์และตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถตรวจวัดได้ทันทีโดยไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงานด้วยวิธีทางแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

โดยสามารถแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. เพื่อสร้างวิธีการตรวจวัดอัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์จากผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยวิธีสเปกโทรสโคปี
2. เพื่อประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีราคาที่ถูก ขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย บำรุงรักษาง่ายและมีความยืดหยุ่นกับขนาดและรูปร่างของชิ้นงานที่ทดสอบ แทนเครื่องสเปกโทรมิเตอร์
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวัดอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์จากผลิตภัณฑ์พลาสติกระหว่างวิธีการใช้เลเซอร์ไดโอดกับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ของสีพลาสติกและความหนาที่มีผลต่อวิธีสเปกโทรสโคปี
5. เพื่อเสนอผลที่ได้เป็นทางเลือกในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลในโรงงานอุตสาหกรรม

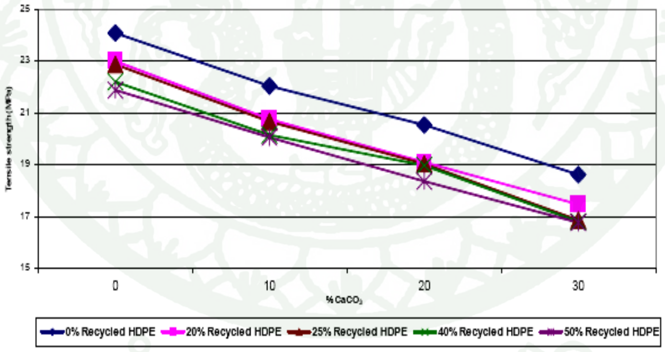
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. สมบัติเชิงกลของพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล

การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก คือการตรวจวัดสมบัติในการรับภาระหรือแรงกระทำในลักษณะต่างๆในเชิงปริมาณ เพื่อบ่งบอกคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้นเช่น เพื่อยืนยันถึงความปลอดภัยในการใช้งาน เพื่อการควบคุมคุณภาพ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิต ดังนั้นสมบัติทางกลจึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้พลาสติกในการผลิตผลิตภัณฑ์ใดก็ตาม ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นย่อมต้องมีการรับแรงกระทำไม่มากก็น้อย (จินตมัย, 2547)

สินีนาถ และคณะ (2549: 324-311) ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลแบบค่าทนแรงดึง (Tensile Strength) ของพลาสติกชนิด High Density Polyethylene (HDPE) ที่ผสมพลาสติกรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 25, 40 และ 50 ปรากฏว่าค่าความเค้นดึงของพลาสติกชนิด HDPE จะลดลงตามอัตราส่วนที่ผสมพลาสติกรีไซเคิล ดังแสดงในภาพที่ 1



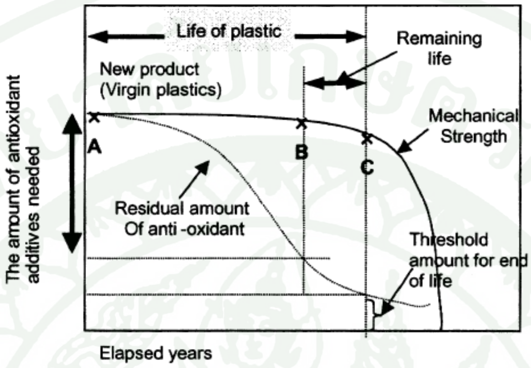
ภาพที่ 1 Tensile strength of recycled HDPE with $CaCO_3$ as filler

ที่มา: สินีนาถ และคณะ (2549: 324-311)

ผลิตภัณฑ์พลาสติกแต่ละชนิดจะมีมาตรฐานของสมบัติทางกลแตกต่างกันตามประเภทการใช้งาน และเมื่อระยะเวลาการใช้งานผ่านไปอาจมีการเสื่อมคุณภาพจากปัจจัยหลายประการทั้งทางกลและทางเคมีเช่น ความร้อน รังสียูวี และลักษณะการใช้งาน ทำให้สมบัติทางกลมีแนวโน้มเลวลง ดังแสดงในภาพที่ 2 (Kawaguchi *et al.*, 2005: 134) ดังนั้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์พลาสติกดังกล่าวมาหลอมใช้ใหม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ย่อมได้พลาสติกรีไซเคิลที่มีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ขั้นตอนการบดขยะพลาสติกเพื่อให้มีขนาดเล็กลงในกระบวนการรีไซเคิลนั้น แรงเฉือนเชิงกลในเครื่องบดจะไปทำลายโซ่ของโพลิเมอร์ให้แตกออก ทำให้ความยาวและน้ำหนักโมเลกุลลดลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2547)

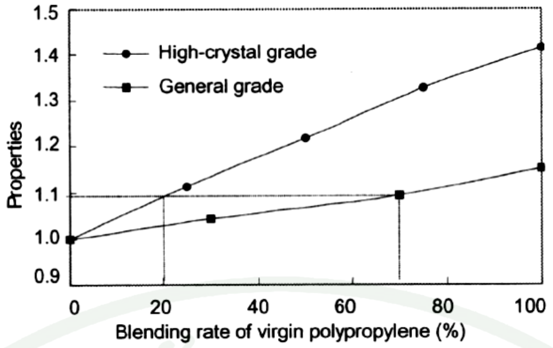


ภาพที่ 2 แนวโน้มการเสื่อมคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเมื่อเวลาผ่านไป

ที่มา: Kawaguchi *et al*. (2005: 134)

เนื่องจากการเสื่อมคุณภาพและความไม่แน่นอนของสมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิลทำให้การใช้งานส่วนใหญ่มักจะนำพลาสติกบริสุทธิ์มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้ Kawaguchi *et al.* (2005: 136) ได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพของพลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพีลีนด้วยการนำพลาสติกบริสุทธิ์มาผสม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลโดยรวมกับอัตราส่วนผสมพลาสติกบริสุทธิ์มีลักษณะแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้น โดยคุณสมบัติที่ดีขึ้นจะขึ้นกับคุณภาพของชนิดพลาสติกบริสุทธิ์ที่นำมาผสมดังแสดงในภาพที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกลกับอัตราส่วนผสมพลาสติกบริสุทธิ์

ที่มา: Kawaguchi *et al*. (2005: 136)

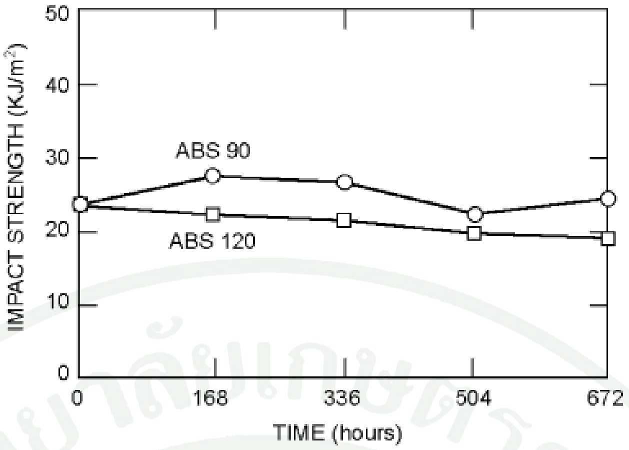
2. ศึกษาการเสื่อมคุณภาพของพลาสติก ABS ในกระบวนการอัดขึ้นรูปซ้ำ

A.Boldizar และ K.Moller (2003) ได้ทดลองวัดคุณภาพพลาสติกชนิด เอบีเอส (ABS) โดยควบคุมกระบวนการอัดขึ้นรูป เวลาที่อยู่ในอากาศ และอยู่ที่อุณหภูมิสูง เพื่อวิเคราะห์ค่ายืดตัวหลังการแตกหัก โดยใช้มาตรฐาน ISO 527-5A สรุปได้ว่าค่าการยืดตัวหลังการแตกหักจะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนครั้งการอัดขึ้นรูปโดยควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ให้เท่ากันทุกครั้งการขึ้นรูป

3. ศึกษาการเสื่อมคุณภาพของพลาสติกเอบีเอสเนื่องจากความร้อน

B.E Tiganis *et al*.(2002) ได้ปรับอุณหภูมิที่ต่างๆกันเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าทนทานแรงกระแทกของพลาสติกเอบีเอสกับความร้อนอุณหภูมิต่างๆและที่ระยะเวลาต่างๆกัน โดยการทดสอบค่าทนทานแรงกระแทกโดยใช้เครื่อง Radmana impact tester ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน AS 1146.1 จากภาพที่ 4 การทดสอบแบบบากร่องพลาสติก แสดงให้เห็นว่าค่าทนทานแรงกระแทกจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อพลาสติกได้รับความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส จะเห็นชัดเจนหลังจากเวลาผ่านไป 168 ชั่วโมงหรือ 7 วัน แต่ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะยังไม่เห็นผลมากนัก

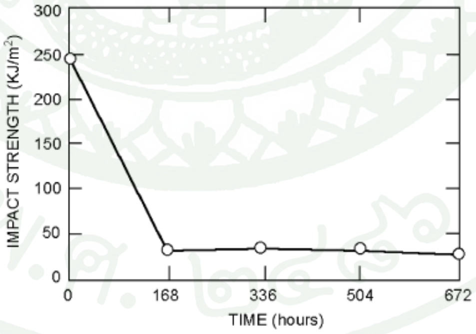
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 แสดงค่าทนแรงกระแทกแบบการบากร่องหลังจากการอบพลาสติก

ที่มา : Tiganis *et al.* (2002)

นอกจากนี้ในภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าทนแรงกระแทกในการอบพลาสติกที่ 120 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 672 ชั่วโมง หรือ 28 วัน แต่จะเห็นได้ว่ามีค่าทนแรงกระแทกลดลงอย่างรวดเร็วที่จุดเริ่มต้นจนถึง 168 ชั่วโมงหรือ 7 วัน หลังจากนั้นค่าเริ่มที่จะคงที่

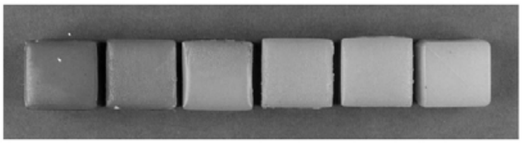


ภาพที่ 5 ผลการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไม่บากร่อง

ที่มา : Tiganis *et al.* (2002)

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นถึงสีที่เปลี่ยนไปจากสีดั้งเดิมที่ไม่ได้ผ่านการอบพลาสติก ไล่จนมาถึงพลาสติกที่ผ่านการอบเวลาต่างๆจนถึง 168 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 พลาสติกเอบีเอสหลังจากการอบ 120 องศาเซลเซียส ด้านซ้ายสุดผ่านการอบที่ 168 ชั่วโมง ส่วนด้านขวาสุดไม่ผ่านการอบ

ที่มา : Tiganis *et al.* (2002)

4. ผลตอบสนองของการเสียรูปและสร้างแบบจำลองของพลาสติกชนิดพีซี และเอบีเอส ภายใต้แรงดึงและแรงกระแทก

Yin and Wang (2010) ได้ศึกษาผลจากการเปลี่ยนรูปของพลาสติกชนิดพีซี เอบีเอส และพีซีผสมเอบีเอสที่ส่วนผสมต่างๆ โดยศึกษาค่าอัตราความเครียดเป็นสำคัญ

จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความทนทานทางวัสดุ (SHTB) โดยผลจากค่าความเค้น และค่าความเครียด เมื่อทำการศึกษาจะได้ผลว่าเมื่อพลาสติกผสมระหว่าง เอบีเอสและพีซี ที่ส่วนผสมมีพลาสติกเอบีเอสมากขึ้น จะทำให้ค่าต่างๆซึ่งบ่งบอกความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย

5. เทคนิค near infrared spectroscopy กับการตรวจวัดตัวอย่างพลาสติก

วิธีการพิสูจน์โครงสร้างสสารมีหลากหลายวิธี โดยวิธี Near infrared spectroscopy เป็นวิธีหนึ่ง โดยการยิงลำแสงอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่นประมาณ 800-2500 nm (Inada *et al*., 2001: 133) ไปยังตัวอย่างจากนั้นทำการตรวจวัดอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงที่สามารถส่งผ่านกับความเข้มแสงเริ่มต้น จะได้เป็นอัตราการส่งผ่านแสง (*T*) ดังสมการที่ 1 เมื่อนำค่าการส่งผ่านแสงของแต่ละความยาวคลื่นมาแสดงภายในกราฟเดียวกันจะได้เป็นค่าสเปกตรัมของสสารนั้น (นิพนธ์ และ คณิตา, 2547)

$$T = \frac{I_t}{I_0} \qquad (1)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ T = อัตราการส่งผ่านแสง

I_0 = ความเข้มแสงเริ่มต้น

I_t = ความเข้มแสงส่งผ่าน

แต่ละสสารจะมีความแตกต่างของค่าสเปกตรัมตามกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์และ แลมเบิร์ต โดยกฎของเบียร์กล่าวว่า เมื่อลำแสงความยาวคลื่นเดี่ยวผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวแล้ว สัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น และกฎของแลมเบิร์ตกล่าวไว้ว่า เมื่อลำแสงความยาวคลื่นเดี่ยวผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวแล้ว สัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะไม่ขึ้นกับความเข้มแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกัน แล้วนำมาหาความสัมพันธ์กัน สรุปได้ว่าปริมาณความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นกับความเข้มข้นและความหนาของตัวอย่าง โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 และสามารถเขียนสมการในรูปความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มแสงเมื่อตัวกลางที่ทดสอบเป็นตัวกลางเนื้อเดียวที่ไม่ก่อให้เกิดการกระเจิงได้ดังสมการที่ 3 (วิชัย และคณะ, 2526)

$$A = \varepsilon dc \tag{2}$$

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I_T}\right) \tag{3}$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง

ε = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d = ความหนาของตัวอย่าง

c = ความเข้มข้นของสาร

I_T = ความเข้มแสงส่งผ่าน สำหรับตัวกลางที่ไม่ก่อให้เกิดการกระเจิง

โดยทั่วไปตัวอย่างพลาสติกมักเป็นตัวกลางแบบกระเจิงแสง แสงที่กระทำกับตัวอย่างจะมีพฤติกรรมส่งผ่าน, ดูดกลืน, สะท้อน และกระเจิง ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวจะเป็นไปดังสมการที่ 4 (Inada *et al*., 2001: 139-142)

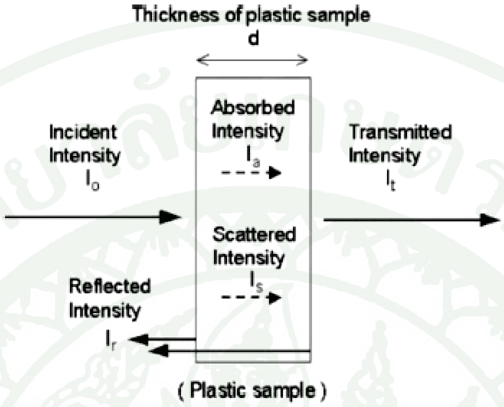
$$I_0 = I_t + I_a + I_r + I_s \tag{4}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ I_a = ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืน

I_r = ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับ

I_s = ความเข้มแสงที่เกิดการกระเจิง



ภาพที่ 7 พฤติกรรมของแสงที่กระทำกับตัวอย่างพลาสติก

ที่มา: Inada *et al.* (2001: 139-142)

เมื่อเทียบความสัมพันธ์กับตัวอย่างที่ไม่กระเจิงแสงและกำหนดให้อัตราการสะท้อนแสง (R) และอัตราการกระเจิงแสง (S) เป็นไปตามสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จะพบว่าค่าการส่งผ่านแสงของพลาสติกที่ทดสอบด้วยระบบวัดอัตราการส่งผ่านแสงจะเป็นไปตามสมการที่ 7 (Inada *et al*., 2001: 139-142) ตัวอย่างค่าสเปกตรัมของพลาสติกชนิดต่างๆที่ทดสอบด้วยเครื่องสเปกโทรมิเตอร์แสดงดังภาพที่ 8 (Inada *et al*., 2001: 133-134)

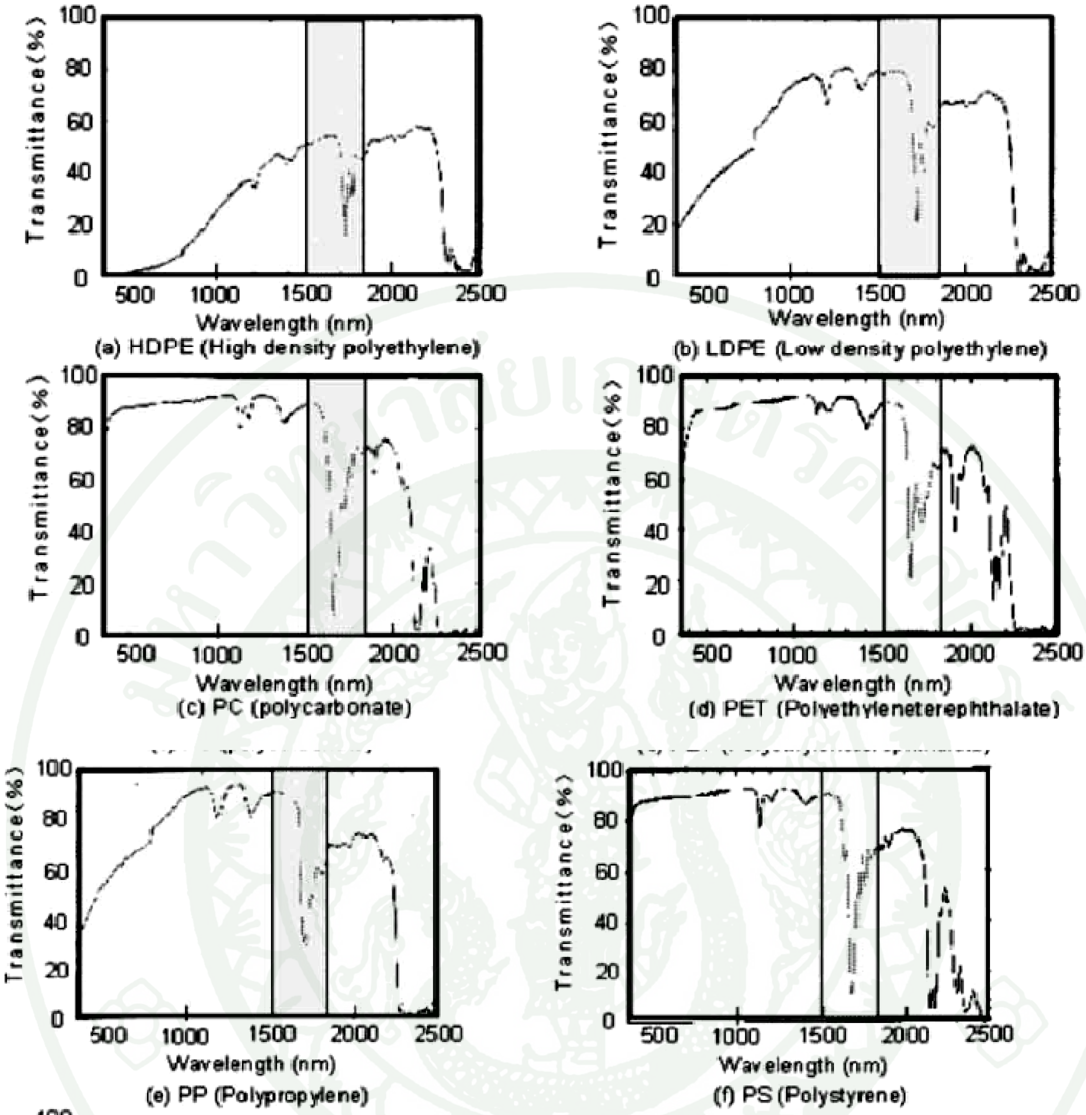
$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (5)$$

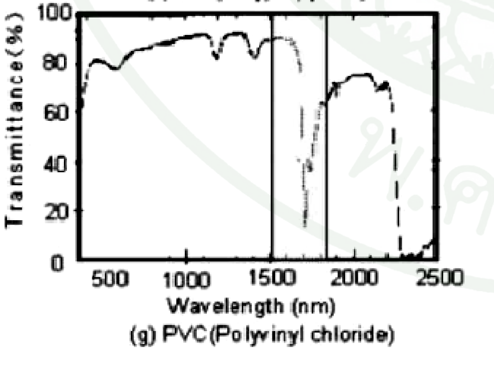
$$S = \frac{I_s}{I_0} \quad (6)$$

$$T = e^{-\varepsilon dc} - (R + S) \quad (7)$$

เมื่อ R = อัตราการสะท้อนแสง และ S = อัตราการกระเจิงแสง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





	material	thickness(mm)	color
(a)	HDPE	0.85	white
(b)	LDPE	1	semitransparent
(c)	PC	2.8	transparent
(d)	PET	2	transparent
(e)	PP	1.4	semitransparent
(f)	PS	2	transparent
(g)	PVC	2	transparent

(h) Sample

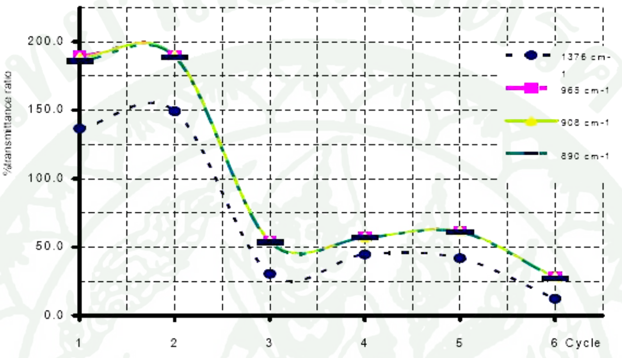
ภาพที่ 8 ค่าสเปกตรัมช่วง 350-2500 nm ของตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ

ที่มา: Inada *et al.* (2001: 133-134)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งของการรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสง

ฐิติยา และคณะ (2547) ได้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งของการรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสง (Transmittance) ปรากฏว่าค่าการส่งผ่านแสงจะลดลงเมื่อจำนวนครั้งของการรีไซเคิลพลาสติกชนิดฟิล์มโพลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้นตั้งแต่รอบที่สามเป็นต้นไป ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละการส่งผ่านแสงกับจำนวนรอบที่ผ่านเครื่องอัดรีดของฟิล์มโพลิเอทธิลีนใหม่และที่ผ่านกระบวนการอัดรีด 1 ถึง 6 ครั้ง

ที่มา: ฐิติยา และคณะ (2547)

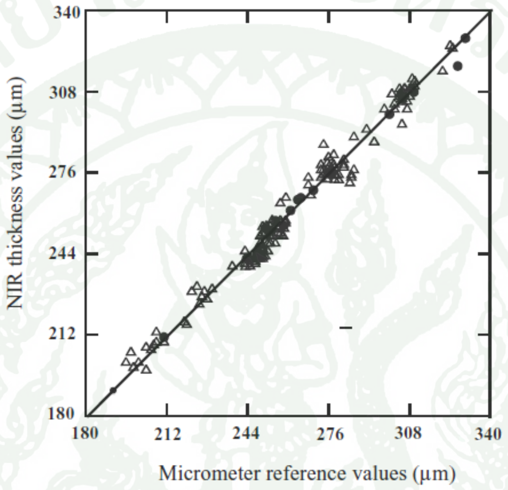
7. การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้อินฟราเรดตรวจสอบกาวที่อยู่ระหว่างแผ่นพลาสติก

Legrand *et al.* (2002) ได้สร้างวิธีการที่จะตรวจสอบปริมาณกาวที่อยู่ระหว่างแผ่นพลาสติกโดยใช้วิธีการตรวจสอบด้วยกล้องอินฟราเรด ผลจากการทดสอบเมื่อได้ภาพจากกล้องอินฟราเรดสามารถระบุปริมาณกาวได้ โดยใช้วิธีนับเป็นจำนวนพิกเซลจากภาพ จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณกาวที่อยู่ระหว่างชั้นพลาสติกได้ โดยไม่สุ่มทำลายชิ้นงานและสามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งขั้นต่อไปที่จะพัฒนาคือระบบการนับจำนวนกาวโดยใช้ อัลกอริทึมของการวัดจำนวนจุดสี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. ศึกษาและทดลองใช้รังสีอินฟราเรดในการวัดความหนาของพลาสติกแผ่น

Laasonen *et al*. (2003) ได้หาวิธีการวัดความหนาของพลาสติกโดยเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของรังสีอินฟราเรดเทียบกับการวัดจากไมโครมิเตอร์โดยใช้คลื่นความยาวที่มี wave number 4000 ถึง 400 cm^{-1} โดยพลาสติกที่ใช้ทดสอบจะมีพื้นฐานส่วนประกอบเป็น PVC โดยในภาพที่ 10จะเป็นการเทียบความแม่นยำของการวัดด้วยอินฟราเรดนี้กับวิธีวัดด้วยไมโครมิเตอร์



ภาพที่ 10 ค่าการวัดด้วยอินฟราเรด เทียบกับค่าที่วัดได้จากไมโครมิเตอร์

ที่มา: Laasonen *et al.* (2003)

สรุปได้ว่า วิธีการวัดโดยใช้อินฟราเรดมีความแม่นยำค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการวัดโดยใช้ไมโครมิเตอร์ ดังนั้นสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัตถุดิบในบรรจุภัณฑ์ได้

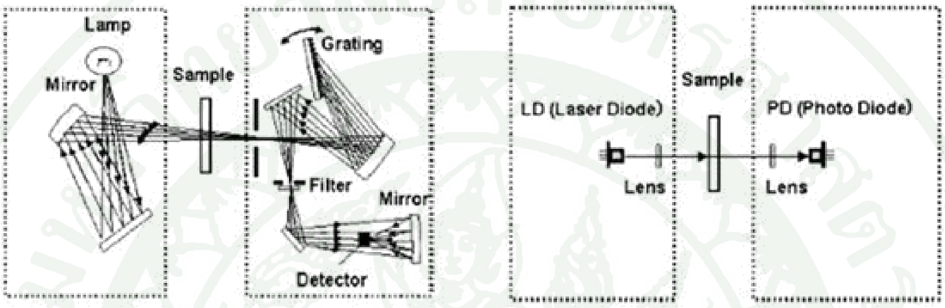
9. การใช้วิธีการเสปกโทรสโคปี ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลง ผลึกอสัณฐานในยา และการกระจายตัวของของแข็งในแคปซูล SCH 48461

Markovich *et al*. (1997) ได้ศึกษาการละลายและกระจายของของแข็งตัวในยาแคปซูล โดยใช้เทคนิค total reflectance infrared (ATR-IR) micro spectroscopy ผลของการศึกษานี้ สามารถชี้วัดได้ว่า วิธีการ ATR-IR micro spectroscopic สามารถบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสารภายในแคปซูลได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10. การใช้เลเซอร์ไดโอดแทนเครื่องสเปกโทรมิเตอร์

Inada *et al.* (2001) ได้ทดลองใช้เลเซอร์ไดโอดในการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกเปรียบเทียบกับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ โดยเปรียบเทียบระบบการทำงานดังภาพที่ 11 จะเห็นว่าระบบการทำงานที่ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดมีความซับซ้อนน้อยกว่า เครื่องสเปกโทรมิเตอร์



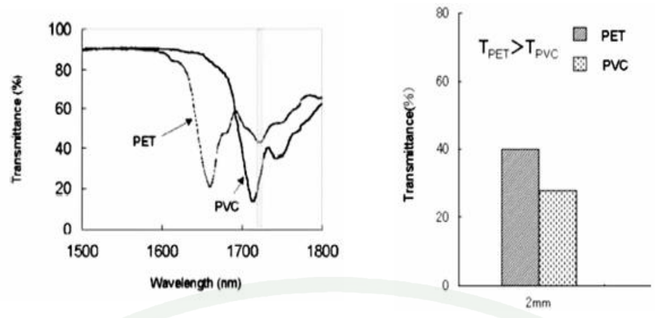
(ก) (ข)

ภาพที่ 11 เปรียบเทียบระบบการทำงานการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกระหว่าง (ก) ระบบการทำงานเครื่องสเปกโทรมิเตอร์และ (ข) ระบบการทำงานที่ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด

ที่มา: Inada *et al.* (2001)

Inada *et al.* ได้ทดลองบ่งชี้พลาสติกชนิด Polyethylene Terephthalate (PET) และ Polyvinyl Chloride (PVC) จากค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่แตกต่างกันของพลาสติกชนิด PET และ PVC ด้วยเครื่องสเปกโทรมิเตอร์และวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด ได้ว่าวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดสามารถบ่งชี้ชนิดของพลาสติกได้เช่นเดียวกับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ดังภาพที่ 12

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) (ข)

ภาพที่ 12 เปรียบเทียบผลของการบ่งชี้ชนิดของพลาสติก PET และ PVC ระหว่าง (ก) ผลของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์และ (ข) ผลของวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด

ที่มา: Inada *et al.* (2001)

ทั้งนี้ Inada *et al.* ได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกระหว่างเครื่องสเปกโทรมิเตอร์กับวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดในตารางที่ 1 สรุปได้ว่าวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดมีข้อดีที่ราคาถูก ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่ต้องบำรุงรักษา อายุการใช้งานยาวนาน ตอบสนองรวดเร็ว กินไฟน้อย แต่ก็มีข้อเสียด้านความแม่นยำ (Identification accuracy) และรายละเอียดในการวิเคราะห์เมื่อเทียบเครื่องสเปกโทรมิเตอร์

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกระหว่างเครื่องสเปกโทรมิเตอร์กับการวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด

Method	(a) Near-infrared spectrometer	(b) LD absorption	(a)/(b) Ratio
Price ($)	42000-84000	4200	1/10-1/20
Size (mm^3)	400×300×200-1000×1000×500	50×100×100	1/40-1/1000
Weight (kg)	15	0.5	1/30
Maintenance	Required	Free	∞
Lifetime of light source (h)	~ 3000 (incandescent lamp)	~100000 (laser diode)	33
Response speed (ms)	1	0.05	1/20
Dissipation power (W)	200	5	1/40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

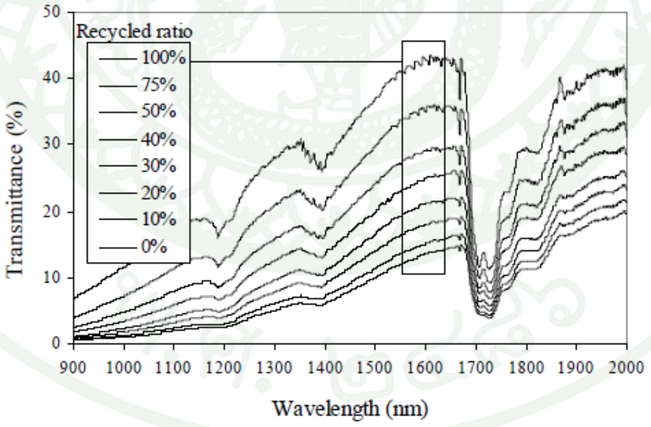
ตารางที่ 1 (ต่อ)

Method	(a) Near-infrared spectrometer	(b) LD absorption	(a)/(b) Ratio
Identification accuracy	Good	Medium	-
Analysis	Detail	Simple	-

ที่มา: Inada *et al.* (2001)

11. การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสติกรีไซเคิล

Wasasiri *et al.* (2009) ได้ใช้วิธีการเสปกโทรสโคปี ที่ความถี่ของแสงอินฟราเรดย่านต่างๆ เพื่อที่จะทดสอบความแตกต่างของพลาสติกที่มีส่วนผสมรีไซเคิลที่ต่างๆกัน และมีสีต่างๆกัน เพื่อนำไปเทียบกับคุณสมบัติทางกล โดยวิธีนี้จะไม่ทำลายชิ้นงานในการทดสอบ โดยได้ทดสอบคุณสมบัติในการดูดกลืนอินฟราเรดย่านต่างๆของพลาสติกดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กราฟแสดงคุณสมบัติทางแสงอินฟราเรดความยาวคลื่นต่างๆของพลาสติกไม่มีสีที่มีการผสมพลาสติกรีไซเคิลอัตราส่วนต่างๆ

ที่มา : Wasasiri *et al.* (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลของการใช้วิธีนี้ในการทดสอบคุณบัติทางแสงเทียบกับทางกล จะมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีความแม่นยำในเกณฑ์ดี แต่การทดลองยังมีข้อจำกัดเรื่องสี และความหนาของพลาสติกที่จะต้องเป็นไปตามที่ได้กำหนดขั้นแรกเท่านั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์ในการทำตัวอย่างพลาสติก
   1.1 เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดเอบีเอส
   1.2 สีผสมพลาสติกชนิดผงได้แก่ สีแดง, สีน้ำเงิน และสีเหลือง
   1.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก
   1.4 แม่พิมพ์พลาสติก
   1.5 เครื่องฉีดพลาสติก
2. เครื่องทดสอบค่าความทนแรงดึง
3. เครื่องทดสอบค่าความทนแรงกระแทก
4. เครื่องสเปกโทรมิเตอร์
5. อุปกรณ์ในการประดิษฐ์เซนเซอร์
   5.1 เลเซอร์ไดโอด
   5.2 โฟโตไดโอด
   5.3 เซนเซอร์วัดสี
   5.4 ไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล
   5.5 วงจรส่วนขับเลเซอร์
   5.6 วงจรส่วนรับสัญญาณ
   5.7 วงจรส่วนประมวลผลและแสดงผล
   5.8 ไมโครคอนโทลเลอร์
   5.9 เครื่องโปรแกรมไมโครคอนโทลเลอร์
   5.10 มัลติมิเตอร์
   5.11 ออสซิลโลสโคป
   5.12 คอมพิวเตอร์
   5.13 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. ขั้นตอนการวิจัย

1.1 ศึกษาคุณสมบัติของพลาสติกชนิดเอบีเอส

1.2 ออกแบบขนาดและสีของพลาสติกที่จะใช้ทดลอง

1.3 เตรียมพลาสติกรีไซเคิลโดยการนำพลาสติกบริสุทธิ์มาผ่านการรีไซเคิล

1.4 จัดทำพลาสติกตัวอย่าง

1.5 ทดสอบค่าสมบัติทางกลบางประการได้แก่ค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น

1.6 ทดลองใช้สเปกโทรมิเตอร์วัดค่าสเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น

1.7 นำผลการทดสอบจากสเปกโทรมิเตอร์มาวิเคราะห์เพื่อออกแบบเซนเซอร์

1.8 จัดสร้างเครื่องมือเซนเซอร์ด้วยเลเซอร์ไดโอด เซนเซอร์สี และเครื่องวัดความหนา

1.9 นำผลการทดสอบค่าการส่งผ่านแสงจากเซนเซอร์มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกลบางประการที่ได้ทำการทดสอบ

1.10 นำความสัมพันธ์ที่ได้มาพัฒนาโปรแกรมและอุปกรณ์ต้นแบบในการทดสอบ

1.11 สรุปผล

2. ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

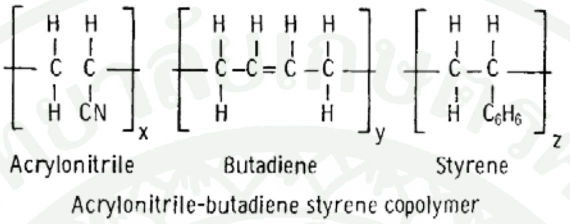
2.1 พลาสติกที่ใช้ในการทดลอง ชนิดเอบีเอส

2.1.1 พลาสติกบริสุทธิ์ชนิดเอบีเอส

พลาสติกเอบีเอส หรือชื่อเต็มว่า Acrylonitrile butadiene styrene เป็นพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์จาก acrylonitrile, butadiene และ styrene โดยมีสูตรทางเคมีดังรูปที่ 14 พลาสติกชนิดนี้มีข้อดีคือ ทนความร้อนได้สูง มีความแข็งแรงสูง และทนการกร่อนจากสารเคมี (Charles A. Harper *et al.,* 2003:39-40)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พลาสติกชนิดเอบีเอสที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดคือชนิด MH-1 โดยที่งานวิจัยนี้ได้ใช้เมล็ดพลาสติกที่ผลิตจากบริษัท IRPC Public Company Limited ซึ่งมีมาตรฐานในการผลิตเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้พลาสติกเอบีเอสในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนตร์ เช่นทำกันชนและแผ่นรองต่างๆ



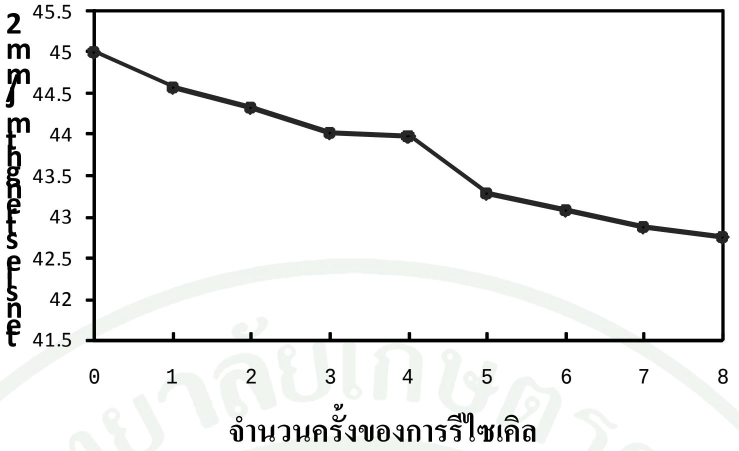
ภาพที่ 14 โครงสร้างโมเลกุลของ acrylonitrile butadiene styrene

ที่มา: Harper *et al.,*(2003:10-11)

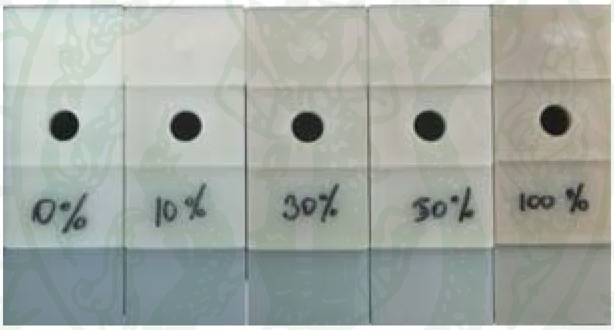
2.1.2 พลาสติกรีไซเคิลชนิดเอบีเอส

ในการจัดหาพลาสติกรีไซเคิลที่นำมาทดลองจะขาดความแน่นอนในแง่ของชนิดที่อาจมีการปนเปื้อนของพลาสติกชนิดอื่นๆ และสีที่อาจมีการผสมจากหลายสีที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำพลาสติกชนิดเอบีเอสบริสุทธิ์มาขึ้นรูปเป็นรูปกล่อง และมาบดด้วยเครื่องบดพลาสติกแบบละเอียด เพื่อเป็นการทำรีไซเคิล โดยได้ขึ้นรูปและบดเป็นจำนวน 8 รอบ จึงได้พลาสติกรีไซเคิลที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป เมื่อนำพลาสติกที่รีไซเคิลแต่ละรอบ มาทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความทนแรงดึง จะได้ผลของค่าทนความแรงดึงดังภาพที่ 15 แสดงให้เห็นว่าในการรีไซเคิลซ้ำๆในแต่ละครั้ง ทำให้ค่าทนแรงดึงลดลงแสดงว่ามีการเสื่อมคุณภาพของพลาสติกเพียงพอที่จะนำไปใช้ผสมเป็นพลาสติกรีไซเคิล เมื่อนำพลาสติกรีไซเคิลมาผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์แบบไม่ผสมสีจะเห็นได้ว่าสีเข้มขึ้นเมื่ออัตราผสมพลาสติกรีไซเคิลมากขึ้นดังภาพที่ 16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งรีไซเคิลกับ



ภาพที่ 16 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการผสมพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์

2.2 การออกแบบและจัดทำตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

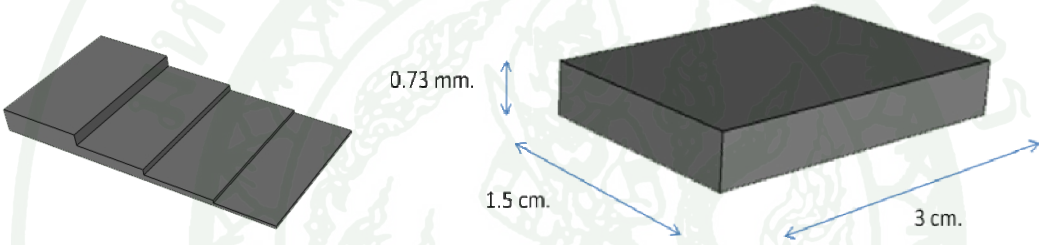
2.2.1 อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล

วิธีการวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมตัวอย่างพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล โดยนำมาผสมกันด้วยวิธีชั่งน้ำหนักโดยเน้นความละเอียดช่วง 0-50% เพราะเป็นช่วงอัตราส่วนผสมที่นิยมใช้ในการใช้งานจริง อัตราส่วนผสมดังกล่าวมี 5 ค่าด้วยกันคือ 0% 10% 30% 50% และ 100%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

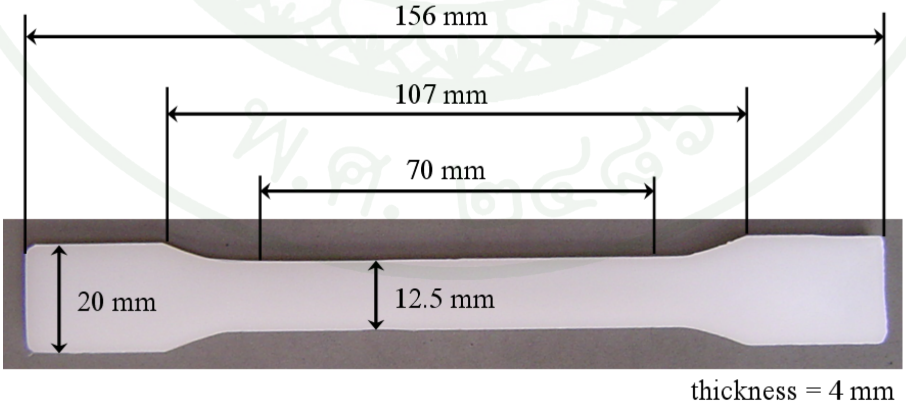
2.2.2 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่าง

การขึ้นรูปตัวอย่างใช้แม่พิมพ์พลาสติกและเครื่องฉีดพลาสติกของแผนกโพลิ-เมอร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตัวอย่างที่ทำขึ้นจัดทำเป็นสองลักษณะคือ แบบขั้นบันไดดังภาพที่ 17 (ก) โดยจะใช้ขั้นที่มีความหนาน้อยที่สุดคือ 0.73 มิลลิเมตร กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร โดยตัดออกมาได้ขนาดดังภาพที่ 17 (ข) และชิ้นงานอีกรูปแบบหนึ่งที่จะนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกลคือเป็นรูปดัมเบลซึ่งเป็นแบบมาตรฐาน ดังภาพที่ 18 โดยการควบคุมเงื่อนไขของการฉีดพลาสติกจะเป็นค่าเดียวกันทั้งหมดเช่น อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ให้พลาสติกแข็งตัวเป็นต้น



(ก)　　　　　　　　　　(ข)

ภาพที่ 17 ตัวอย่างชิ้นงาน (ก) รูปทรงขั้นบันได (ข) พลาสติกตัวอย่างที่จะนำไปทดลองทางแสง



ภาพที่ 18 ลักษณะชิ้นงานดัมเบล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2.3 สีที่ใช้ในการทดลอง

ในงานพลาสติกส่วนใหญ่จะมีสีค่อนข้างหลากหลาย ดังนั้นสีจึงเป็นตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณาด้วย เพราะมีความเป็นไปได้ว่าสีจะมีผลต่อสมบัติทางแสงซึ่งการเลือกสีที่มีจำนวนหลากหลาย อาจทำให้ได้ว่าสีใดมีผลต่อสมบัติทางแสงบ้าง การผสมสีกับพลาสติกจะใช้อัตราส่วนสีอัตรา 1.25 ต่อ 10 ส่วน เช่นพลาสติกหนัก 1 กิโลกรัม จะใช้สีในการผสมปริมาณ 125 กรัม เป็นต้น

สีที่ใช้ในการทดสอบเป็นสีที่สั่งทำจากบริษัท วิกเกอร์ ปิกเม้น จำกัด ซึ่งสีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นสีที่จำกัดปริมาณของสาร Titanium Dioxide White Pigment ให้มีปริมาณ 37.5% เท่ากันในทุกๆสี เพราะความทึบแสงของพลาสติกเป็นปัจจัยหลักในงานวิจัยนี้ และแต่ละสีจะมีส่วนผสมต่างๆที่แตกต่างกันไปแต่ละสี โดยทำตัวอย่างพลาสติกไม่มีสี สีน้ำเงิน สีแดง สีเหลือง สีเขียว สีม่วง โดยจะใช้ชื่อตัวอย่างพลาสติกตามตารางที่ 2 สำหรับตัวอย่างมีสีและอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลต่างๆกันรวม 30 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ชื่อและลักษณะของตัวอย่างของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อตัวอย่าง	สี	อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล (%)
N000	ไม่ผสมสี	0
N010	ไม่ผสมสี	10
N030	ไม่ผสมสี	30
N050	ไม่ผสมสี	50
N100	ไม่ผสมสี	100
B000	น้ำเงิน	0
B010	น้ำเงิน	10
B030	น้ำเงิน	30
B050	น้ำเงิน	50
B100	น้ำเงิน	100
R000	แดง	0
R010	แดง	10
R030	แดง	30

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	สี	อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล (%)
R050	แดง	50
R100	แดง	100
Y000	เหลือง	0
Y010	เหลือง	10
Y030	เหลือง	30
Y050	เหลือง	50
Y100	เหลือง	100
G000	เขียว	0
G010	เขียว	10
G030	เขียว	30
G050	เขียว	50
G100	เขียว	100
P000	ม่วง	0
P010	ม่วง	10
P030	ม่วง	30
P050	ม่วง	50
P100	ม่วง	100

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การทดสอบสมบัติทางกล

คุณสมบัติทางกลเป็นปัจจัยหลักในการบ่งชี้คุณภาพพลาสติกที่จะนำไปใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบคุณสมบัติทางกลบางประการเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของพลาสติกกับอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล โดยรายละเอียดการทดสอบทางกลมีดังต่อไปนี้

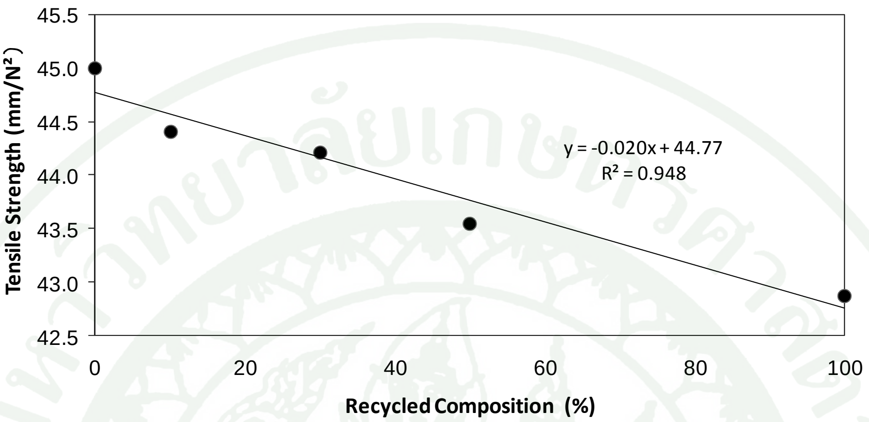
3.1 การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบค่าความทนแรงดึงใช้เครื่อง Universal testing machine ของศูนย์นวัตกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 19 โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงของพลาสติก (อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min) โดยทดสอบกับชิ้นงานตัวอย่างดัมเบล จำนวนสามชิ้นต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าแรงดึงสูงสุดต่อพื้นที่ที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนจะเปลี่ยนรูปร่างจากแบบยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวร (จุด yield point) ในหน่วย N/mm^2

ภาพที่ 19 เครื่อง Universal testing machine ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงดึง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลจากการทดสอบค่าทนแรงดึงชิ้นงานพลาสติกไม่มีสี โดยค่ามีหน่วยเป็น N/mm^2 โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าทนแรงดึงเฉลี่ยกับแต่ละอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลได้ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล

จากข้อมูลที่ได้ เราจะสามารถหาสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างค่าความทนแรงดึง (σ) กับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล (r) ดังสมการที่ 8 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.948

$$\sigma = -0.020r + 44.77 \qquad (8)$$

เมื่อ σ = ค่าความทนแรงดึง (N/mm^2)

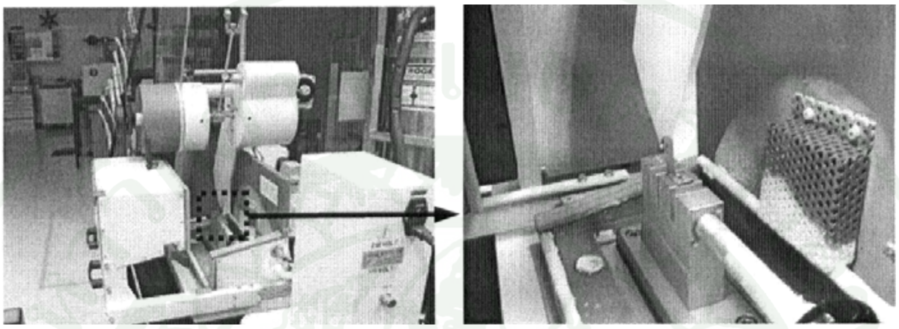
r = อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)

3.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact strength)

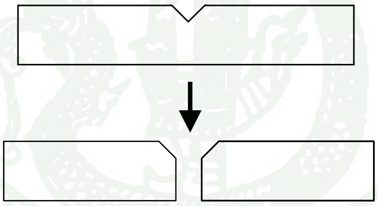
การทดสอบความทนแรงกระแทกในงานวิจัยนี้ทดสอบที่ห้องปฏิบัติการทดสอบ สมบัติทางกล ศูนย์แทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยชิ้นงานที่ใช้คือแบบ Dumbbell โดยตัดด้านหัวท้ายออกให้มีขนาดประมาณ 12.5x64x3.6 mm^3 และบากเป็นรูปตัววีด้วยเครื่องบากรอยตัววี หลังจากทำการบากจะต้องถูกควบคุมอุณหภูมิ -20° C ก่อนการทดสอบและในขณะทำการทดสอบภายในตู้อบที่ถูกทำให้เย็นด้วยไนโตรเจนเหลว จำนวนห้าชิ้นต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล โดย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จะต้องเก็บไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากควบคุมอุณหภูมิ นำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่อง Resil-impactor ยี่ห้อ Creast โดยใช้หัวค้อนเหวี่ยงรุ่น Hammer (astmd256) 1 J องศาค้อน 150 องศา ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 21 ที่ความเร็วหัวทดสอบ 3.45 m/s ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าพลังงานต่อพื้นที่ ที่ทำให้วัสดุแตกหักในหน่วย mJ/mm^2 หลังจากการทดสอบชิ้นงานทั้งหมดมีลักษณะแตกหักเป็นสองส่วน



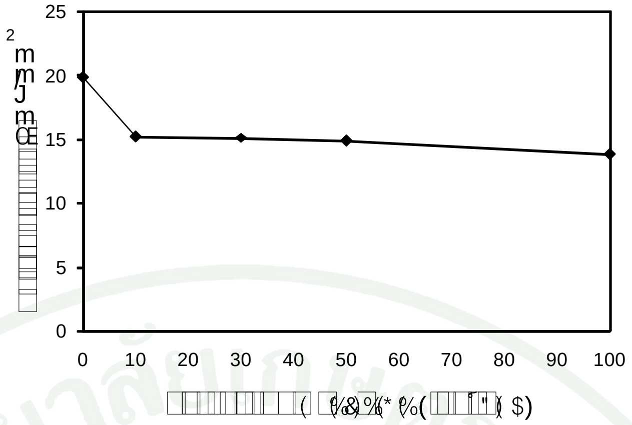
ภาพที่ 21 เครื่อง Pendulum impact tester ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงกระแทก



ภาพที่ 22 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกเฉลี่ยกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างที่ทดสอบแสดงดังภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของพลาสติก รีไซเคิลต่อความทนแรงกระแทกไม่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น จึงได้แบ่งข้อมูลเป็น 2 ช่วง คืออัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล 0 -10 เปอร์เซ็นต์และ 10 – 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในช่วง 0 -10 เปอร์เซ็นต์จะได้สมการที่ 9 และช่วง 10 -100 เปอร์เซ็นต์สมการที่ 10 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 1 และ 0.946 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 แสดงอัตราส่วนพลาสติกรีไซเคิลต่อความทนทานแรงกระแทก

E = -0.461r + 19.83 (9)

E = -0.016r + 15.54 (10)

เมื่อ E = ค่าความทนแรงกระทก (mJ/mm^2)

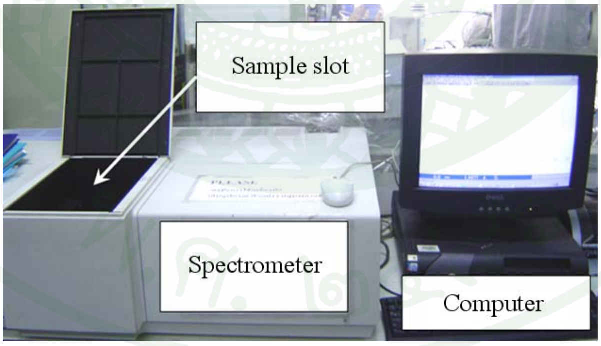
เมื่อพิจารณาผลของการทดสอบค่าความทนแรงดึง (ในที่นี้พิจารณาที่จุดแตกหัก Yield point) ในภาพที่ 20 โดยจะได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลมีมากขึ้น ค่าความทนแรงดึงจะมีน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติกที่โดนอบ หลอม ขึ้นรูป และฉีดในที่อุณหภูมิสูงหลายๆครั้ง จะทำให้มีความเปราะ แตกหักทนต่อแรงดึงได้น้อยลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อพลาสติกที่ขึ้นรูปในครั้งแรกจะมีการเรียงตัวสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ ค่าความเป็นผลึกจะสูง ทำให้ทนต่อแรงดึงได้มาก แต่ถ้ามีการนำชิ้นงานพลาสติกนั้นไปทำการบด เพื่อนำไปหลอมแล้วฉีดขึ้นรูปใหม่ จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกไม่เรียงตัวเป็นระเบียบดังเดิม หรืออาจเรียกได้ว่ามีความเป็นผลึกน้อยลง ทำให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าน้อยลงไปด้วย เช่นเดียวกับการทดสอบความทนแรงกระแทกในภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างค่าทนแรงดึงกับค่าทนแรงกระแทกเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราส่วนพลาสติกรีไซเคิลจึงมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกล

จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทก พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.948 และ 0.947 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความทนแรงดึง 94.48% และ 94.6% สำหรับความทนแรงกระแทก ซึ่งค่า R^2 ของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่าความทนแรงกระแทกมีค่ามากกว่าความทนแรงดึงเพียงเล็กน้อย แต่ยังมีความคลาดเคลื่อนบ้าง ทั้งนี้เป็นเพราะการ

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกค่อนข้างจะมีความไม่แน่นอนเนื่องจากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ขนาดของชิ้นงาน, ความกว้างของรอยบาก (V-notched) และความเร็วของหัวทดสอบเป็นต้น (จินตมัย, 2547) หรืออาจเป็นเพราะจำนวนชิ้นงานที่นำไปทดสอบน้อยเกินไปที่จะระบุความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลพลาสติกที่แน่นอนได้ เช่นเดียวกันกับวิธีการทดสอบค่าทนแรงดึงที่อาจมีความคลาดเคลื่อนได้จากตำแหน่งหัวจับชิ้นงานอาจเลื่อนในขณะทำการทดสอบได้

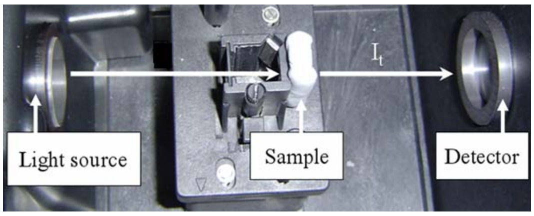
4. การทดสอบค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโทรมิเตอร์

ในขั้นตอนการวิจัยนี้เป็นการนำพลาสติกที่ขึ้นรูปมาวัดค่าสเปกตรัมด้วยเทคนิค Near infrared spectroscopy ซึ่งเป็นการทดสอบค่าการส่งผ่านแสงช่วงความยาวคลื่น 1000-2500 นาโน-เมตร โดยใช้สเปกโทรมิเตอร์ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Lambda900 จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งแสดงผลข้อมูลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 24 ในการวัดจะวางชิ้นงานคั่นระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจวัดแสงในตัว เครื่องดังภาพที่ 25 และตั้งค่าการวัดตั้งแต่ 1000-2500 นาโนเมตร โดยการวัดสองครั้งแรกจะเป็นการวัดแบบไม่มีชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ผลของความเข้มแสงที่รับได้เป็นข้อมูลอ้างอิง



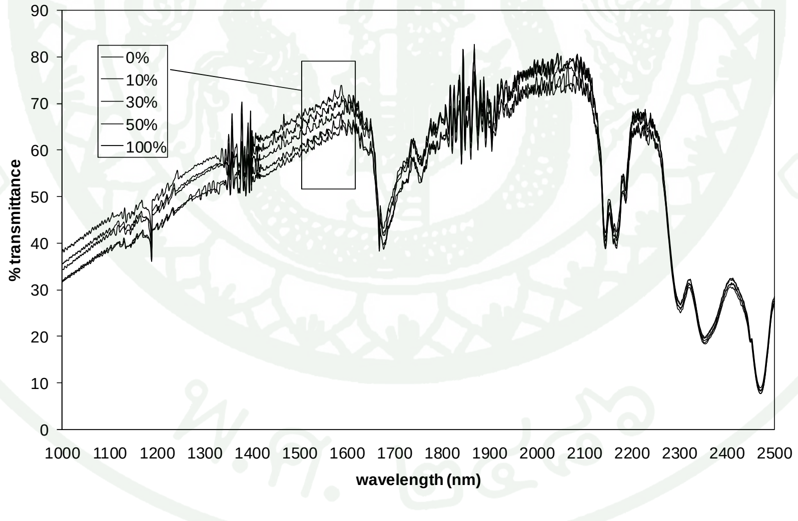
ภาพที่ 24 เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



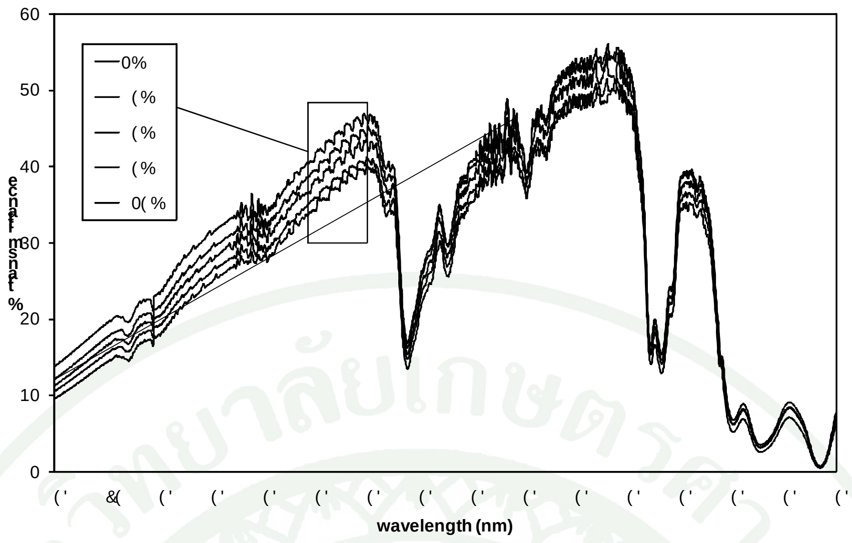
ภาพที่ 25 การวางตัวอย่างในเครื่องสเปกโทรมิเตอร์

หลังจากที่ได้ผลตรวจวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของแต่ละชิ้นงานมาสร้างกราฟจะได้เสปกตรัมของตัวอย่างแบบไม่ผสมสี สีน้ำเงิน สีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีม่วง ที่มีอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิล 0%, 10%, 30%, 50%, 100% ที่ความหนา 0.73 มิลลิเมตร 1.46 มิลลิเมตร 2.19 มิลลิเมตร 2.92 มิลลิเมตรและ 3.65 มิลลิเมตร จะได้ภาพดังภาพที่ 26 ถึง 35 ซึ่งเป็นการยกตัวอย่างไม่มีสี และสีเหลือง ตามลำดับ ส่วนสีที่เหลือมีค่าคล้ายคลึงกับค่าสีเหลือง จึงไม่ได้แสดงในรายงานนี้

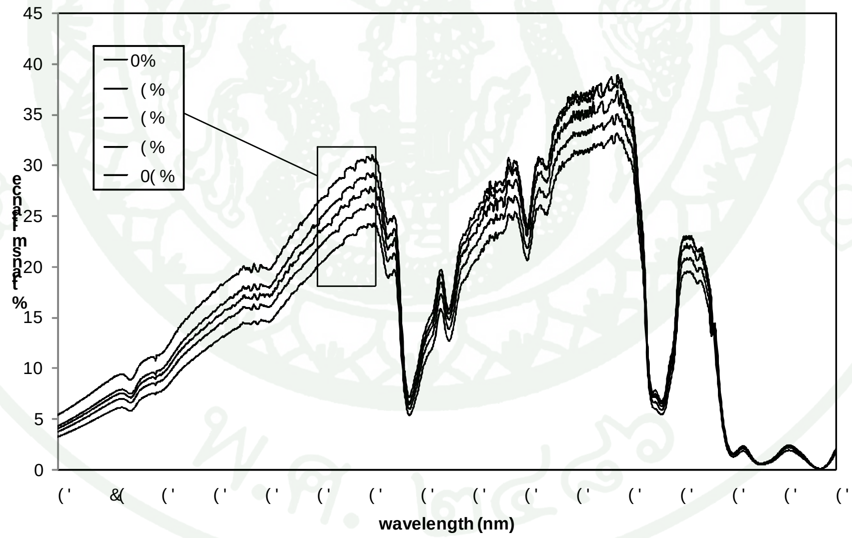


ภาพที่ 26 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 0.73 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

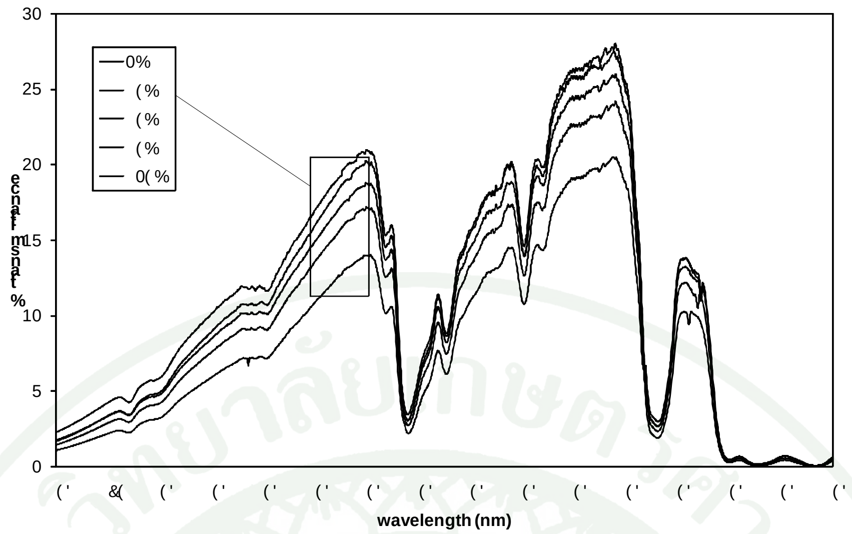


ภาพที่ 27 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 1.46 มิลลิเมตร

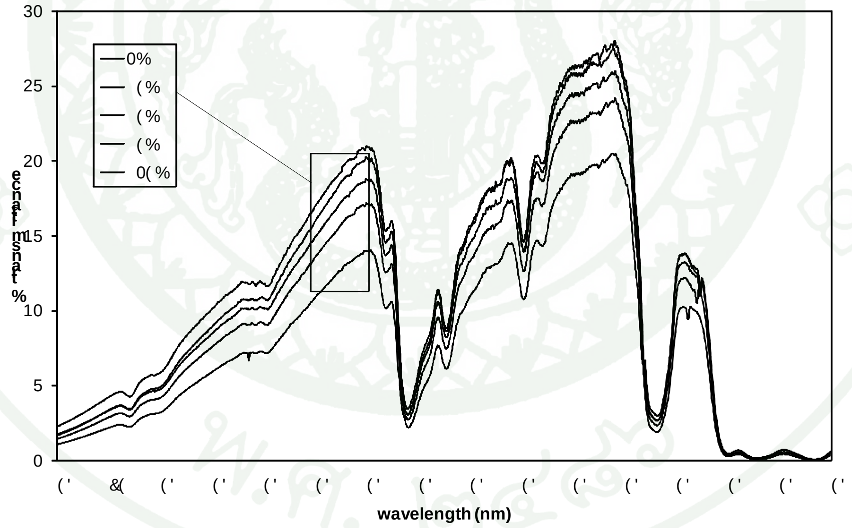


ภาพที่ 28 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 2.19 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

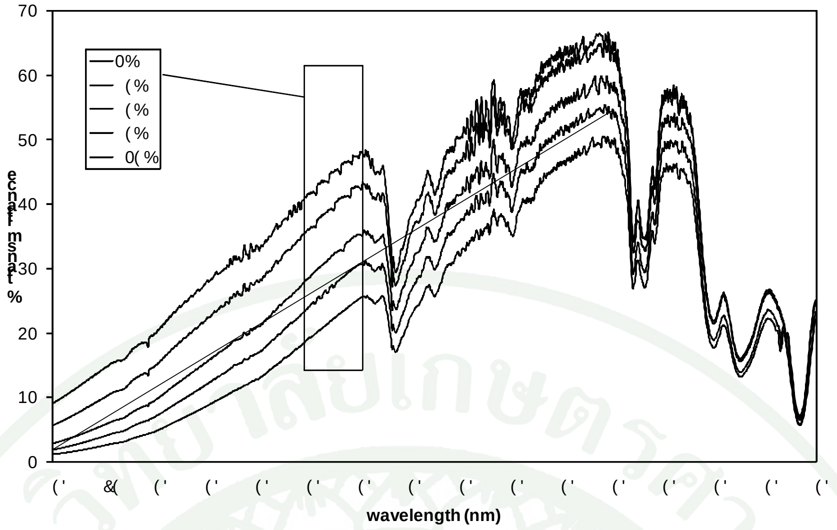


ภาพที่ 29 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 2.92 มิลลิเมตร

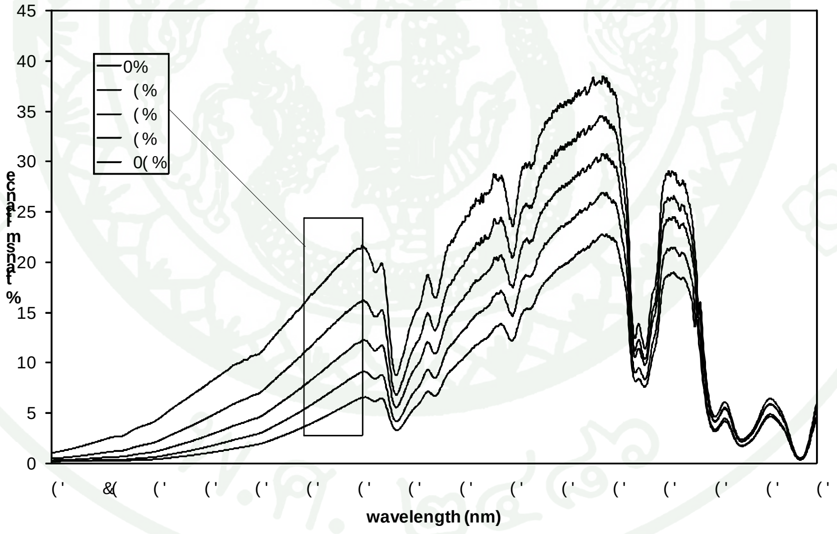


ภาพที่ 30 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกไม่มีสีหนา 3.65 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

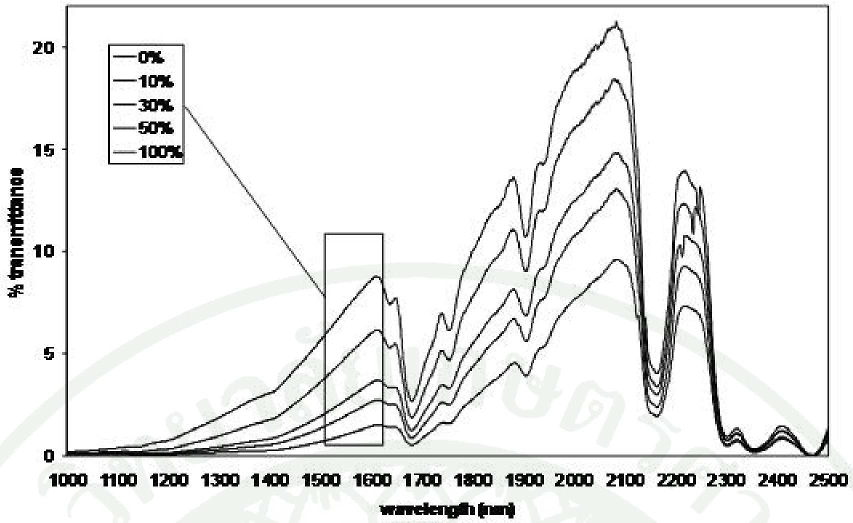


ภาพที่ 31 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 0.73 มิลลิเมตร

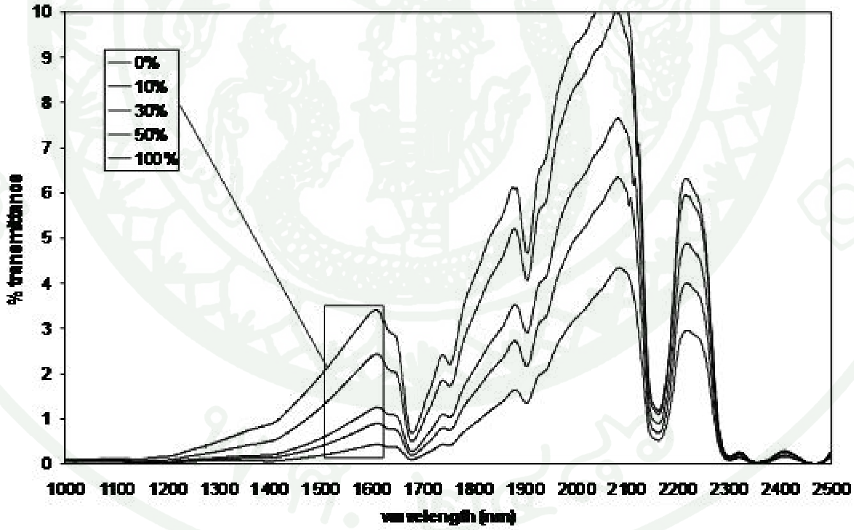


ภาพที่ 32 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 1.46 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

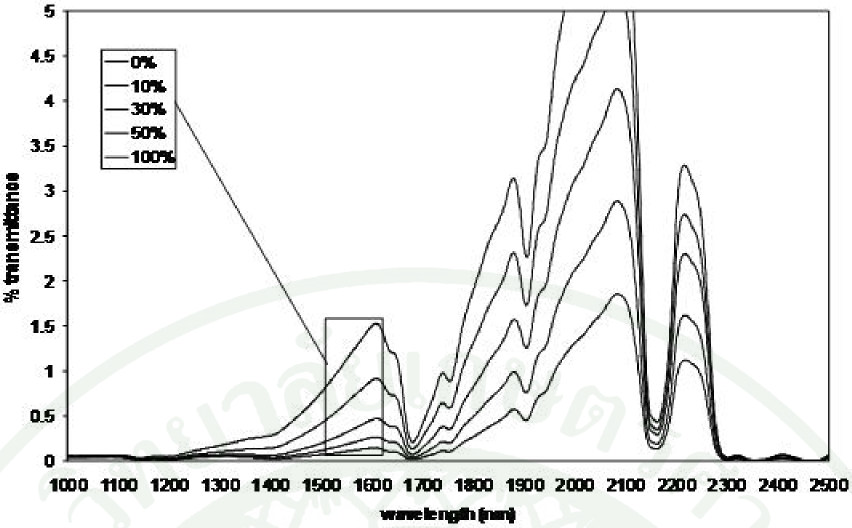


ภาพที่ 33 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 2.19 มิลลิเมตร



ภาพที่ 34 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 2.92 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 แสดงค่าความยาวคลื่นแสงต่อการผ่านของแสงของพลาสติกสีเหลืองหนา 3.65 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาค่าเสปกตรัมของทุกตัวอย่างจะได้ว่าลักษณะของสเปกตรัมจะคล้ายคลึงกันหมด คือ จะมีการส่งผ่านของแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 1500 – 1600 นาโนเมตร และ 1900 – 2100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของพลาสติกชนิดเอบีเอสที่จะไม่ดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว

และเมื่อพิจารณาตามความหนาของชิ้นงานพลาสติก ชิ้นงานพลาสติกที่มีความหนา 0.73 มิลลิเมตรจะมีการดูดกลืนพลังงานแสงน้อยที่สุด โดยชิ้นงานพลาสติกที่มีความหนา 3.65 มิลลิเมตรจะมีการดูดกลืนพลังงานแสงมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟในแต่ละความหนา จะเห็นว่าที่พลาสติกที่มีความหนา 0.73 มิลลิเมตร จะมีความไม่แน่นอนของข้อมูลทำให้กราฟที่ได้มีความไม่สม่ำเสมออย่างเช่นในช่วง 1500 -1600 นาโนเมตร เป็นต้น แต่ในความหนา 3.65 มิลลิเมตร จะมีความสม่ำเสมอของข้อมูลค่อนข้างมากกว่าในช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน

5. เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์

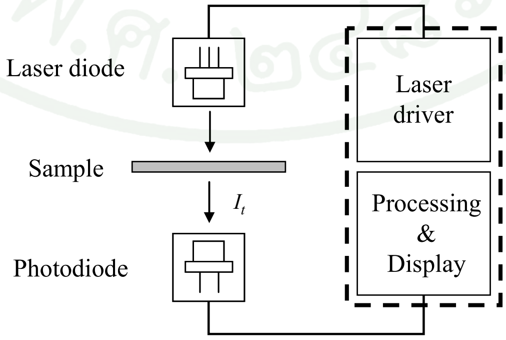
5.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์

เนื่องจากเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบเบื้องต้นมีค่าบำรุงรักษาและต้นทุนที่สูงมาก งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบเซ็นเซอร์มาใช้แทนเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ในการตรวจวัดอัตราการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ส่งผ่านแสงเพื่อจำแนกพลาสติกตัวอย่างที่มีส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลอัตราส่วนต่างๆกัน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าสเปกตรัมของตัวอย่างไม่มีสีที่หลายๆความหนาดังในภาพที่ 26 ถึง 30 พบว่าช่วงที่สามารถจำแนกอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลที่ชัดเจนมีหลากหลายช่วงเช่น ช่วง 1200 - 1400 นาโนเมตร ช่วง 1550- 1650 นาโนเมตร และ ช่วง 1900 - 2100 นาโนเมตร แต่เมื่อพิจารณาช่วง 1200 - 1400 นาโนเมตร ในตัวอย่างที่มีความหนา 3.65 มิลลิเมตร ในภาพที่ 30 จะมีอัตราการส่งผ่านของแสงที่น้อยเกินไป ซึ่งอาจทำให้มีความผิดพลาดได้สูง ส่วนในช่วงความยาวคลื่น 1900 -2100 นาโนเมตร เป็นช่วงที่ดีที่สุด ทั้ง อัตราส่งผ่านของแสง ที่สามารถผ่านได้ดี และจำแนกได้อย่างชัดเจน แต่เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่นช่วงนี้ไม่มีจำหน่ายทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกช่วงที่มีความยาวคลื่น 1550 - 1650 นาโนเมตร และใช้เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยว เพราะเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่นดังกล่าวมีใช้งานในการสื่อสารทางแสง มีการผลิตจำหน่ายเชิงพานิชย์จำนวนมาก ทำให้ราคาถูก และสามารถหาได้ทั่วไป โดยใช้เลเซอร์ไดโอดยี่ห้อ Mitsubishi เบอร์ ML925B45F ซึ่งเป็นเลเซอร์ไดโอดชนิด InGaAsP ที่มีโฟโตไดโอดภายในสำหรับสัญญาณป้อนกลับ ให้กำลังแสงเลเซอร์เอาท์พุตแบบต่อเนื่องที่ 5 mW ส่วนภาครับแสงที่ส่งผ่านจากชิ้นงานพลาสติก เลือกใช้โฟโตไดโอดยี่ห้อ Thorlabs เบอร์ FDG03 ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดชนิด Ge ที่มีค่าการตอบสนอง (Responsivity) แสงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เท่ากับ 1.19 A/W และเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่รับแสง 3 mm.

ระบบการทำงานของเซนเซอร์แสดงดังภาพที่ 36 เลเซอร์ไดโอดทำหน้าที่กำเนิดแสงเลเซอร์เพื่อส่งไปยังตัวอย่างพลาสติก จากนั้นโฟโตไดโอดซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่งจะตรวจวัดความเข้มแสงที่สามารถผ่านมาได้ (I_t) หลังจากนั้นส่วนประมวลผลจะนำค่าที่ได้มาเทียบกับความเข้มแสงที่วัดได้ขณะไม่มีตัวอย่าง และแสดงผลการตรวจวัดคุณลักษณะพลาสติกทางจอ LCD

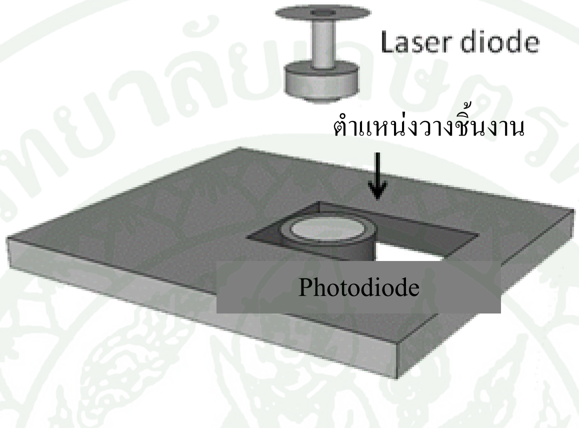


ภาพที่ 36 ระบบการทำงานของเซนเซอร์

5.2 การติดตั้งเซนเซอร์

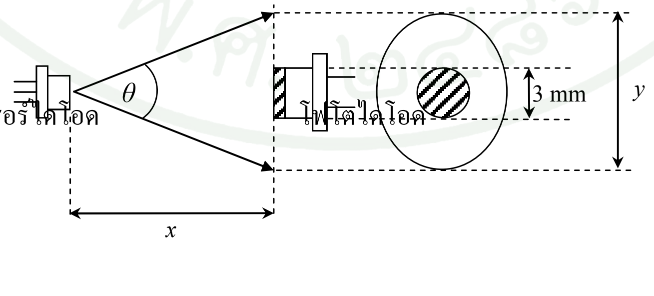
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การติดตั้งเซนเซอร์มีลักษณะตามภาพที่ 37 เลเซอร์ไดโอดที่อยู่ด้านบนจะส่งแสงเลเซอร์มายังโฟโตไดโอดด้านล่าง โดยมีฐานสำหรับวางตัวอย่างคั่นกลางซึ่งได้เจาะช่องในบริเวณที่ลำแสงเลเซอร์ผ่าน การทดสอบทำได้โดยนำชิ้นงานพลาสติกวางบนฐานดังกล่าว



ภาพที่ 37 แสดงการวางตำแหน่งของเลเซอร์ไดโอดกับโฟโตไดโอด

เนื่องจากการบานออกของลำแสงเลเซอร์ทำให้ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอดมีผลต่อค่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้ ดังภาพที่ 38 ความเข้มแสงที่โฟโตไดโอดตรวจวัดได้จะอยู่บริเวณพื้นที่รับแสงบริเวณที่แรเงาเท่านั้นซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร การบานออกของลำแสงเลเซอร์ทำให้แสงกระจายออกเป็นรูปวงรี โดยการกระจายออกของความเข้มแสงจะไม่เท่ากันทุกพื้นที่ บริเวณกึ่งกลางของลำแสงจะมีความเข้มแสงมากที่สุด (ดุสิต, 2542: 85)

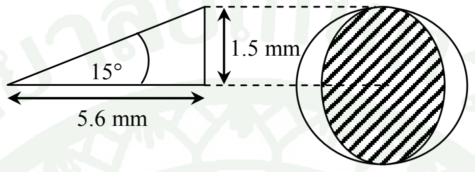


ภาพที่ 38 การบานออกของลำแสงเลเซอร์กับความเข้มแสงที่โฟโตไดโอดตรวจวัดได้

จะเห็นว่าการสูญเสียกำลังแสงขึ้นอยู่กับระยะระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับโฟโตไดโอด (x) เพื่อไม่ให้มีการสูญเสียกำลังแสงค่าระยะ x ควรจะมีค่าน้อย โดยสามารถคำนวณค่าระยะ x ที่ไม่ทำให้เกิด

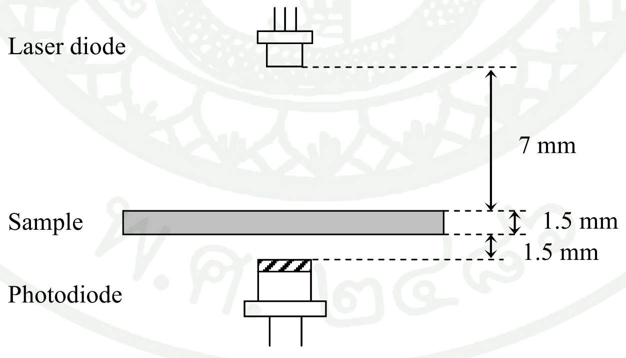
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การสูญเสียจากการกำหนดให้พื้นที่ของการกระจายแสงอยู่ภายในพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดทั้งหมด โดยให้ความกว้างของลำแสง (ระยะ y) มีค่าเท่ากับ 3 มิลลิเมตรตามข้อมูลของโฟโตไดโอดที่ใช้และจากข้อมูลคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอดพบว่า มุมที่บานออกจนทำให้เกิดการกระจายแสงเป็นรูปวงรีมีสองค่าคือ 25 และ 30 องศา ดังนั้นเมื่อใช้มุมใหญ่ในการคำนวณจะได้ค่า x เท่ากับ 5.6 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 การคำนวณระยะห่างที่ทำให้โฟโตไดโอดสามารถตรวจวัดแสงได้ทั้งหมด

จากภาพที่ 39 ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับโฟโตไดโอดที่คำนวณได้ในภาคปฏิบัติมีค่าน้อยมากเพียง 5.6 มิลลิเมตร ทำให้ไม่สะดวกในการวางชิ้นงานที่จะทดสอบ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับฐานวางตัวอย่างมีค่าประมาณ 8.5 มิลลิเมตร หลังจากวางตัวอย่างพลาสติกแล้วระยะห่างจะเป็นไปดังภาพที่ 40



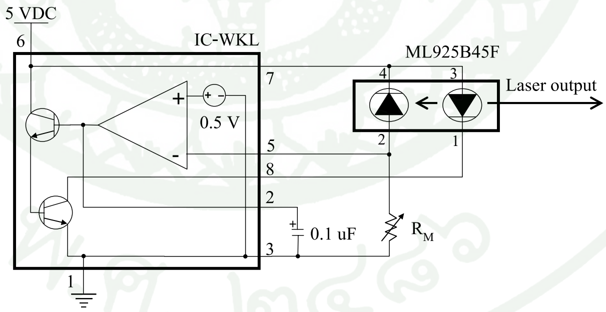
ภาพที่ 40 ระยะห่างในการติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการสูญเสียกำลังแสงบางส่วนจากระยะห่างของการติดตั้งเซนเซอร์ แต่ความเข้มแสงที่สามารถตรวจวัดได้ยังมีค่ามากพอที่จะใช้ในการทดลอง อีกทั้งงานวิจัยนี้ใช้วิธีวัดค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกเทียบกับขณะไม่มีตัวอย่าง ดังนั้นการสูญเสียกำลังแสงจากการบานออกของลำแสงเลเซอร์จึงไม่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง (โกสินทร์, 2551)

5.3 วงจรขับแสงเลเซอร์

การที่จะตรวจวัดค่าการส่งผ่านของแสงให้มีเสถียรภาพจะต้องมีวงจรที่สามารถส่งกำลังแสงเอาท์พุตของเลเซอร์ที่มีความคงที่และสม่ำเสมอ เนื่องจากงานวิจัยนี้จะตรวจวัดค่าการส่งผ่านของแสงเป็นหลักในการวิเคราะห์ สำหรับงานวิจัยนี้จึงใช้วงจรรวมสำเร็จรูปในการขับเลเซอร์ไดโอดแบบส่งแสงต่อเนื่องยี่ห้อ IC-Haus เบอร์ WKL ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมกระแส โดยสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 90 mA และจ่ายแรงดันคงที่ Forward bias ที่ 1.1 โวลต์ ซึ่งเพียงพอในการที่เลเซอร์ไดโอดเบอร์ ML925B45F จะทำงาน คือแรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติของเลเซอร์ไดโอดที่ใช้กระแส 50 mA ถึง 100 mA และแรงดันไฟฟ้า 1.1 โวลต์ ถึง 1.5 โวลต์ จึงสามารถต่อเข้ากันได้โดยตรง เมื่อเริ่มจ่ายไฟฟ้า 5 โวลต์ให้วงจรรวม WKL จากนั้นวงจรรวม จะทำการจำกัดกระแสและแรงดันให้เป็นไปตามการปรับค่า R_M การต่อวงจรเป็นไปดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การต่อเลเซอร์ไดโอดกับวงจรรวมควบคุมกระแส

การควบคุมกำลังแสงเอาพุตท์ทำได้โดยนำสัญญาณป้อนกลับจากโฟโตไดโอดที่อยู่ภายในตัวถังของเลเซอร์ไดโอดมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันคงที่ 0.5 V ภายในตัวขยายสัญญาณแบบวัดความแตกต่าง (Differential Amplifier) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังเอาท์พุตของแสงเลเซอร์ สัญญาณป้อนกลับจากโฟโตไดโอดจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าแรงดันที่ขา 5 ของวงจรรวมแตกต่างจากแรงดันคงที่ 0.5 V ดังนั้นค่ากระแสที่ป้อนให้กับเลเซอร์ไดโอดจึงถูกปรับเปลี่ยนจนกระทั่งค่าสัญญาณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ป้อนกลับมีค่าเท่ากับสัญญาณอ้างอิงอีกครั้ง สำหรับ ตัวเก็บประจุ 0.1 μF มีหน้าที่หน่วงเวลาในการเริ่มและหยุดจ่ายแรงดันของไฟเลี้ยงเพื่อป้องกันกระแสกระชาก (Transient) ซึ่งจากข้อมูลในเอกสารกำกับกำลังเอาท์พุตของเลเซอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากสุดไม่เกิน 1 % เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ไฟเลี้ยง และกระแสโหลด ซึ่งการกำหนดค่ากำลังแสงเอาท์พุตทำได้โดยปรับค่าตัวต้านทาน R_M ดังสมการที่ 11

$$R_M = \frac{0.5}{I_M} \times \frac{P_N}{P_S} \tag{11}$$

เมื่อ I_M = กระแสป้อนกลับของโฟโตไดโอดขณะกำลังแสงเลเซอร์ปกติ

P_N = กำลังแสงเลเซอร์ปกติ

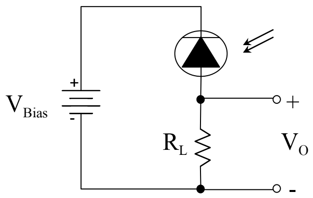
P_S = กำลังแสงเลซอร์ที่ต้องการ

จากข้อมูลในเอกสารกำกับ ของเลเซอร์ไดโอดจะได้ค่า I_M= 0.5 mA และ P_N = 5 mW สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้กำลังแสงเอาท์พุต (P_S) = 5 mW ซึ่งเป็นค่าปกติในการทำงานของเลเซอร์ ดังนั้นเมื่อคำนวณด้วยสมการที่ 11 จะได้ค่า R_M = 1 kΩ

5.4 วงจรตรวจวัดความเข้มแสง

วงจรที่ใช้ต่อกับโฟโตไดโอดเพื่อตรวจวัดแสงเลเซอร์ใช้การต่อแบบ Photoconductive ซึ่งจะให้แรงดัน Reverse bias กับโฟโตไดโอดดังภาพที่ 42 การต่อวงจรแบบนี้มีข้อดีคือมีการตอบ สนองต่อแสงเป็นแบบเชิงเส้นและรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียคือเกิดกระแสมืด (Dark current) หรือมีกระแสไหลขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบโฟโตไดโอด ซึ่งค่าแรงดันเอาท์พุต (V_O) จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่มาตกกระทบโฟโตไดโอด รวมทั้งค่าแรงดันไบแอส (V_{Bias}) และความต้านทานโหลด (R_L) (Wilson and Hawkes, 1998: 324-328)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 42 การต่อโฟโตไดโอดในโหมด Photoconductive

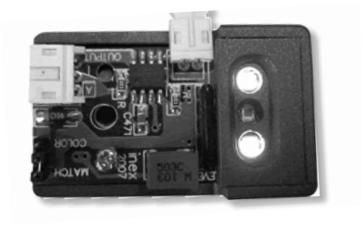
จากการทดลองต่อวงจรตามภาพที่ 42 และติดตั้งเซนเซอร์ตามภาพที่ 36 โดยไม่มีชิ้นงานพลาสติกและไม่มีแสงจากภายนอกแล้วปรับค่า V_{Bias} และ R_L ที่ค่าต่างๆ จากนั้นวัดค่า V_O ขณะเปิดใช้งานเลเซอร์ไดโอดและขณะปิดใช้งานเลเซอร์ไดโอดจะเกิดจากกระแสมืดที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_L เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ V_O กับ R_L ของแต่ละ V_{Bias} จะพบว่าค่า V_O จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า R_L เพิ่มมากขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตั้งแต่ V_O เท่ากับศูนย์ จนถึงค่าที่ V_O เท่ากับ V_{Bias} เท่านั้น หลังจากนั้นค่า V_O จะเริ่มคงที่แม้ว่าค่า R_L จะเพิ่มขึ้นก็ตาม V_O ที่เกิดจากกระแสมืดกับ R_L ในช่วง 0 ถึง 2000 kΩ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และค่ากระแสมืดจะแปรผันตรงกับค่า V_{Bias} และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเฉลี่ยของค่า V_O ที่เกิดจากกระแสมืดเทียบกับ V_O ที่เกิดจากแสงเลเซอร์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์เฉพาะช่วงที่ V_O ที่เกิดจากแสงเลเซอร์ยังมีความสัมพันธ์ แบบเชิงเส้นกับ R_L ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ V_O มีค่า 1.0 V ดังนั้นจึงใช้ค่า R_L เท่ากับ 650 Ω และใช้ V_{Bias} เท่ากับ 1.25 V เพราะมีกระแสมืดน้อยที่สุด

6. เซนเซอร์ตรวจวัดสี

6.1 หลักการทำงาน

เพื่อความสะดวกในการทำงานของผู้ใช้ เมื่อพลาสติกมีสีต่างๆกัน จะทำให้มีการส่งผ่านของแสงอินฟราเรดที่แตกต่างกัน จึงมีผลกระทบต่อการนำไปคำนวณคุณสมบัติทางกลเบื้องต้น ดังนั้นจึงมีการวัดสีของพลาสติกด้วย โดยเลือกใช้ชุดตรวจวัดสีรุ่น ZX-color ของบริษัท INEX ที่มีการใช้วงจรรวมเบอร์ TCS230 จาก Texas Advanced Optoelectronics Solutions ดังรูปที่ 43 การทำงานของเซนเซอร์จะทำงานได้ 2 แบบคือ วัดสีของวัตถุ และตรวจจับสีของวัตถุที่ได้ตั้งค่าไว้ว่าตรงหรือไม่ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การทำงานแบบตรวจวัดสี โดยจะวัดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าโดยจะมีค่าตั้งแต่ 0 โวลต์เมื่อวัตถุเป็นสีขาว ถึง 5 โวลต์เมื่อวัตถุเป็นสีดำ

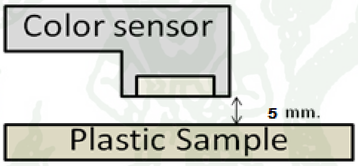
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



รูปที่ 43 ชุดตรวจวัดสี ZX-color

6.2 การติดตั้งชุดตรวจวัดสี

การติดตั้งเซนเซอร์มีลักษณะดังภาพที่ 44 โดยชุดตรวจวัดสีอยู่ห่างจากฐานรอง 5 มิลลิเมตร เป็นระยะที่แม่นยำที่สุดในการตรวจวัดสีซึ่งระบุไว้จากข้อมูลวงจรรวม



ภาพที่ 44 ตำแหน่งการวางพลาสติกตัวอย่างกับตัววัดสี

7. เครื่องวัดความหนา

7.1 หลักการทำงาน

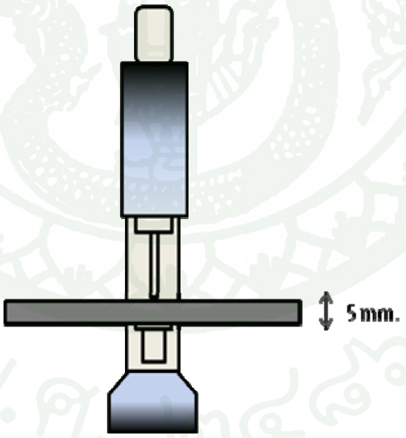
เนื่องจากความหนาของชิ้นงานมีผลกระทบโดยตรงต่อการส่งผ่านของแสง เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบตัววัดความหนาเพื่อความแม่นยำในการคำนวณสมบัติทางกลของพลาสติก โดยได้เลือกไมโครมิเตอร์รุ่น MW200 DL ของบริษัท Moore & Wright ดังรูปที่ 45 โดยสามารถวัดความละเอียดได้ถึง 0.01 มิลลิเมตร และวัดความหนาได้ตั้งแต่ 0 – 25 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และสามารถส่งค่าผ่านสายสัญญาณ RS- 232 ซึ่งสามารถนำไปต่อกับหน่วยประมวลผลหลักเพื่อนำไปคำนวณต่อได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รูปที่ 45 ไมโครมิเตอร์ MW200 DL ของบริษัท Moore & Wright

7.2 การติดตั้งเครื่องวัดความหนา

การติดตั้งไมโครมิเตอร์ได้ดังภาพที่ 46 โดยวางในลักษณะแนวตั้ง ซึ่งระหว่างด้านล่างสุดของแกนวัดความหนาของไมโครมิเตอร์และชิ้นงานพลาสติกจะถูกคั่นด้วยพลาสติกฐานรองในการใช้งานเพื่อให้ได้ความหนาที่ถูกต้องจะต้องลบด้วยความหนาของพลาสติกฐานรอง ซึ่งสามารถตั้งค่าใหม่ (reset) ได้โดยไม่คิดรวมความหนาของพลาสติกฐานรองหนา 5 มิลลิเมตรหรือหมายความว่าค่าที่ได้จะเป็นความหนาของชิ้นงานพลาสติกตัวอย่างที่ต้องการวัด



ภาพที่ 46 การวางไมโครมิเตอร์ลงในแท่นรองที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8 ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผล

8.1 หลักการทำงาน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่มีจอสัมผัสในการรับคำสั่งจากผู้ใช้ ยี่ห้อ Friendly arm รุ่น Mini 2440 ดังภาพที่ 47 ที่มีหน่วยประมวลผล Samsung ARM9 ที่มีความเร็วในการประมวลผลที่ค่อนข้างสูง และเพื่อให้สะดวกในการปรับแต่งและแก้ไขในอนาคต งานวิจัยนี้จึงได้ใช้บอร์ดทดลองของ ETT Atmega128 ดังภาพที่ 48 เพื่อแปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (A/D) และส่งข้อมูลทางช่องสัญญาณอนุกรมไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กดังกล่าว เพื่อประมวลผลและแสดงผลข้อมูลออกทางจอ LCD ต่อไป

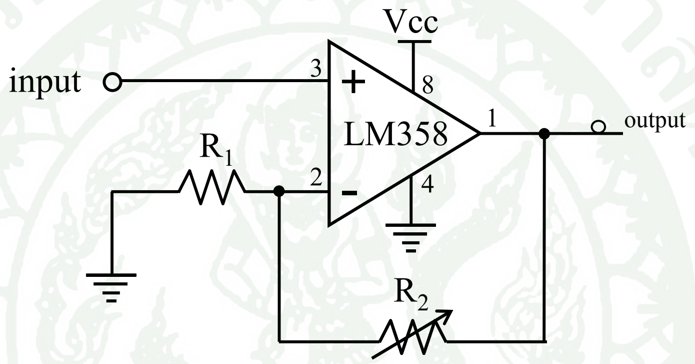
ภาพที่ 47 คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก Friendly arm รุ่น Mini 2440

ภาพที่ 48 บอร์ด ETT Atmega128

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.2 การเชื่อมต่อหน่วยประมวลผลกับอุปกรณ์วัดค่า

บอร์ดทดลอง ETT Atmega128 จะรับข้อมูลจากทางโฟโตไดโอดและเซนเซอร์สีโดยใช้การแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล และรับข้อมูลจากไมโครมิเตอร์จากช่องสัญญาณอนุกรม แต่ในการวัดค่าจากโฟโตไดโอดจะได้ค่าเพียง 0 – 1.2 โวลต์ จึงทำให้ค่าที่ได้ไม่ละเอียดเท่าที่ควร เพราะบอร์ด ETT Atmega128 มีความละเอียดในการแปลงค่าจากแอนะล็อกเป็นดิจิตอลเพียง 8บิต ดังนั้นจึงได้ทำวงจรขยายสัญญาณ แอนะล็อกจาก 1.2 โวลต์เป็น 5 โวลต์ เพื่อที่จะได้มีความละเอียดของข้อมูลที่มากขึ้น โดยวงจรออปแอมป์ ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 วงจรขยายด้วยออปแอมป์ LM358

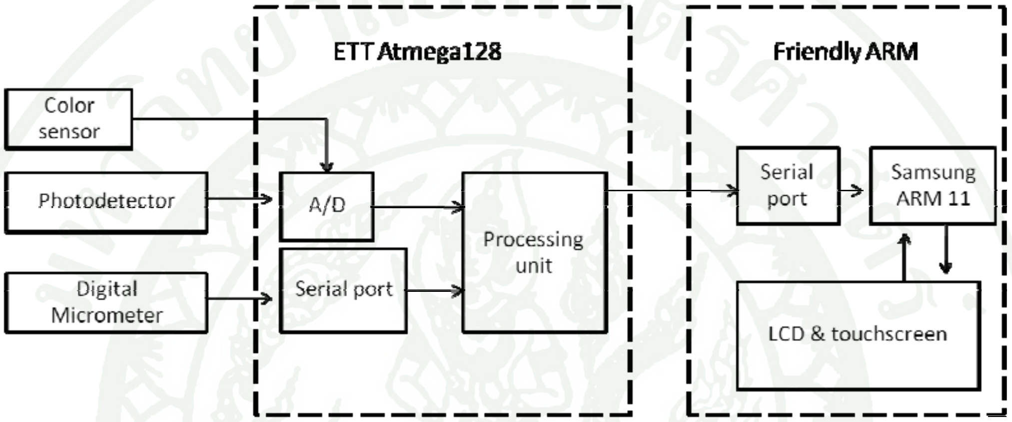
ในส่วนของวงจรขยายเป็นการขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส อัตราการขยายสัญญาณ (A_V) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 12 เนื่องจากสัญญาณอินพุตจากวงจรตรวจวัดความเข้มแสงซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.2 V และต้องการขยายสัญญาณให้ได้ขนาด 5 V ดังนั้นอัตราการขยายจึงเป็น 5 เท่า เมื่อกำหนดให้ R_1 มีค่าเท่ากับ 10 kΩ ดังนั้นเมื่อใช้สมการที่ 11 คำนวณจะได้ค่า R_2 เท่ากับ 40 kΩ

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad (12)$$

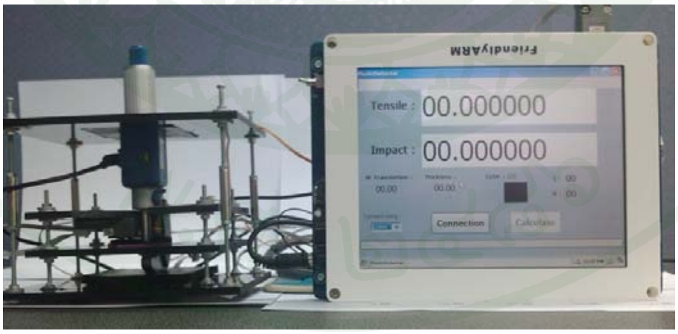
ลักษณะเฉพาะของ Op-Amp เบอร์ LM358 คือมีค่าเอาท์พุตอิ่มตัวที่สามารถเกิดขึ้นได้ (Saturation) ต่ำกว่าไฟเลี้ยงอยู่ 1.5 V ดังนั้นจึงออกแบบให้ไฟเลี้ยง Op-Amp เท่ากับ 6.5 V ซึ่งทำให้ค่าสัญญาณเอาท์พุตที่ขยายแล้วมีค่าไม่เกิน 5 V เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายกับตัว A/D เพราะไมโครคอนโทลเลอร์สามารถรับแรงดันสัญญาณแอนะล็อกสูงสุดไม่เกิน 5 V ความละเอียดในการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลจะเท่ากับ 5/1024 ดังนั้นเมื่อสัญญาณแอนะล็อกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับ 4.88 mV จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิตอลขึ้นหนึ่งขั้น และเมื่อรับข้อมูลครบ 3 อย่าง จะทำการส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กโดยผ่านช่องทางอนุกรม เพื่อนำข้อมูลทั้ง 3 ชนิดไปวิเคราะห์ และแสดงผลออกทางหน้าจอ LCD ดังภาพที่ 50 โดยภาพที่ 51 แสดงภาพของฮาร์ดแวร์ที่เสร็จสมบูรณ์ และภาพที่ 52 แสดงการวางตำแหน่งของเซนเซอร์

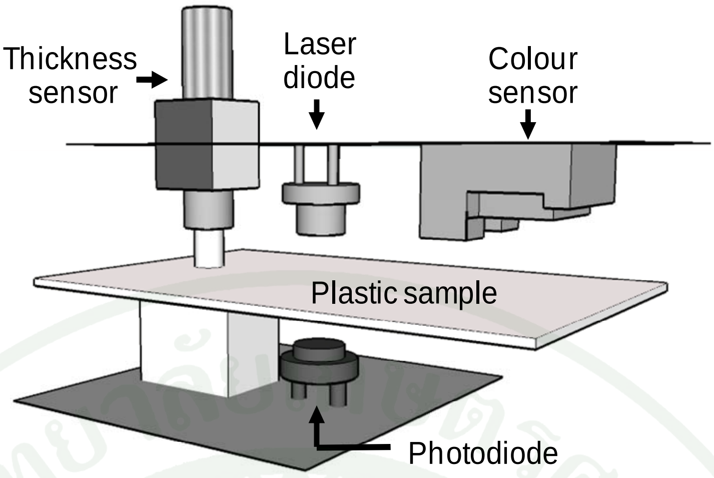


ภาพที่ 50 ภาพรวมการทำงานของฮาร์ดแวร์ทั้งหมด



ภาพที่ 51 ฮาร์ดแวร์ที่เสร็จสมบูรณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 52 ตำแหน่งการวางเซนเซอร์วัดสี วัดความหนา เลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด

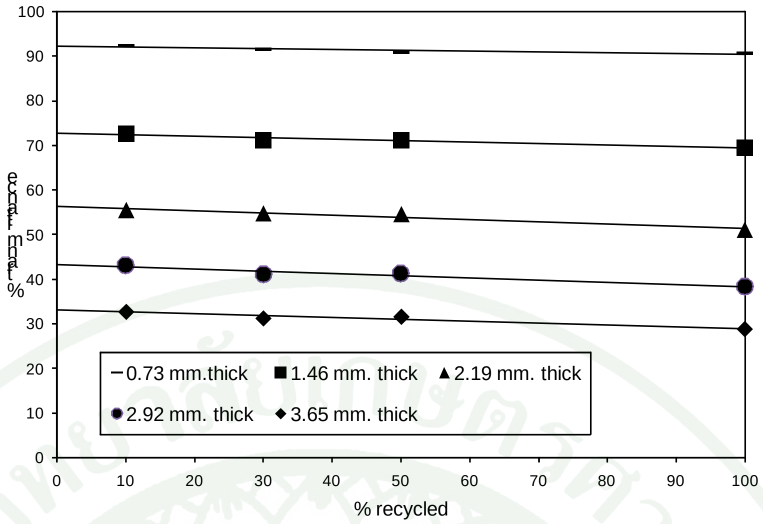
9. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกล

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกลบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น

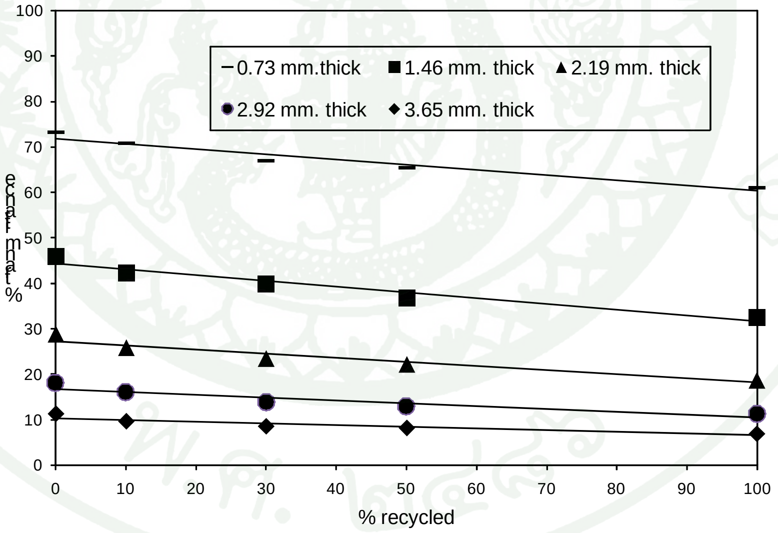
9.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิล

จากผลการวัดค่าสเปกตรัมด้วยอุปกรณ์ที่ได้จัดทำขึ้น เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลของตัวอย่างพลาสติกที่สีและความหนาต่างๆ ใช้ทดลองดังภาพที่ 53 ถึง 58

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

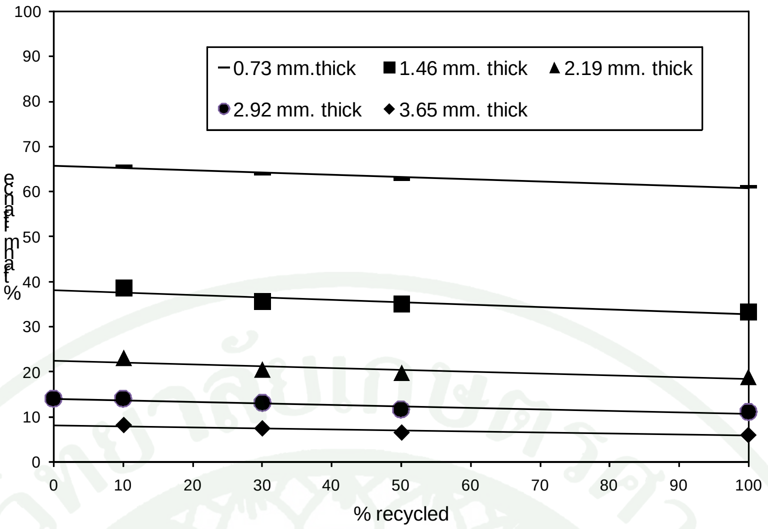


ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดไม่มีสี ที่ความหนาต่างๆ

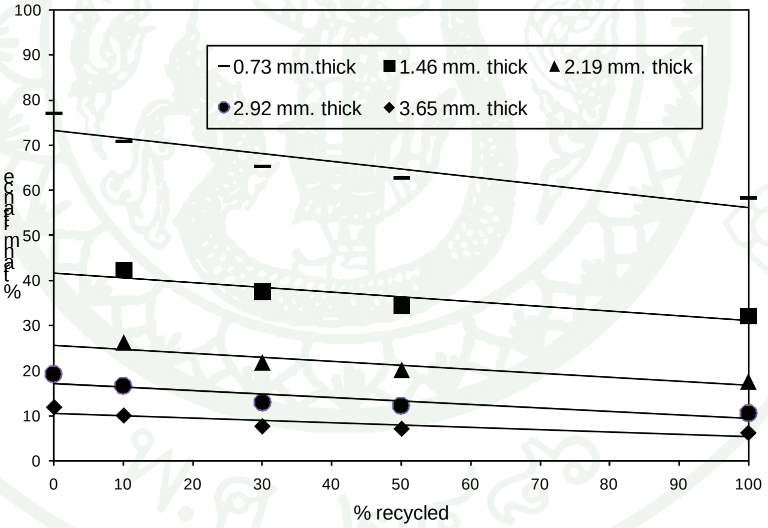


ภาพที่ 54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีน้ำเงินที่ความหนาต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

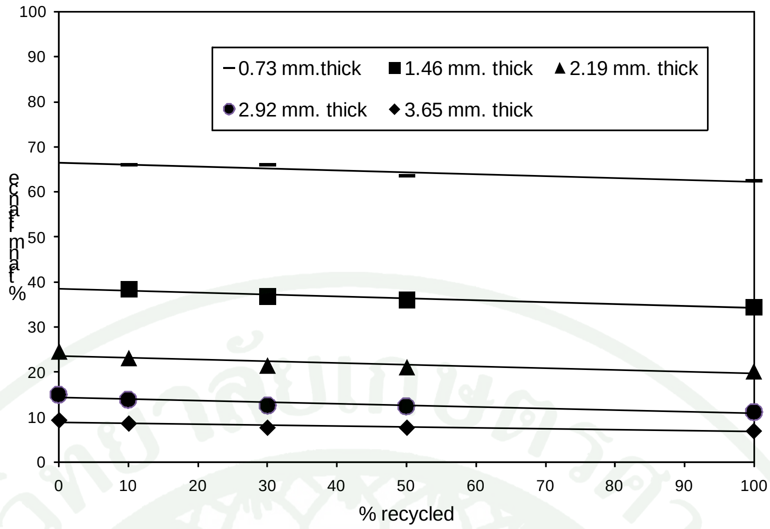


ภาพที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล พลาสติกชนิดสีแดง ที่ความหนาต่างๆ

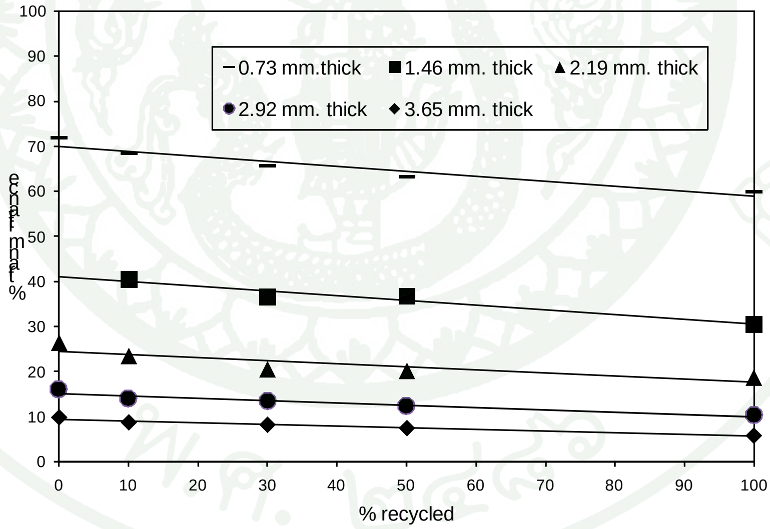


ภาพที่ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล พลาสติกชนิดสีเหลือง ที่ความหนาต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีเขียว ที่ความหนาต่างๆ



ภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสง และ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกชนิดสีม่วงที่ความหนาต่างๆ

จากภาพที่ 53 ถึง 58 ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสงกับ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลดังสมการที่ 13 ถึง 45 ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสงกับ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล

สีของพลาสติก	ความหนาของพลาสติก (มม.)	สมการ ค่าเปอร์เซ็นต์การผ่านของแสง	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)	สมการที่
ไม่มีสี	0.73	$T_{N1} = -0.018r + 92.18$	0.774	13
ไม่มีสี	1.46	$T_{N2} = -0.032r + 72.61$	0.935	14
ไม่มีสี	2.19	$T_{N3} = -0.049r + 56.36$	0.933	15
ไม่มีสี	2.92	$T_{N4} = -0.049r + 43.23$	0.931	16
ไม่มีสี	3.65	$T_{N5} = -0.041r + 33.03$	0.908	17
น้ำเงิน	0.73	$T_{B1} = -0.114r + 71.79$	0.944	18
น้ำเงิน	1.46	$T_{B2} = -0.126r + 44.26$	0.945	19
น้ำเงิน	2.19	$T_{B3} = -0.091r + 27.28$	0.927	20
น้ำเงิน	2.92	$T_{B4} = -0.062r + 16.78$	0.863	21
น้ำเงิน	3.65	$T_{B5} = -0.038r + 10.35$	0.856	22
แดง	0.73	$T_{R1} = -0.049r + 65.66$	0.95	23
แดง	1.46	$T_{R2} = -0.054r + 38.16$	0.854	24
แดง	2.19	$T_{R3} = -0.032r + 13.95$	0.886	25
แดง	2.92	$T_{R4} = -0.040r + 22.48$	0.769	26
แดง	3.65	$T_{R5} = -0.022r + 8.103$	0.896	27
เหลือง	0.73	$T_{Y1} = -0.170r + 73.23$	0.853	28
เหลือง	1.46	$T_{Y2} = -0.104r + 41.60$	0.852	29
เหลือง	2.19	$T_{Y3} = -0.088r + 25.65$	0.881	30
เหลือง	2.92	$T_{Y4} = -0.078r + 17.19$	0.792	31
เหลือง	3.65	$T_{Y5} = -0.051r + 10.54$	0.788	32
เขียว	0.73	$T_{G1} = -0.114r + 71.79$	0.944	33
เขียว	1.46	$T_{G2} = -0.126r + 44.26$	0.945	34
เขียว	2.19	$T_{G3} = -0.091r + 27.28$	0.927	35

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สีของพลาสติก	ความหนาของพลาสติก (มม.)	สมการ ค่าเปอร์เซ็นต์การผ่านของแสง	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)	สมการที่
เขียว	2.92	$T_{G4} = -0.062r + 16.78$	0.863	36
เขียว	3.65	$T_{G5} = -0.038r + 10.35$	0.856	37
ม่วง	0.73	$T_{P1} = -0.042r + 66.50$	0.882	38
ม่วง	1.46	$T_{P2} = -0.041r + 38.37$	0.942	39
ม่วง	2.19	$T_{P3} = -0.039r + 23.58$	0.787	40
ม่วง	2.92	$T_{P4} = -0.035r + 14.30$	0.882	41
ม่วง	3.65	$T_{P5} = -0.021r + 8.839$	0.849	42

เมื่อ T_N = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างไม่ผสมสี

T_B = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีน้ำเงิน

T_R = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีแดง

T_Y = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีเหลือง

T_G = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีเขียว

T_P = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีม่วง

R = อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

9.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับความหนาของชิ้นงานพลาสติก

จากภาพที่ 53 ถึง 58 ได้ว่าความหนามีผลต่อการดูดกลืนพลังงานแสง ในการวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงจึงขึ้นกับความหนาด้วย จากสมการที่ 13 ถึง 42 จะเห็นได้ว่า จะใช้ชิ้นงานพลาสติกที่มีความหนาได้เพียง 5 ขนาด คือ 0.73 มิลลิเมต 1.46 มิลลิเมตร 2.19 มิลลิเมตร 2.92 มิลลิเมตรและ 3.65 มิลลิเมตรเพื่อมาคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสงกับ อัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติก จะเห็นได้ว่ามีความไม่สะดวกในการที่จะทำชิ้นงานพลาสติกให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้ความหนาที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น พลาสติกหนา 0.90 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 0.73 มิลลิเมตร กับ 1.46 มิลลิเมตร ซึ่งไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากความหนาไม่อยู่ในข้อกำหนด ดังนั้นจึงนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล ซึ่งแต่ละสีมี 5 สมการตามความหนาที่กล่าวไปข้างต้น โดยนำสมการ 5 สมการนี้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล โดยเมื่อได้สมการใหม่นี้ทำให้ไม่ต้องระบุความหนาที่แน่นอนของชิ้นงานพลาสติก แต่สามารถใช้ชิ้นงานพลาสติกที่นำมาทดสอบมีความหนาได้ระหว่าง 0.73 มิลลิเมตร จนถึง 3.65 มิลลิเมตร

9.2.1 วิธีการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านของแสงและอัตรส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลพลาสติกด้วยวิธีหารเฉลี่ยสมการ

ในงานวิจัยนี้ต้องการความละเอียดของการวัดความหนาเป็น 0.0074 มิลลิเมตร (0.73 หารด้วย 99) เพื่อที่จะได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น พลาสติกที่มีความหนา 0.79 มิลลิเมตร ถ้าไม่มีการปรับสมการจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากสมการที่ใกล้เคียงที่สุดคือ สมการของความหนา 0.73 มิลลิเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนความหนามากถึง 8 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีการปรับสมการ พลาสติกที่มีความหนา 0.79 มิลลิเมตร จะมีความคลาดเคลื่อนจากสมการที่มีความหนา 0.787 มิลลิเมตร (มาจาก $0.73 + (0.0074 \times 5)$ มิลลิเมตร) โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.4 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างการหาสมการจากชิ้นงานพลาสติกไม่มีสี เมื่อพิจารณาสมการที่ 13 $T_{N1} = -0.018R + 92.18$ ให้เป็นสมการขอบบน และสมการที่ 14 $T_{N2} = -0.032R + 72.61$ เป็นสมการขอบล่าง ค่าชดเชยของสมการ T_{N1} คือ 92.18 ค่าชดเชยของสมการ T_{N2} คือ 72.61 ซึ่งมีความแตกต่างกัน 19.57และเมื่อนำไปหารเฉลี่ยด้วย 99 จะได้ 0.1976 ส่วนค่าความชันของสมการ T_{N1} คือ -0.018 ค่าความชันของสมการ T_{N2} คือ -0.032 มีความแตกต่างกัน -0.014 เมื่อทำการหารเฉลี่ยด้วย 99 จะได้ 0.00014 จากสมการ T_{N1}และ T_{N2} จะได้สมการหารเฉลี่ยด้วย 99 คือ

$$T = R \times \{ [-0.018 - (N \times 1.4 \times 10^{-4})] + [92.18 - (0.1976 \times N))] \} \quad (43)$$

ทำการกลับด้านของสมการ 43 ได้สมการหาค่าสัดส่วนพลาสติกรีไซเคิล(R) เป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$R_{N1} = \frac{T - \left[92.18 - \left(0.1976 \times N\right)\right]}{-0.018 - \left(N \times 1.4 \times 10^{-4}\right)} \quad (44)$$

และทำการจับคู่สมการ T_{N2} กับ T_{N3} , T_{N3} กับ T_{N4}, T_{N4} กับ T_{N5} ในทำนองเดียวกันจะได้สมการเป็น

$$R_{N2} = \frac{T - \left[72.61 - \left(0.164141 \times N\right)\right]}{-0.032 - \left(N \times 1.7 \times 10^{-4}\right)}$$

(45)

$$R_{N3} = \frac{T - \left[56.36 - \left(0.132626 \times N\right)\right]}{-0.049} \quad (46)$$

$$R_{N4} = \frac{T - \left[43.26 - \left(0.10303 \times N\right)\right]}{-0.049 + \left(N \times 8.08 \times 10^{-5}\right)} \quad (47)$$

และที่ความหนา 3.65 จะใช้สมการเดิมที่ไม่มีการปรับสมการคือ

$$R_{N5} = \frac{T - 33.03}{0.041} \quad (48)$$

โดยที่ N คือขั้นของความหนาได้จากเศษจากการหารความหนาด้วย 0.73 แล้วคูณด้วยหนึ่งร้อย ดังนั้นค่า N จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 99 โดยจะแบ่งช่วงเป็น 5 ช่วง คือช่วงแรกเมื่อความหนาอยู่ระหว่างช่วง 0.73 มม ถึง 1.46 มม.จะเลือกใช้สมการที่ 44 ช่วงที่สองมีความหนาระหว่าง 1.46 มม. ถึง 2.19 มม.จะ เลือกใช้สมการที่ 45 ช่วงที่สามเมื่อความหนาอยู่ระหว่าง 2.19 มม. ถึง 2.92 มม. จะเลือกใช้สมการที่ 46 ช่วงที่สี่ เมื่อมีความหนาอยู่ในช่วง 2.92 มม. ถึง 3.64 มม. เลือกใช้สมการที่ 47 และ สุดท้ายเมื่อความหนา 3.65 มม. จะใช้สมการ 48 เช่นเดียวกันในตัวอย่างสีอื่นๆ สามารถหาสมการและช่วงความหนาที่เลือกใช้เช่นเดียวกันกับแบบไม่มีสี

ตัวอย่างสีน้ำเงิน ทำการจับคู่สมการ T_{B1}และ T_{B2} ,T_{B2} กับ T_{B3} , T_{B3} กับ T_{B4}, T_{B4} กับ T_{B5} จะได้สมการสำหรับหาค่า R ดังสมการ 54 ถึง 58

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$R_{B1} = \frac{T - \left[71.79 - \left(0.27808 \times N\right)\right]}{-0.114 - \left(N \times 1.212 \times 10^{-4}\right)} \tag{49}$$

$$R_{B2} = \frac{T - \left[44.26 - \left(0.171515 \times N\right)\right]}{-0.126 - \left(N \times 3.535 \times 10^{-4}\right)} \tag{50}$$

$$R_{B3} = \frac{T - \left[27.28 - \left(0.10606 \times N\right)\right]}{-0.091 + \left(N \times 2.929 \times 10^{-4}\right)} \tag{51}$$

$$R_{B4} = \frac{T - \left[16.78 - \left(0.064949 \times N\right)\right]}{-0.062 - \left(N \times 2.424 \times 10^{-4}\right)} \tag{52}$$

$$R_{B5} = \frac{T - 10.350}{-0.038} \tag{53}$$

ตัวอย่างสีแดง ทำการจับคู่สมการ T_{R1}และ T_{R2} ,T_{R2} กับ T_{R3} , T_{R3} กับ T_{R4} , T_{R4} กับT_{R5} จะได้สมการสำหรับหาค่า R ดังสมการ 49 ถึง 53

$$R_{R1} = \frac{T - \left[65.66 - \left(0.2778 \times N\right)\right]}{-0.049 - \left(N \times 5.05 \times 10^{-5}\right)} \tag{54}$$

$$R_{R2} = \frac{T - \left[38.16 - \left(0.15838 \times N\right)\right]}{-0.054 + \left(N \times 1.414 \times 10^{-4}\right)} \tag{55}$$

$$R_{R3} = \frac{T - \left[22.48 - \left(0.086151 \times N\right)\right]}{-0.040 - \left(N \times 8.08 \times 10^{-5}\right)} \tag{56}$$

$$R_{R4} = \frac{T - \left[13.95 - \left(0.05906 \times N\right)\right]}{-0.032 + \left(N \times 1.01 \times 10^{-4}\right)} \tag{57}$$

$$R_{R5} = \frac{T - 13.95}{-0.032} \tag{58}$$

ตัวอย่างสีเหลือง ทำการจับคู่สมการ T_{Y1}และ T_{Y2} ,T_{Y2} กับ T_{Y3} , T_{Y3} กับ T_{Y4} , T_{Y4} กับ T_{Y5} จะได้สมการสำหรับหาค่า R ดังสมการ 59 ถึง 63

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$R_{Y1}=\frac{T-\left[73.23-\left(0.319495\times N\right)\right]}{-0.170+\left(N\times1.616\times10^{-4}\right)} \tag{59}$$

$$R_{Y2}=\frac{T-\left[41.60-\left(0.16111\times N\right)\right]}{-0.104-\left(N\times1.616\times10^{-4}\right)} \tag{60}$$

$$R_{Y3}=\frac{T-\left[25.65-\left(0.085454\times N\right)\right]}{-0.088+\left(N\times1.01\times10^{-4}\right)} \tag{61}$$

$$R_{Y4}=\frac{T-\left[17.19-\left(0.067171\times N\right)\right]}{-0.078-\left(N\times2.727\times10^{-4}\right)} \tag{62}$$

$$R_{Y5}=\frac{T-10.54}{-0.051} \tag{63}$$

ตัวอย่างสีเขียว ทำการจับคู่สมการ T_{G1} และ T_{G2} ,T_{G2} กับ T_{G3} , T_{G3} กับ T_{G4}, T_{G4} กับ T_{G5} จะได้สมการสำหรับหาค่า R ดังสมการ 69 ถึง 73

$$R_{G1}=\frac{T-[66.50-\left(0.2841\times N\right)]}{-0.042+\left(N\times1.01\times10^{-5}\right)} \tag{64}$$

$$R_{G2}=\frac{T-[38.37-\left(0.149394\times N\right)]}{-0.041+\left(N\times2.02\times10^{-5}\right)} \tag{65}$$

$$R_{G3}=\frac{T-[23.58-\left(0.0937\times N\right)]}{-0.039+\left(N\times4.04\times10^{-5}\right)} \tag{66}$$

$$R_{G4}=\frac{T-[14.30-\left(0.05516\times N\right)]}{-0.035+\left(N\times1.414\times10^{-4}\right)} \tag{67}$$

$$R_{G5}=\frac{T-8.839}{-0.021} \tag{68}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวอย่างสีม่วง ทำการจับคู่สมการ T_{P1}และ T_{P2} ,T_{P2} กับ T_{P3} , T_{P3} กับ T_{P4}, T_{P4} กับ T_{P5} จะได้สมการสำหรับหาค่า R ดังสมการ 64 ถึง 68

$$R_{P1} = \frac{T - \left[69.98 - \left(0.29282 \times N\right)\right]}{-0.111 + \left(N \times 8.08 \times 10^{-5}\right)} \tag{69}$$

$$R_{P2} = \frac{T - \left[40.99 - \left(0.1671717 \times N\right)\right]}{-0.103 + \left(N \times 3.636 \times 10^{-4}\right)} \tag{70}$$

$$R_{P3} = \frac{T - \left[24.44 - \left(0.09393 \times N\right)\right]}{-0.067 + \left(N \times 1.616 \times 10^{-4}\right)} \tag{71}$$

$$R_{P4} = \frac{T - [15.14 - \left(0.05829 \times N\right)]}{-0.051 + \left(N \times 1.515 \times 10^{-4}\right)} \tag{72}$$

$$R_{P5} = \frac{T - 9.369}{-0.036} \tag{73}$$

9.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและค่าความทนแรงดึง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 44 ถึง 73 จะสามารถหาอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลได้ และนำค่าอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิล มาแทนค่าในสมการที่ 8 จะได้ค่าความทนแรงดึง

9.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและค่าความทนแรงกระแทก

เมื่อนำค่าอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลจากสมการที่ 44 ถึง 73 มาแทนค่าลงในสมการของค่าความทนแรงกระแทกกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 9 จะสามารถคำนวณหาค่าความทนแรงกระแทกได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

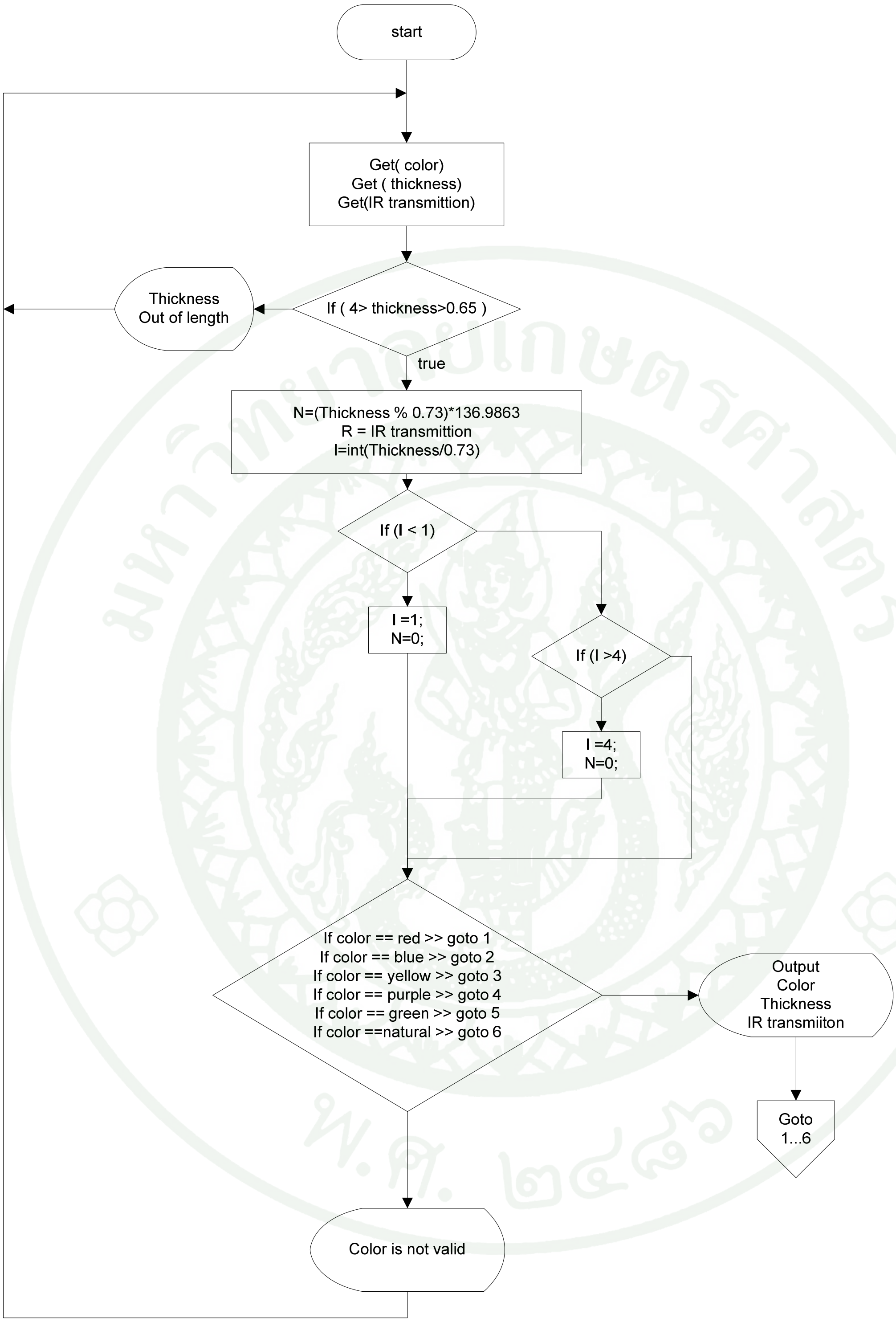
10. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของพลาสติกรีไซเคิล

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นได้แก่ อัตราส่วนผสม รีไซเคิล, ความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทก จะเห็นว่าทั้งหมดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ดังสมการที่ 44 ถึง 73 จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนโปรแกรมให้หน่วยประมวลผลรับค่าจากเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ เซนเซอร์วัดสี และไมโครมิเตอร์วัดความหนา จากนั้นคำนวณและแสดงผลจากการคำนวณออกทางหน้าจอ

เริ่มต้นการใช้โปรแกรมจะรอคำสั่งจากผู้ใช้ให้เริ่มต้นการทำงาน เมื่อสั่งให้เริ่มทำงาน จะรับค่าจากเซนเซอร์มา 3 ค่า คือ อัตราการส่งผ่านของแสง ค่าสี และค่าความหนาของชิ้นงานพลาสติก ถ้าความหนาและสีของพลาสติกไม่เป็นไปตามการทำตัวอย่างตามข้อกำหนด จะไม่สามารถคำนวณได้ เช่น สีไม่ตรงกับสีที่ได้ทำการทดลอง หรือ พลาสติกมีความบางเกินไป หรือหนาเกินไปจะไม่สามารถคำนวณได้เช่นกัน แสดงการทำงานเป็นขั้นตอนดังภาพที่ 59

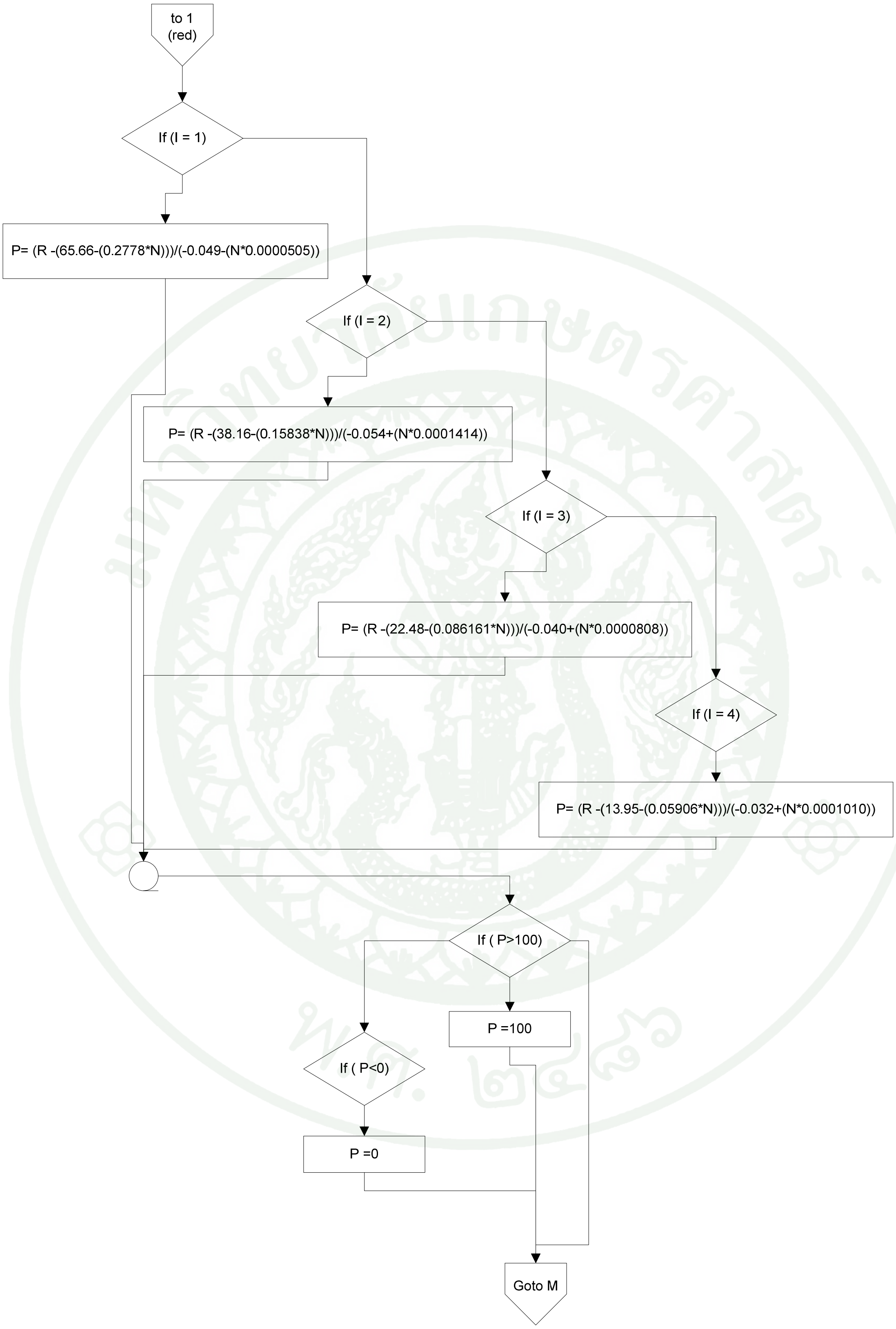
หลังจากเซนเซอร์วัดสีและความหนาเรียบร้อยแล้ว จะนำไปคำนวณแยกตามสมการความหนาและสีต่างๆที่ตรงกับเงื่อนไขของชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ โดยจะนำค่าอัตราการส่งผ่านของแสงไปคำนวณในสมการนั้นๆ เพื่อหาว่ามีอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลกี่เปอร์เซ็นต์ ขั้นตอนแสดงในภาพที่ 60 ถึง 67 หลังจากทราบอัตราส่วนผสม จะเป็นการนำอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณข้างต้นไปเทียบกับสมการค่าความทนแรงดึง และค่าทนแรงกระแทก และทำการแสดงผลในลำดับสุดท้ายมีลำดับการทำงานดังภาพที่ 66 โดยลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรม โดยมีหน้าจอของโปรแกรมดังภาพที่ 67

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



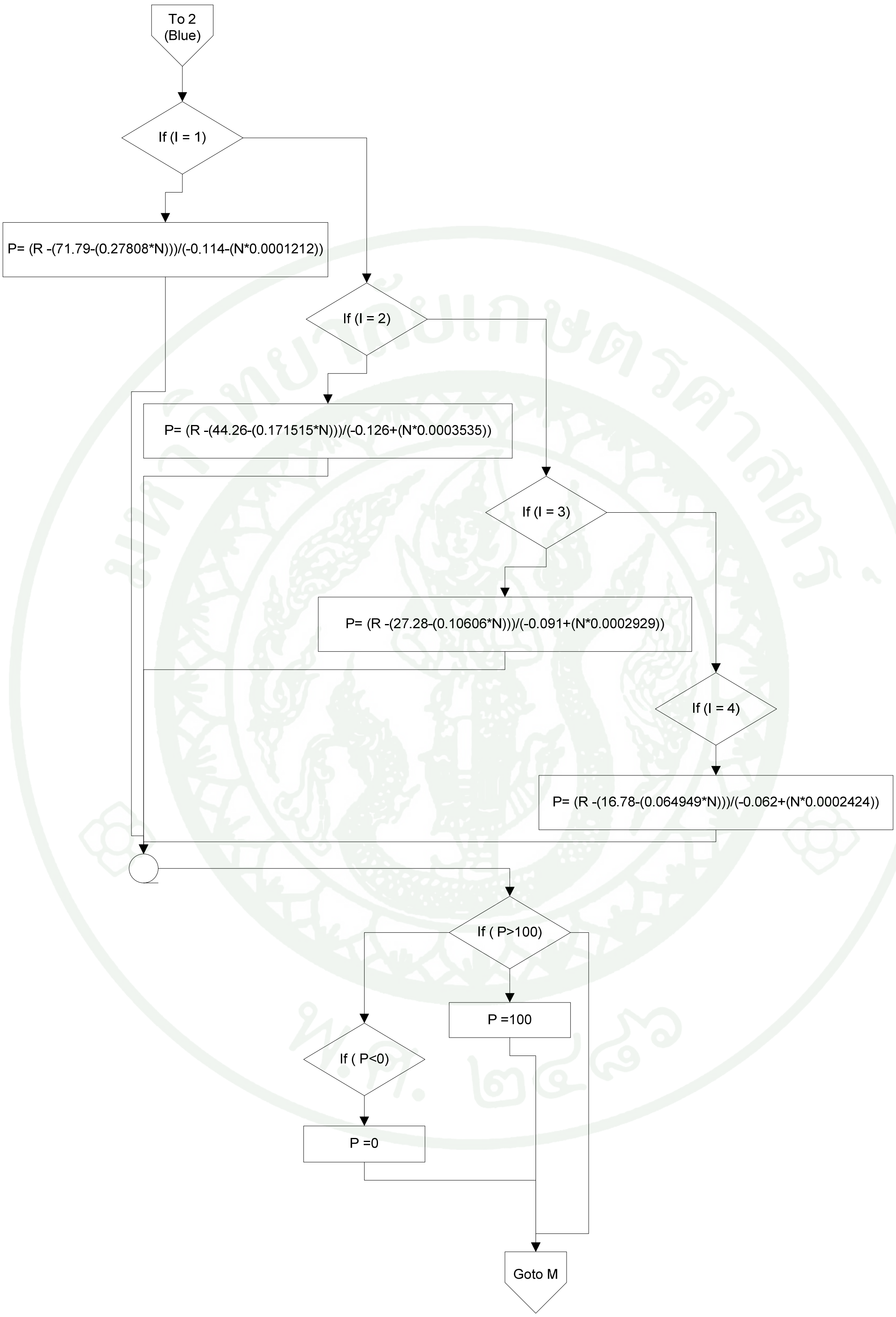
ภาพที่ 59 แผนภาพของการปรับค่าจากการวัดความหนา และวัดค่าจากเซ็นเซอร์สี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



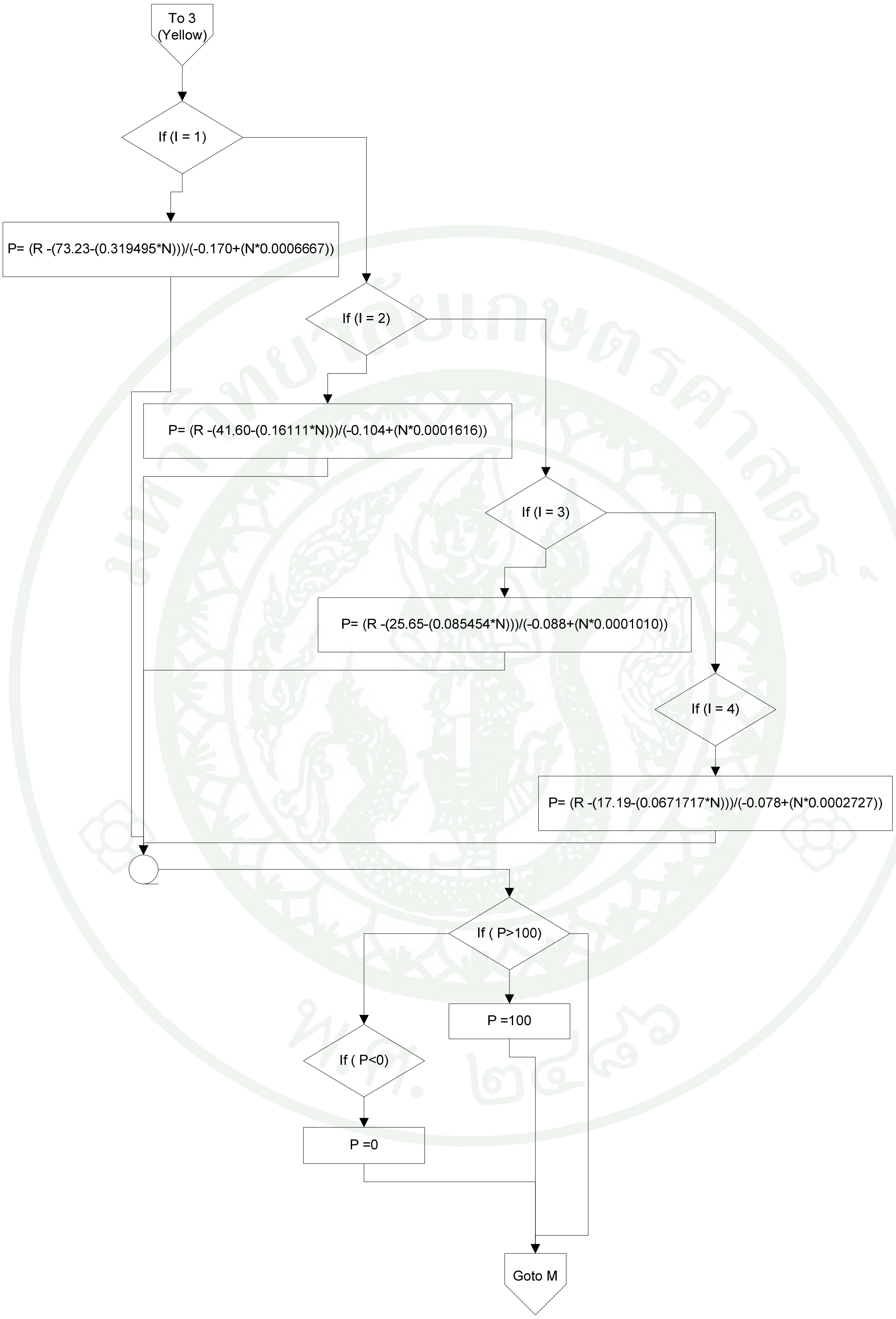
ภาพที่ 60 แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีแดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



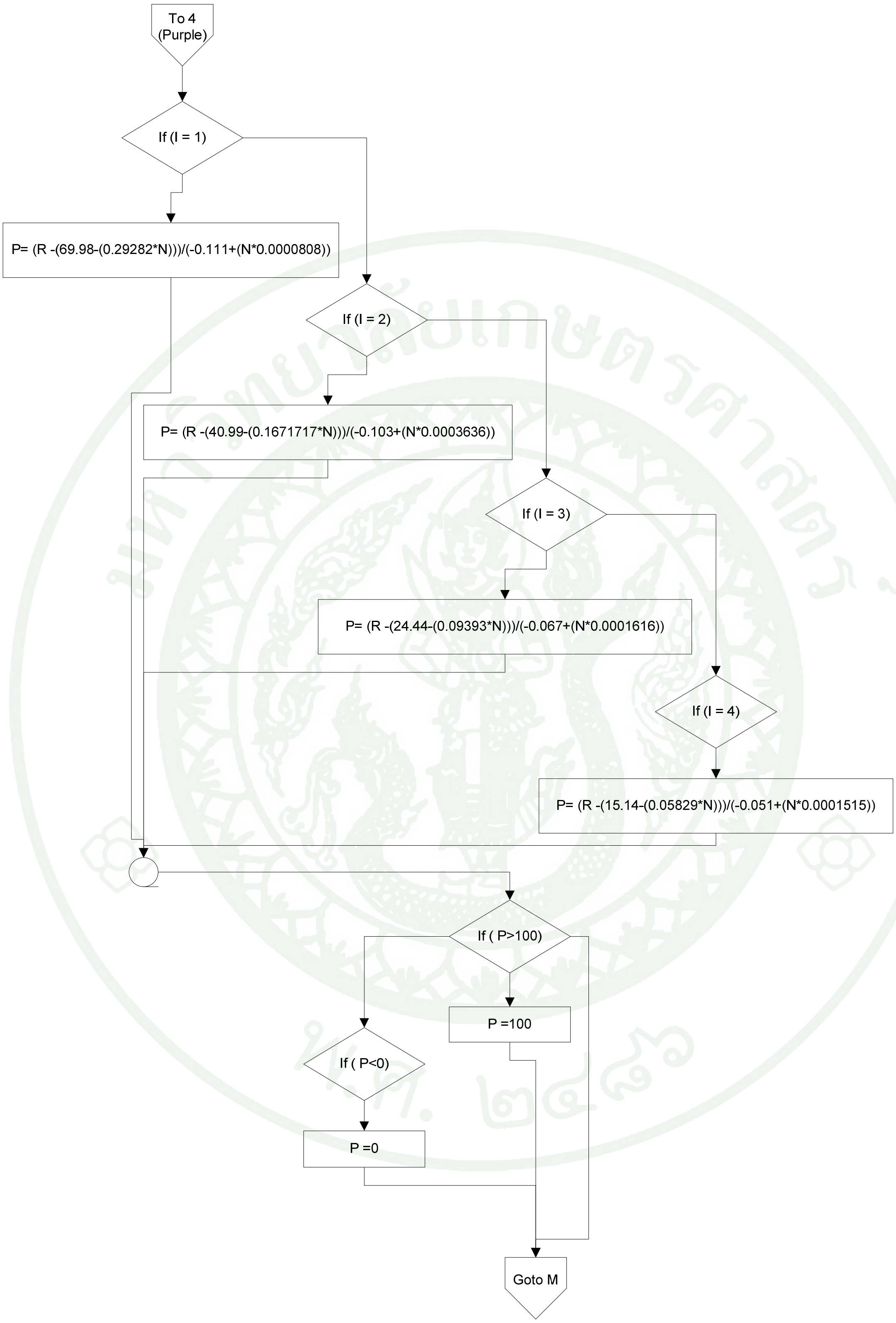
ภาพที่ 61 แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีน้ำเงิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



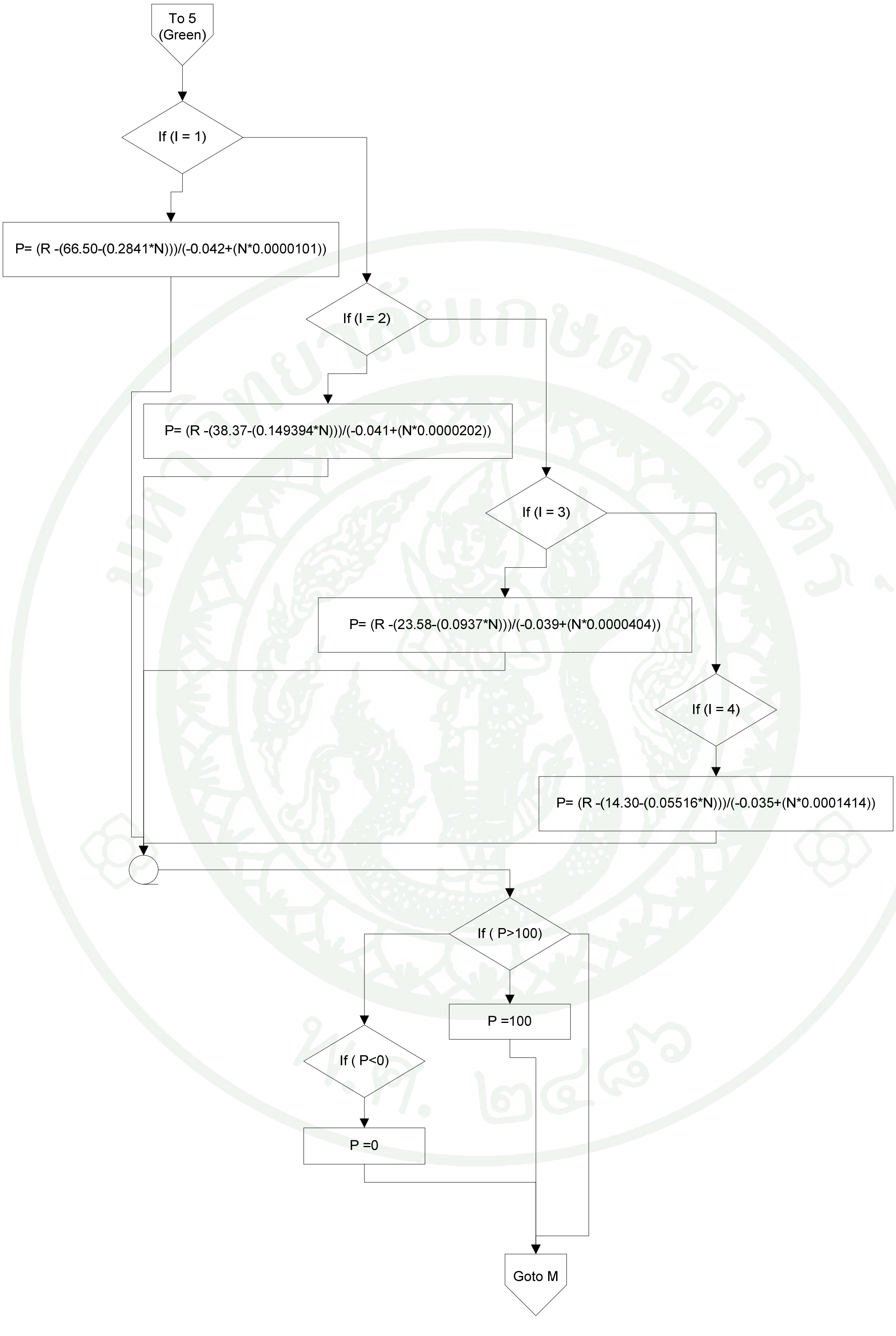
ภาพที่ 62 แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีเหลือง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



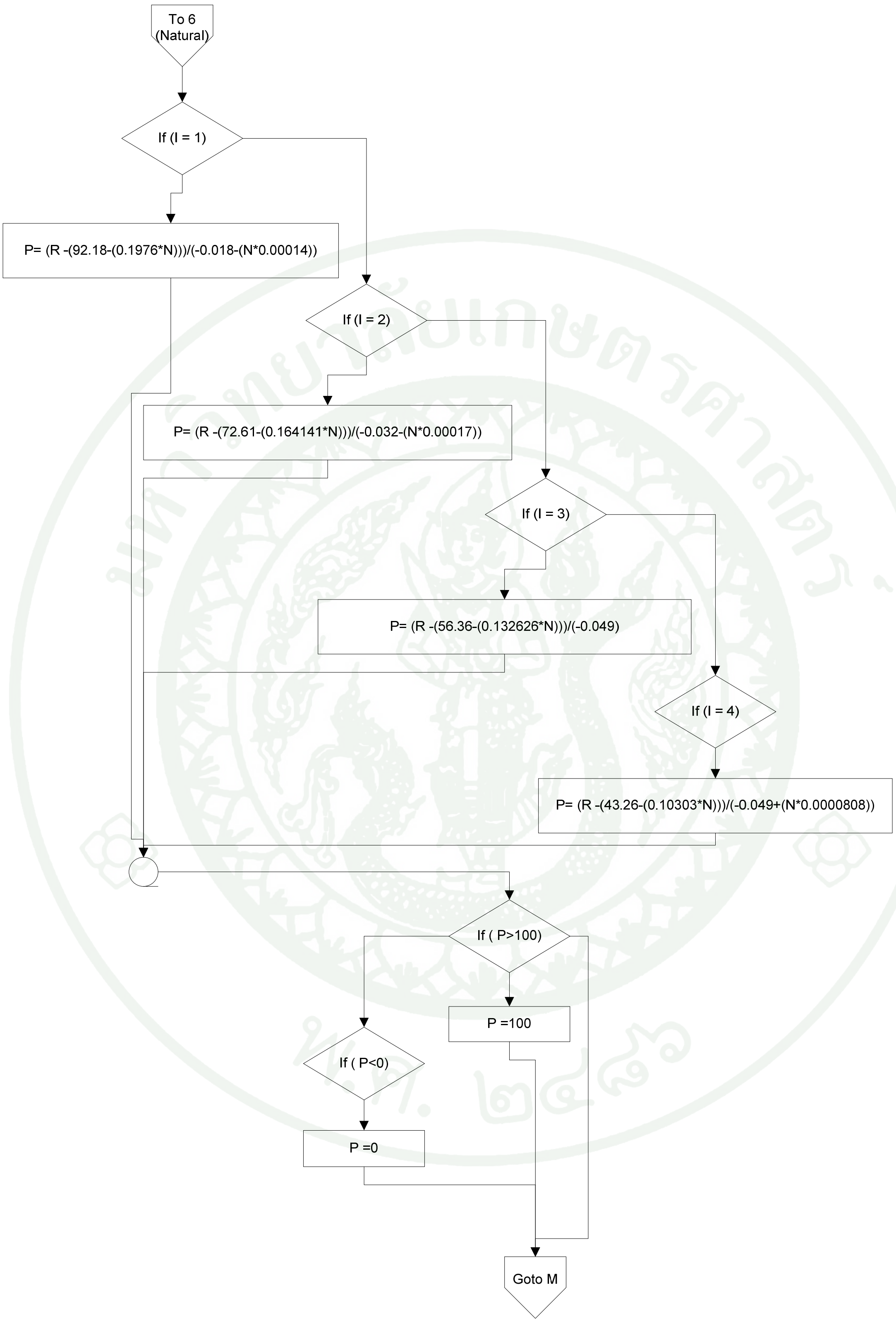
ภาพที่ 63 แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



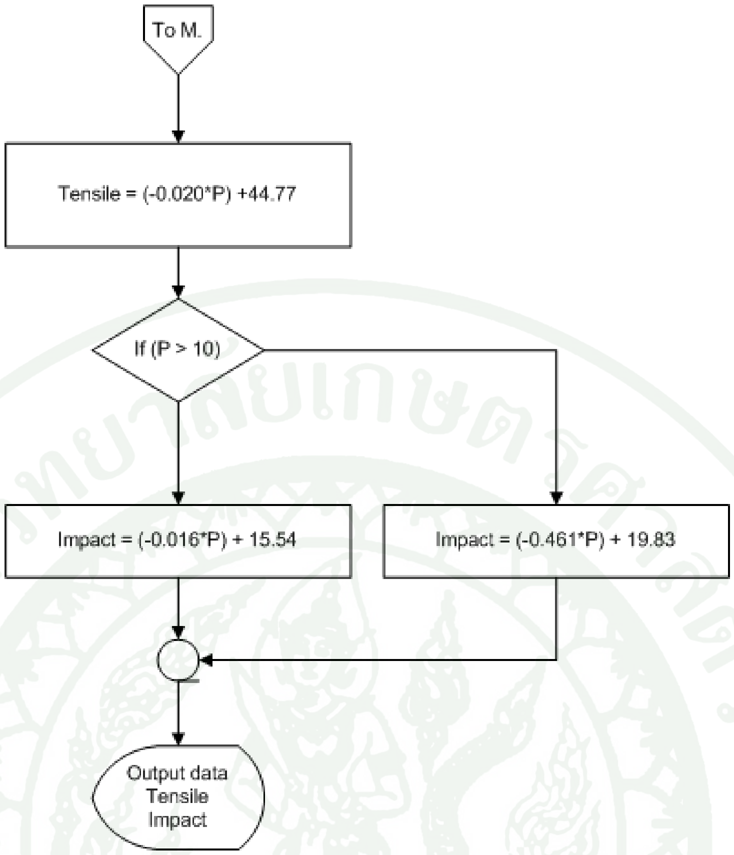
ภาพที่ 64 แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกสีเขียว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

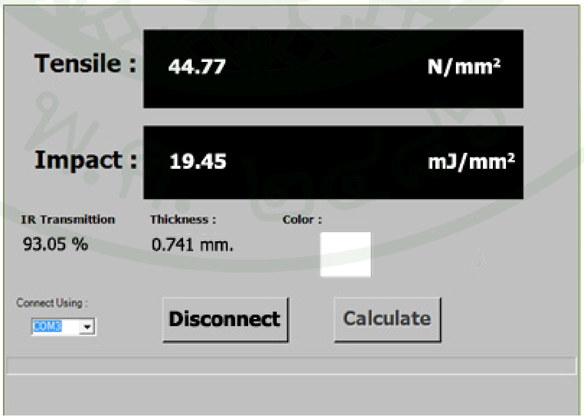


ภาพที่ 65 แผนภาพของการคำนวณสมการของพลาสติกชนิดไม่มีสี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 66 การคำนวณค่าทนแรงดึง และทนแรงกระแทก



ภาพที่ 67 หน้าจอของโปรแกรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

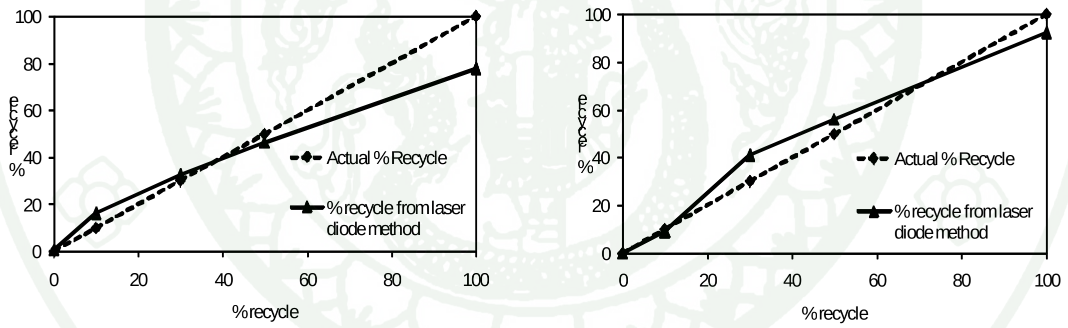
ผลและวิจารณ์

ผล

จากการทดลองใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ มิเตอร์วัดความหนา และตัวอย่างค่าสีที่สร้างขึ้นตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลได้ผลดังนี้

1. ผลการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง

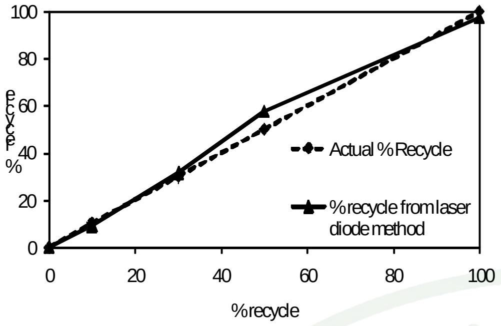
เมื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิลจริงก่อนการนำไปขึ้นรูปพลาสติกกับอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลที่วัดได้จากการทดสอบทางแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดจะได้ผลดังภาพที่ 68 ถึง 72 โดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร 1.46 มิลลิเมตร 2.19 มิลลิเมตร 2.92 มิลลิเมตร 3.65 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยชิ้นงานมีสีที่แตกต่างกัน



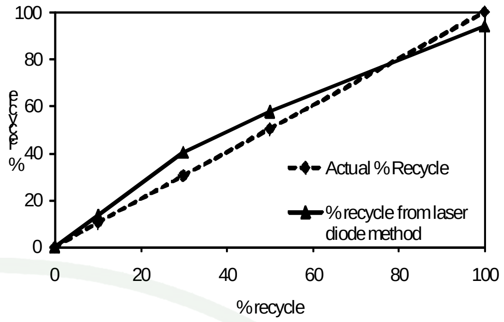
(ก) (ข)

ภาพที่ 68 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

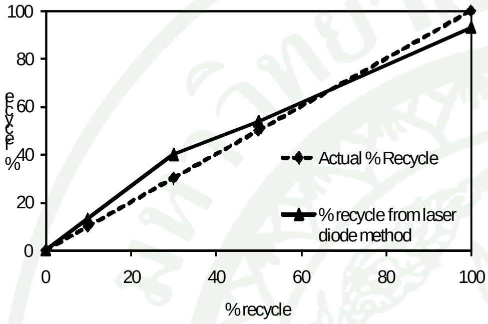
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



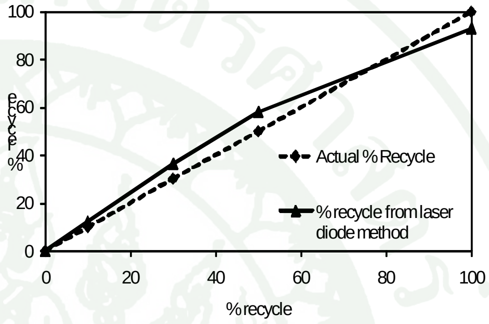
(ค)



(ง)

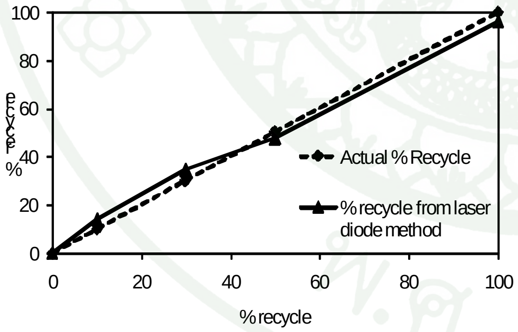


(จ)

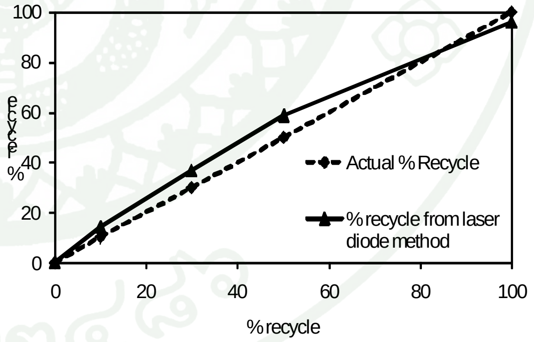


(ฉ)

ภาพที่ 68 (ต่อ)



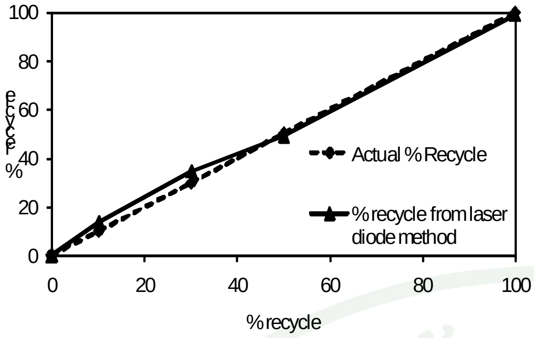
(ก)

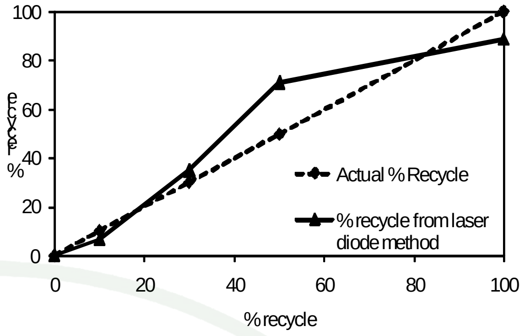


(ข)

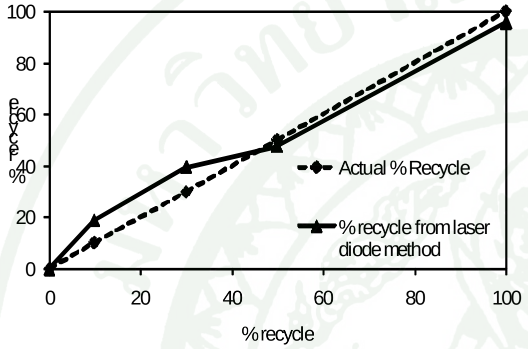
ภาพที่ 69 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 1.46 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

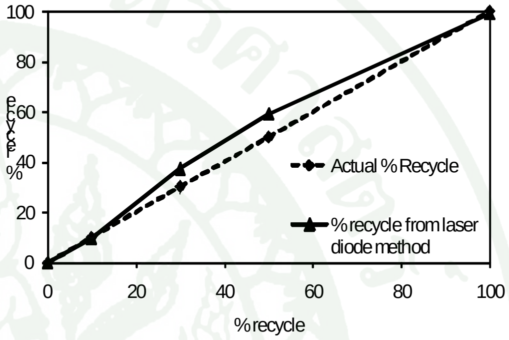
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





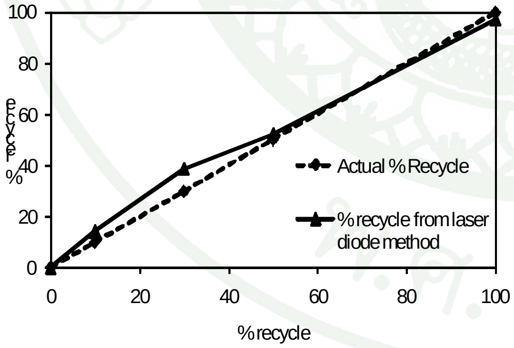
(ค) (ง)

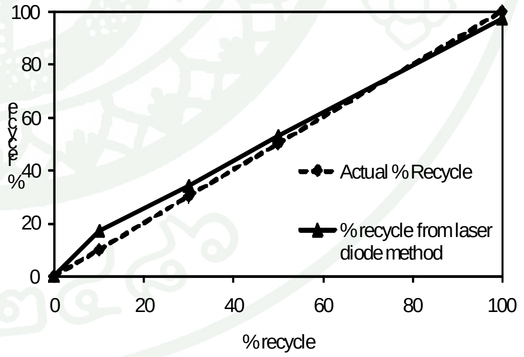




(จ) (ฉ)

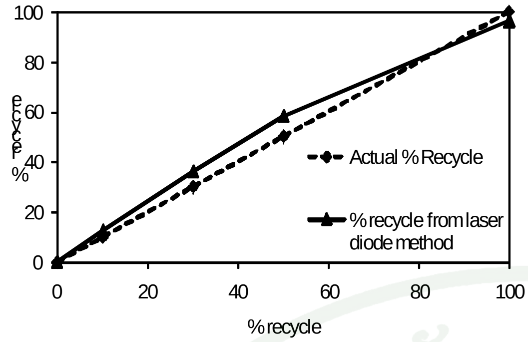
ภาพที่ 69 (ต่อ)



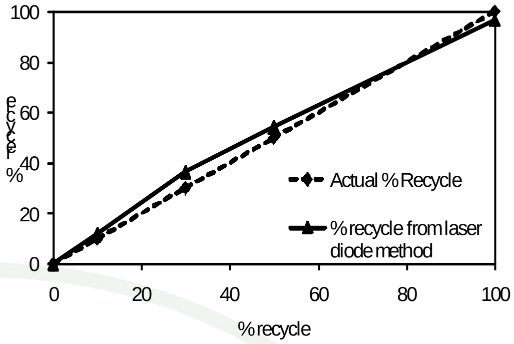


(ก) (ข)

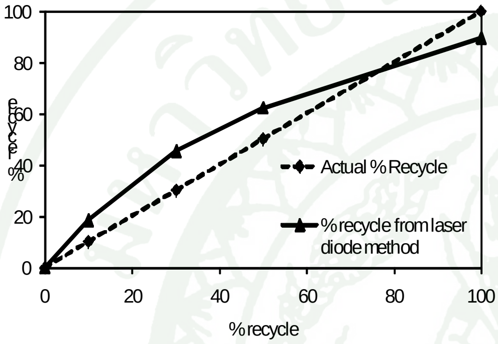
ภาพที่ 70 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.19 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ)ชิ้นงานสีม่วง



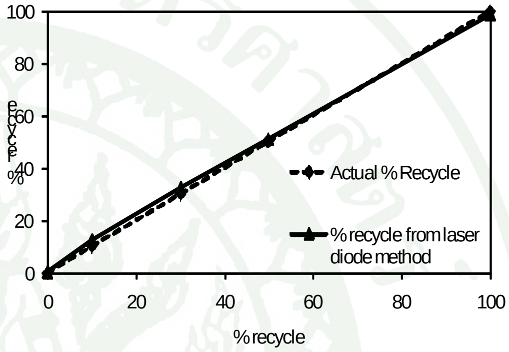
(ค)



(ง)

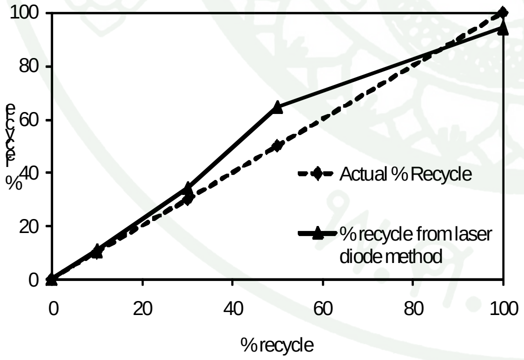


(จ)

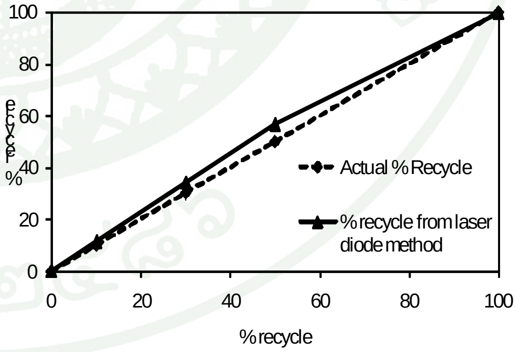


(ฉ)

ภาพที่ 70 (ต่อ)



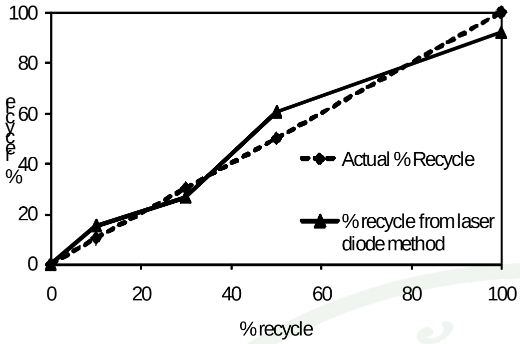
(ก)



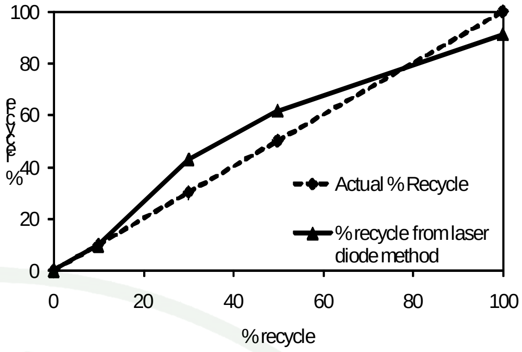
(ข)

ภาพที่ 71 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.92 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

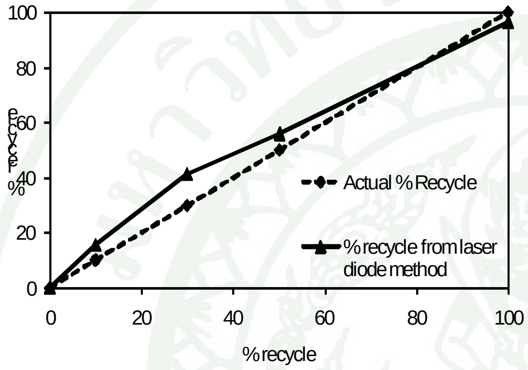
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



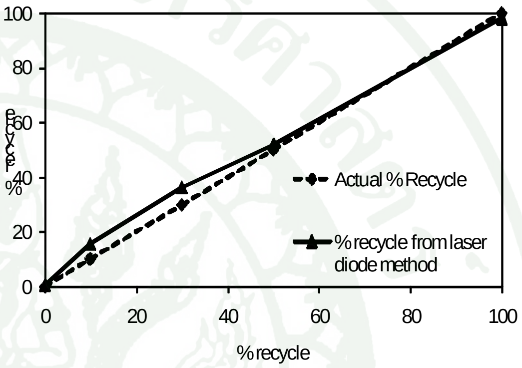
(ค)



(ง)

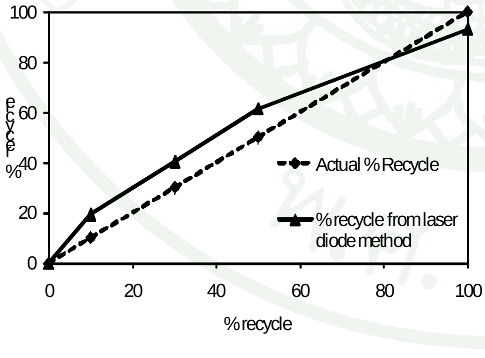


(จ)

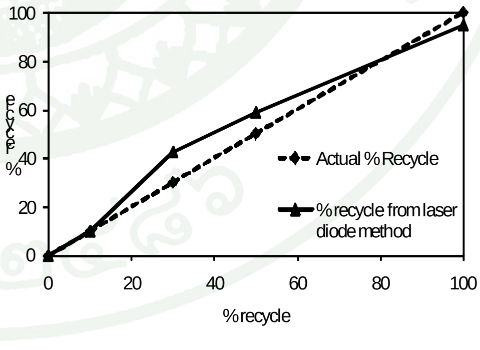


(ฉ)

ภาพที่ 71 (ต่อ)



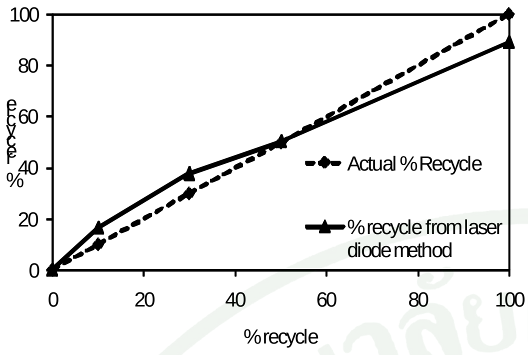
(ก)



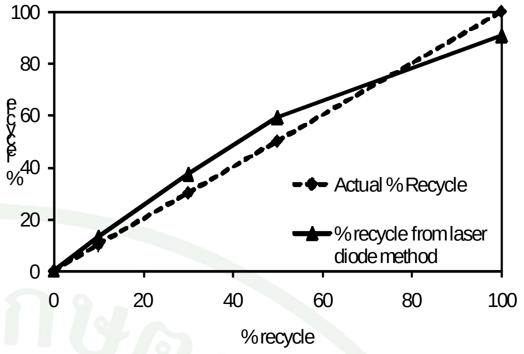
(ข)

ภาพที่ 72 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลจริงกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 3.65มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ)ชิ้นงานสีม่วง

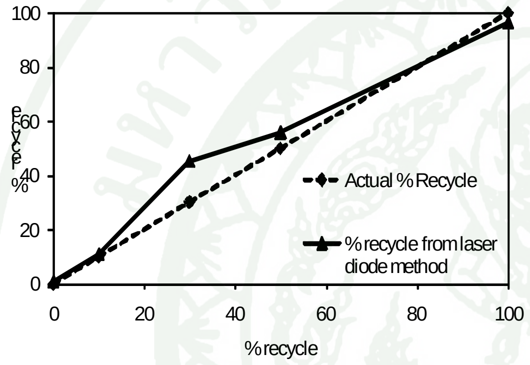
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



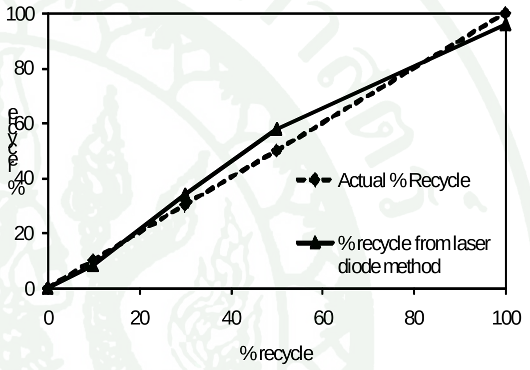
(ค)



(ง)



(จ)



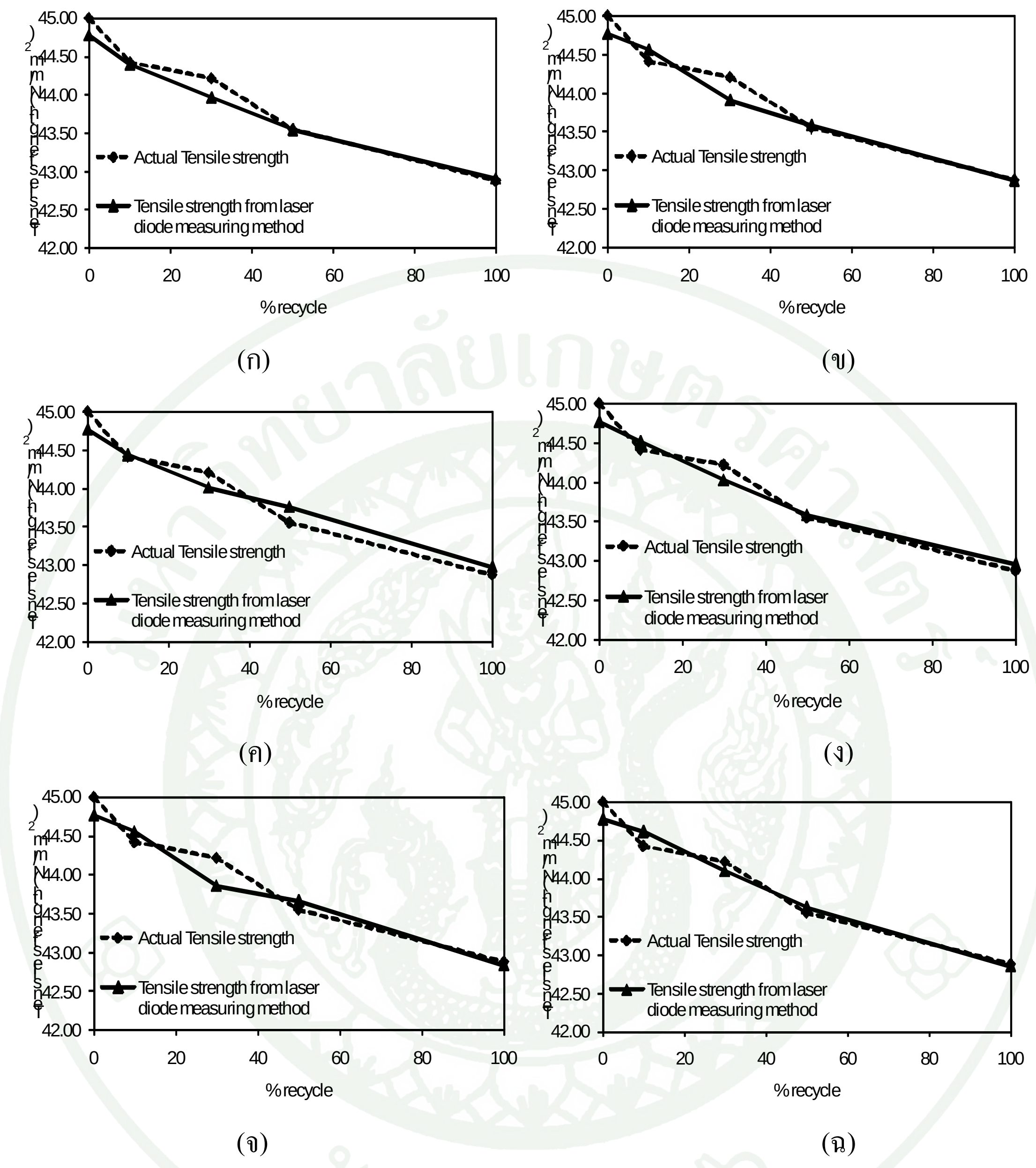
(ฉ)

ภาพที่ 72 (ต่อ)

2. ผลการตรวจวัดค่าทนแรงดึง

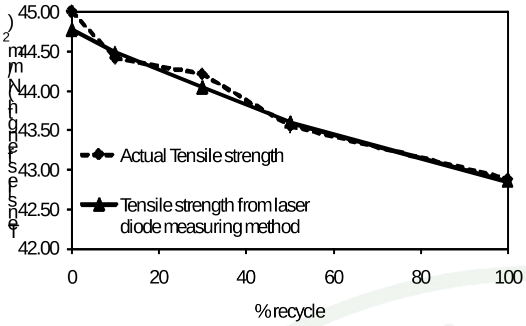
เมื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลระหว่างค่าทนแรงดึงจริงที่วัดจากเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลของพลาสติกกับค่าทนแรงดึงที่วัดได้จากการทดสอบทางแสงโดยใช้เลเซอร์ไดโอดจะได้ผลดังภาพที่ 73 ถึง 77 โดยแสดงค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลโดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร 1.46 มิลลิเมตร 2.19 มิลลิเมตร 2.92 มิลลิเมตร 3.65 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยชิ้นงานมีสีที่แตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

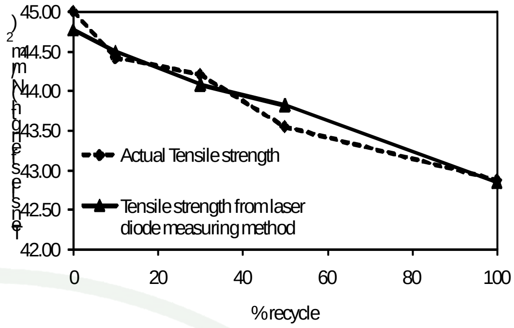


ภาพที่ 73 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสี-น้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

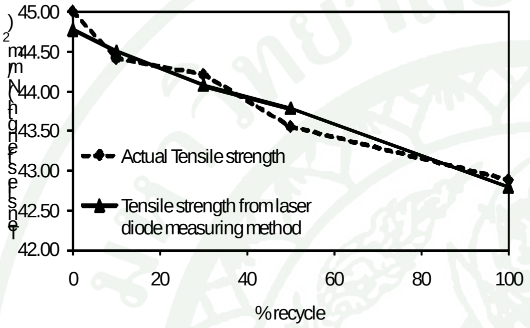
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



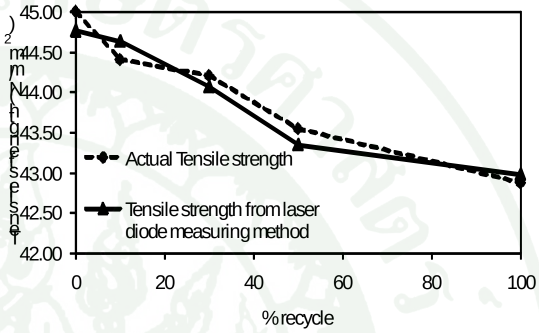
(ก)



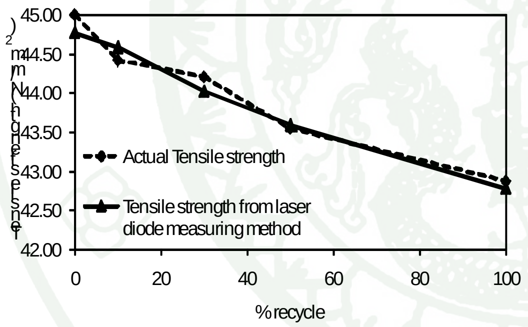
(ข)



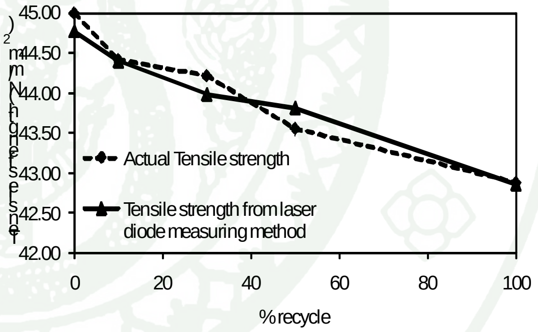
(ค)



(ง)



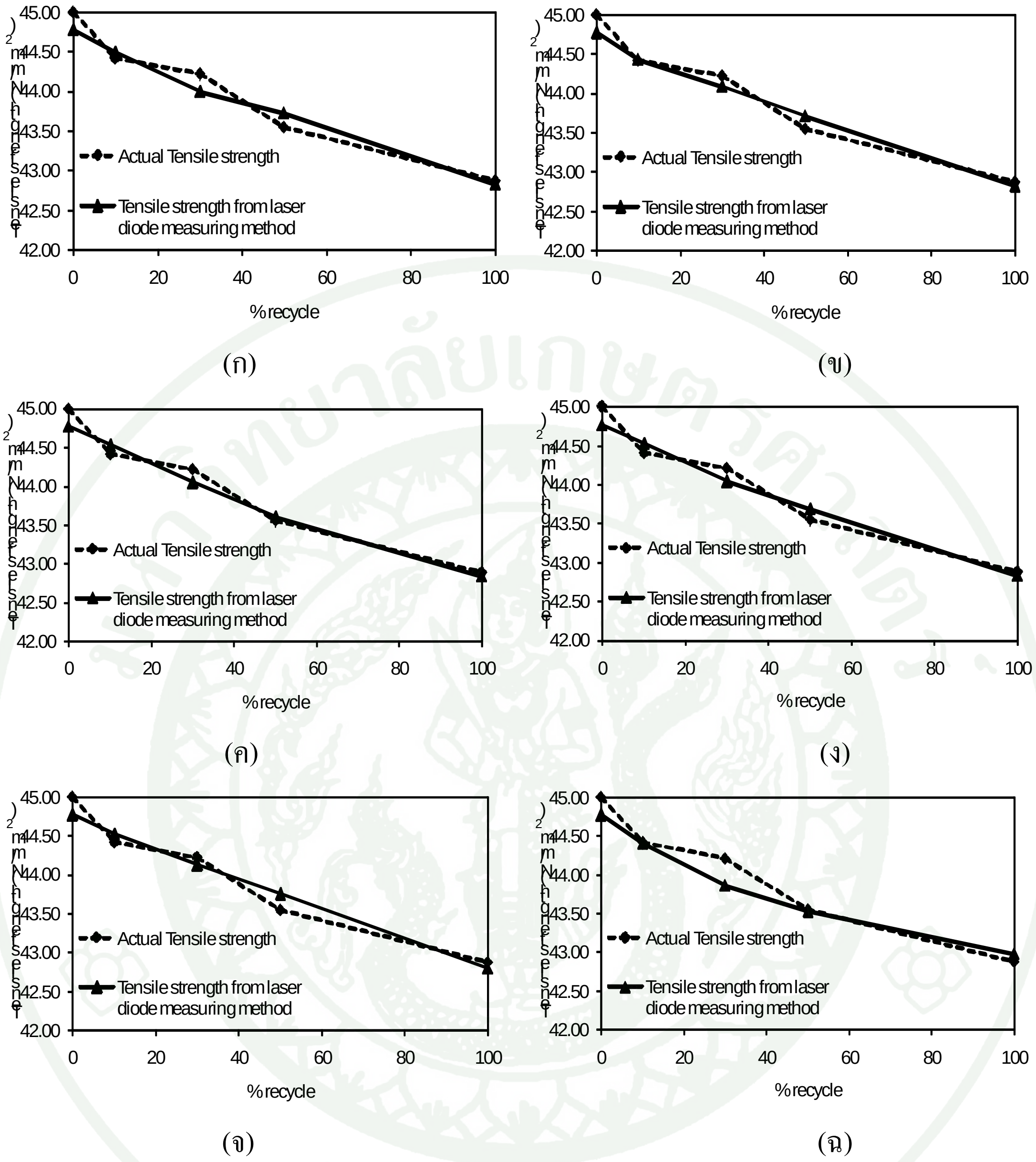
(จ)



(ฉ)

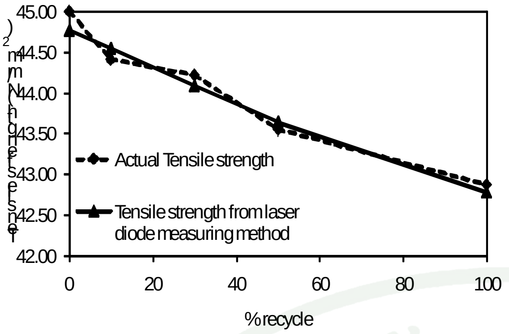
ภาพที่ 74 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 1.46 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

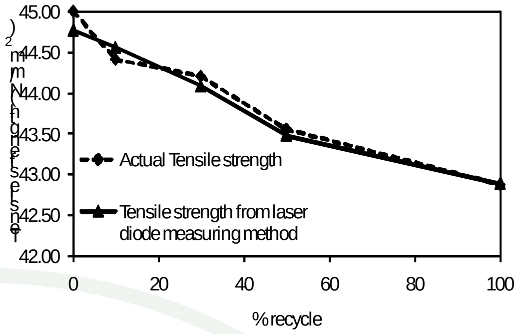


ภาพที่ 75 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.19 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

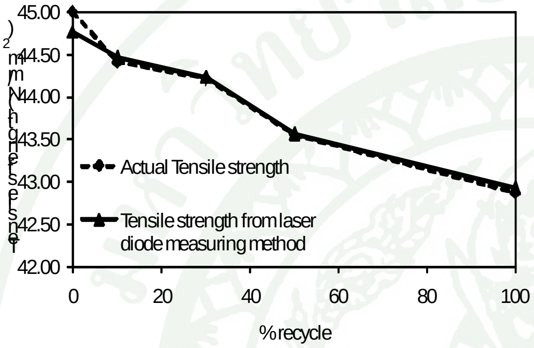
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



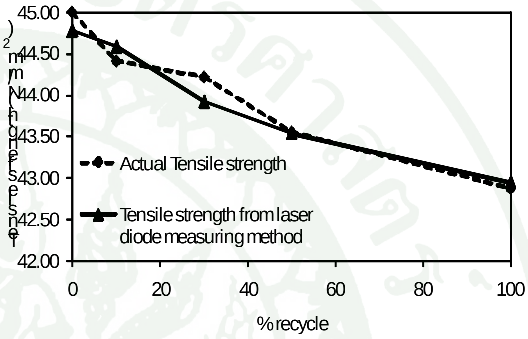
(ก)



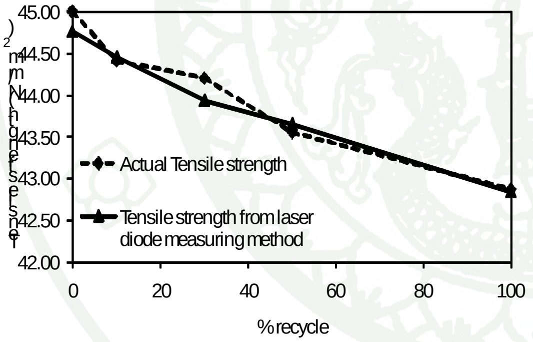
(ข)



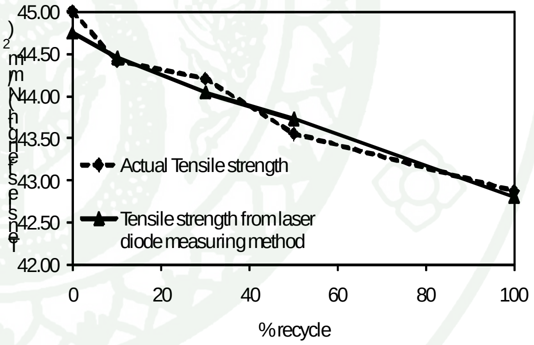
(ค)



(ง)



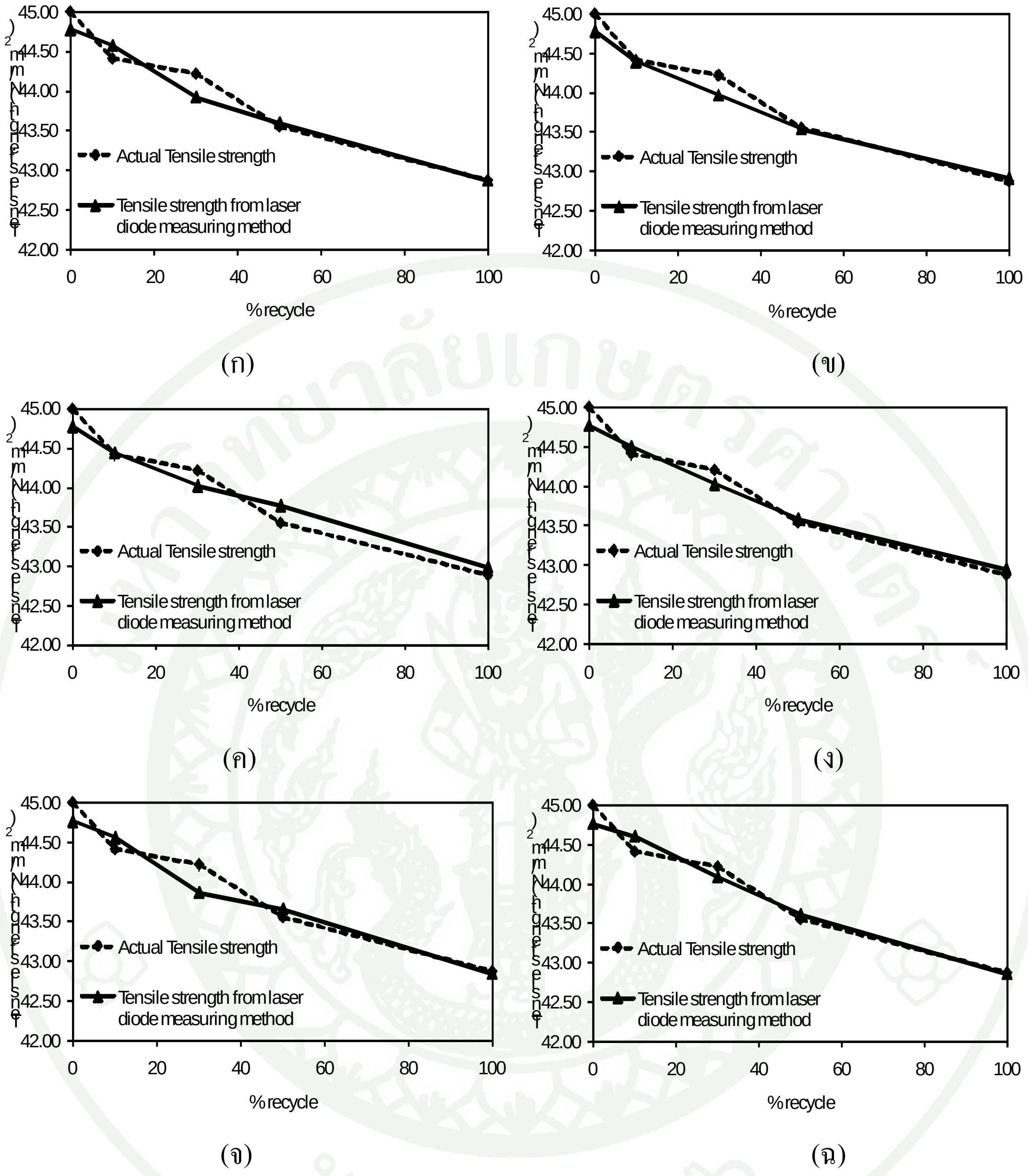
(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 76 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.92 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



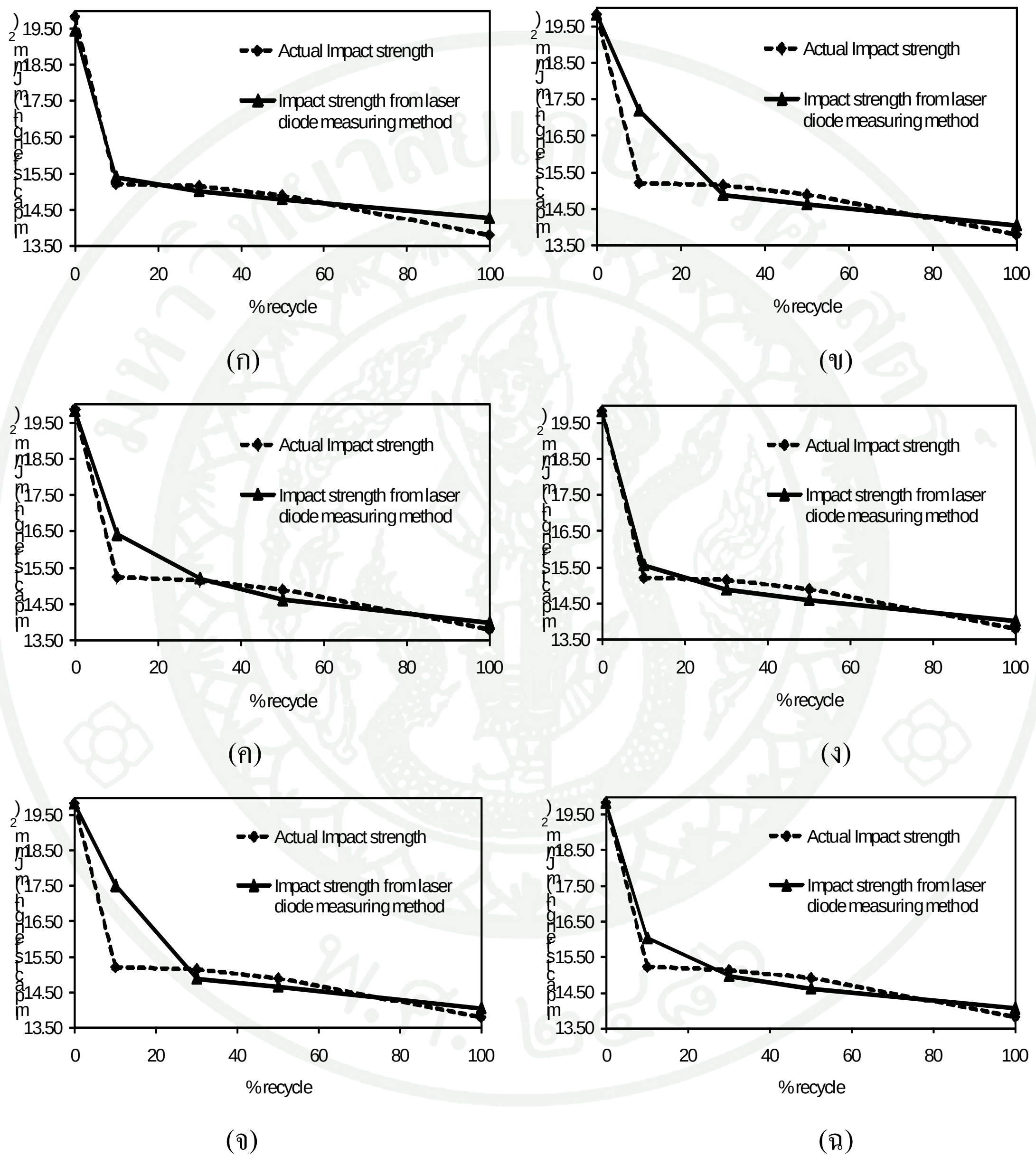
ภาพที่ 77 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงจริงจริงกับค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดโดยวัดจากชิ้นงานหนา 3.65 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข) ชิ้นงานสีน้ำ-เงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

3. ผลการตรวจวัดค่าทนแรงกระแทก

เมื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลระหว่างค่าทนแรงกระแทกจริงที่วัดจากเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลของพลาสติกกับค่าทนแรงกระแทกที่วัดได้จากการทดสอบทางแสงโดยใช้

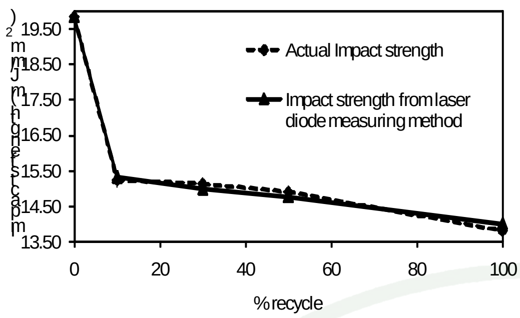
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เลเซอร์ไดโอด จะได้ผลดังภาพที่ 78 ถึง 82 โดยแสดงค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลโดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร 1.46 มิลลิเมตร 2.19 มิลลิเมตร 2.92 มิลลิเมตร 3.65 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยชิ้นงานมีสีที่แตกต่างกัน

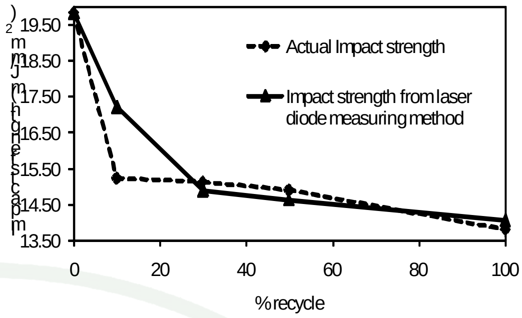


ภาพที่ 78 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 0.73 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข)ชิ้นงาน สีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

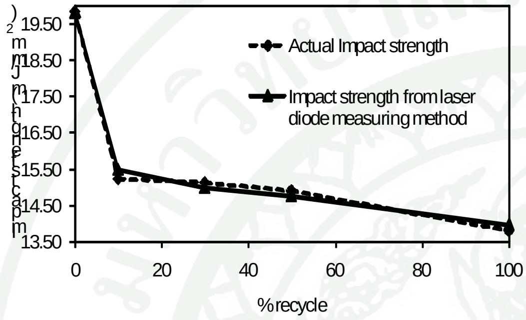
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



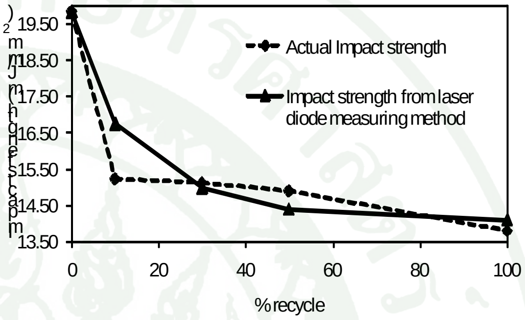
(ก)



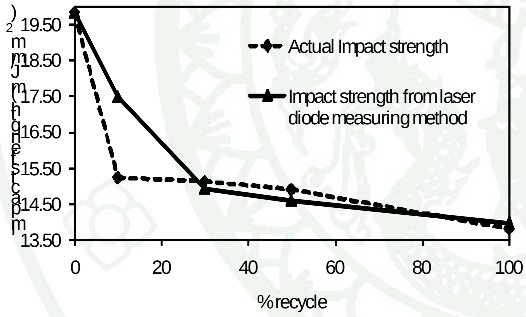
(ข)



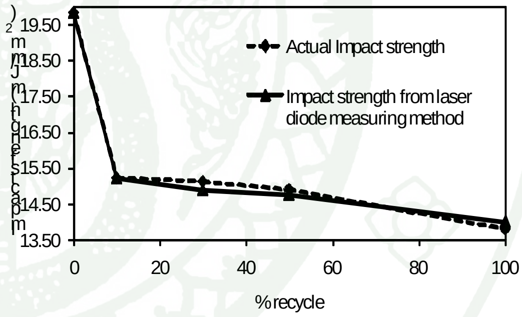
(ค)



(ง)



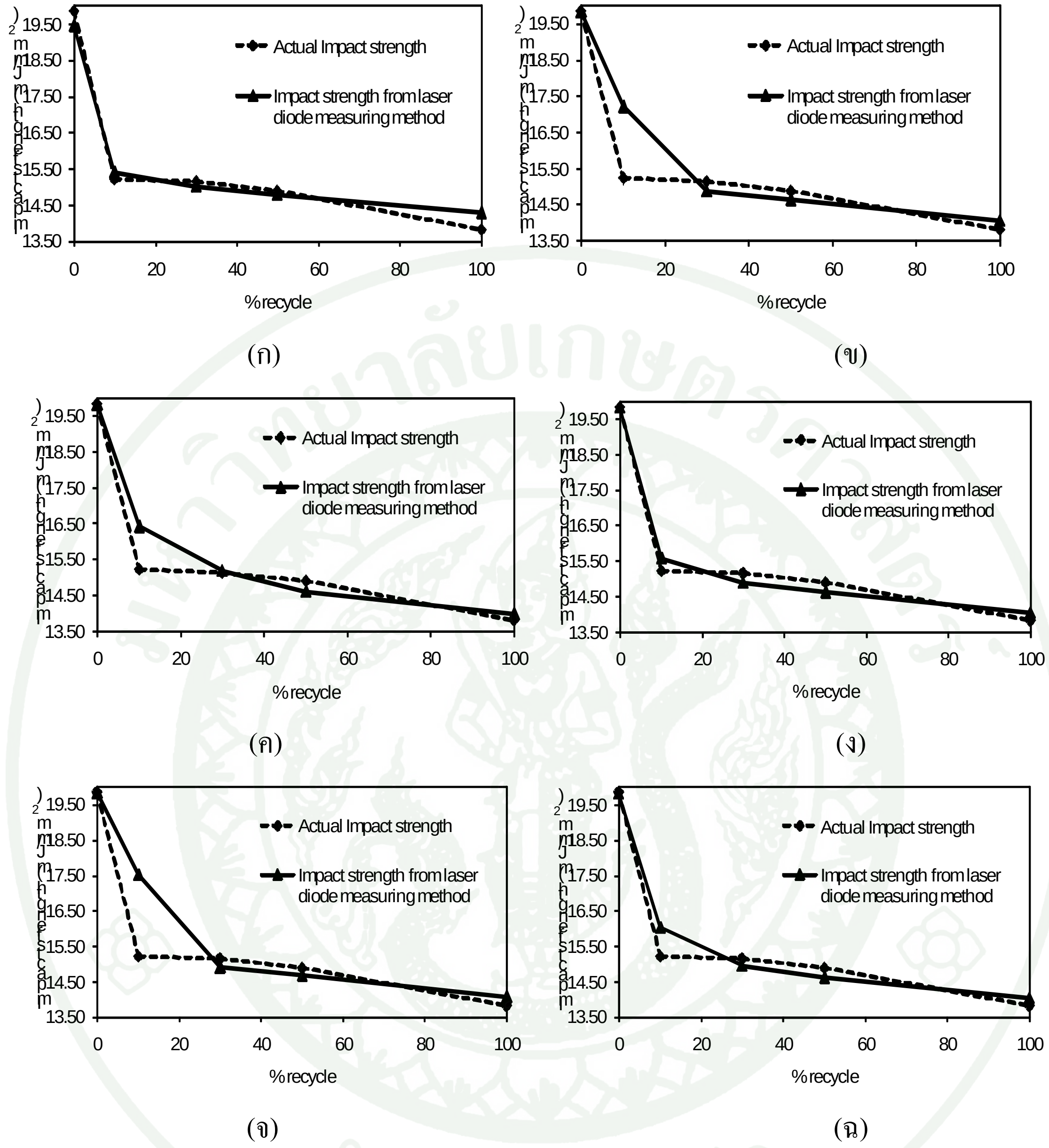
(จ)



(ฉ)

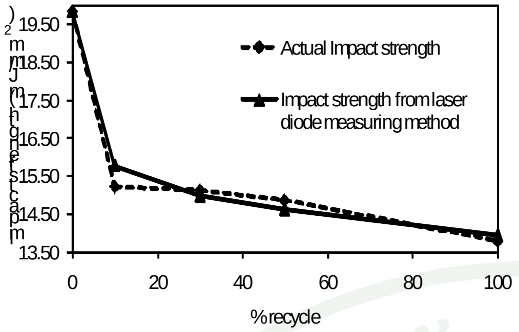
ภาพที่ 79 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 1.46 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข)ชิ้นงาน สีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

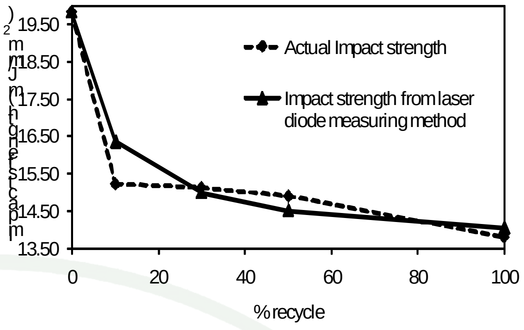


ภาพที่ 80 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.19 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข)ชิ้นงาน สีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

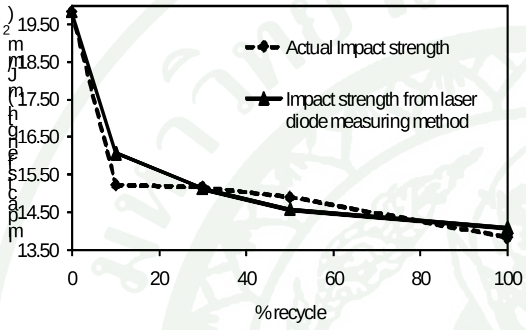
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



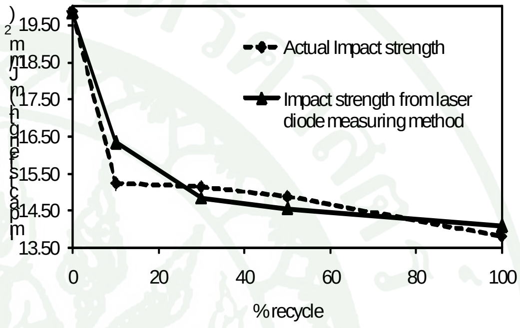
(ก)



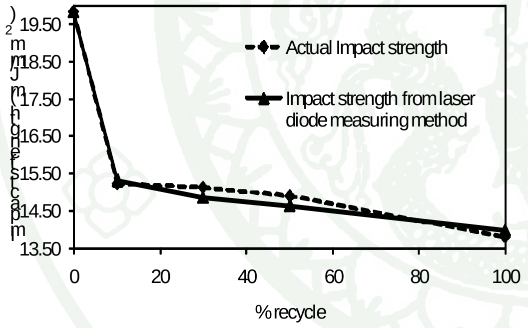
(ข)



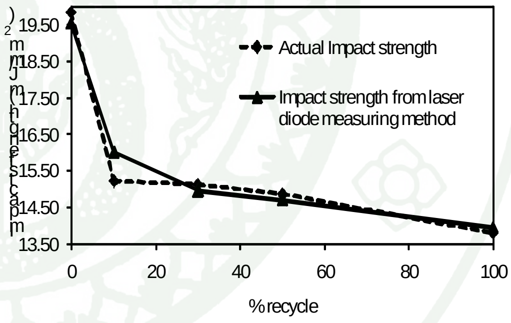
(ค)



(ง)



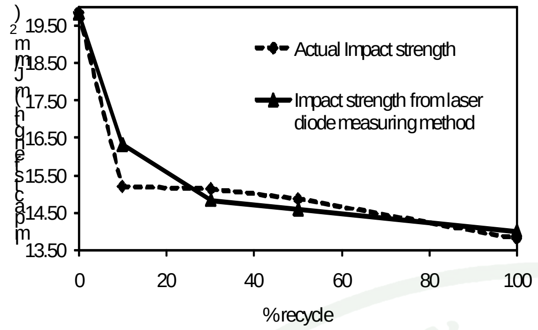
(จ)



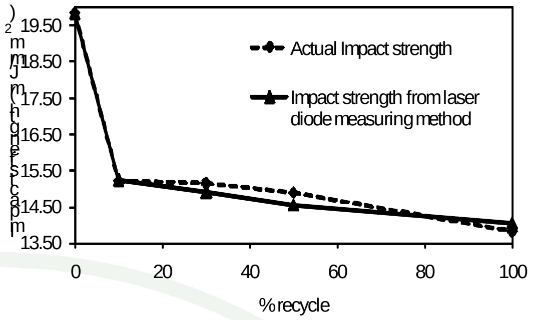
(ฉ)

ภาพที่ 81 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 2.92 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข)ชิ้นงาน สีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

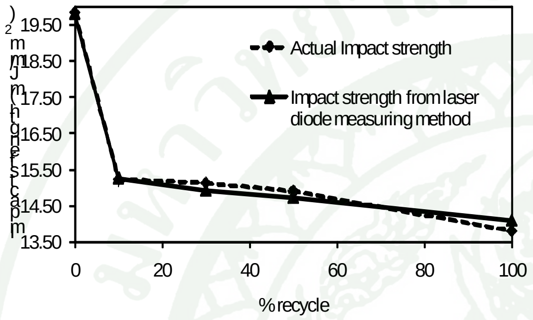
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



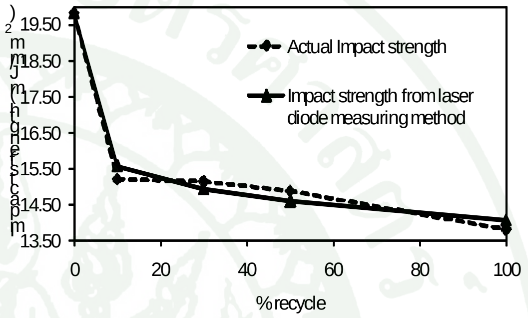
(ก)



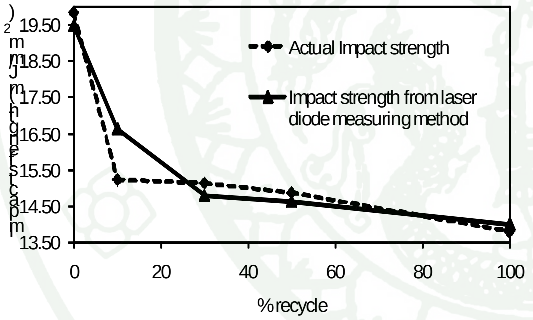
(ข)



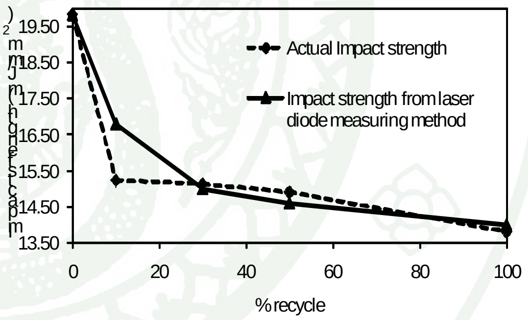
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 82 แสดงการเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกจริงจริงกับค่าทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอด โดยวัดจากชิ้นงานหนา 3.65 มิลลิเมตร (ก) ชิ้นงานไม่มีสี (ข)ชิ้นงาน สีน้ำเงิน (ค) ชิ้นงานสีแดง (ง) ชิ้นงานสีเหลือง (จ) ชิ้นงานสีเขียว (ฉ) ชิ้นงานสีม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

1. ผลของสีต่อสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

เนื่องจากสีที่นำมาผสมมีสารทึบแสง เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 53 ถึง 58 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการผสมสี อัตราการผ่านของแสงจะมีค่าต่ำกว่าพลาสติกที่ไม่ได้ทำการผสมสี และเมื่อพิจารณาสมการที่ 13 ถึง 42 ซึ่งเป็นค่าสมการหาอัตราส่วนผสมของพลาสติกเมื่อวัดค่าอัตราการส่งผ่านของแสง จะเห็นได้ว่า สมการของพลาสติกที่มีสีต่างๆ จะมีค่าความชันของสมการมากกว่าสมการที่ไม่มีการผสมสี การที่มีค่าความชันมากกว่า จะสามารถนำไปแบ่งแยกอัตราส่วนผสมของพลาสติกได้ถูกต้องกว่าและ จะมีความผิดพลาดที่น้อยกว่าด้วย

2. การตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและสมบัติทางกลบางประการด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

จากผลการทดลองตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่มีสี ความหนาและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างกันทั้งหมด 150 ชิ้น พบว่าวิธีการใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์สามารถตรวจวัดคุณลักษณะต่างๆได้ อย่างไรก็ตามค่าคุณสมบัติทางกลที่ตรวจวัดได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ตรวจวัดด้วยวิธีทั่วไป งานวิจัยนี้เลือกใช้การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนทางสถิติด้วยวิธี Normalized Root Mean Square Error (*NRMSE*) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 74 ค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ซึ่งเกิดจากค่าที่วัดได้จากสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นเบี่ยงเบนไปจากค่าที่วัดได้จริงจากการเตรียมตัวอย่าง การวัดค่าความทนแรงดึงด้วย Universal testing machine ค่าความทนแรงกระแทกด้วย Pendulum impact tester ดังแสดงในตารางที่ 4

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100 \qquad (74)$$

เมื่อ e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงที่วัดได้กับค่าที่ประมาณได้

x_{max} = ค่าสูงสุดของค่าจริงที่วัดได้

x_{min} = ค่าต่ำสุดของค่าจริงที่วัดได้

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการตรวจวัด	*NRMSE* (%) วัดจากเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์
อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (จากการเตรียมตัวอย่าง)	13.89
ค่าความทนแรงดึง (Universal testing machine)	14.77
ค่าความทนแรงกระแทก (Pendulum impact tester)	22.8

3. ผลจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิล สมการค่าทนแรงดึง และสมการค่าทนแรงกระแทก ต่อค่าความผิดพลาด

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิล

นอกจากค่าความคลาดเคลื่อนจากความหนาตัวอย่างชิ้นงานที่มีผลต่อการผิดพลาดในการหาค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิลก็มีผลต่อการหาอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลเช่นกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ 13 ถึง 42 จะเห็นได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่แตกต่างกันไป ตั้งแต่ 0.774 ถึง 0.95 ถ้าตัวเลขนี้ยิ่งมาก แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อนของค่าที่คำนวณจากสมการน้อยลง ดังนั้นอัตราส่วนของการผสมพลาสติกรีไซเคิลจึงมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ควรจะเป็น ดังแสดงในภาพที่ 61 ถึง 65 และจากตารางที่ A ถึง E ในภาคผนวก แสดงให้เห็นว่าสมการใดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูง และทำให้ภาพรวมในการทดสอบหาอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลโดยใช้วิธีเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์มีค่า *NRMSE* จากตารางที่ 4 เป็น 13.89 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นเพราะความผันผวนของค่าการส่งผ่านแสงที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอดและขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพลาสติกที่อาจทำให้เกิดความแน่นอนในการทดสอบ

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าทนแรงดึง กับอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าทนแรงดึง กับอัตราผสมลาสติกรีไซเคิลซึ่งเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 0.948 ซึ่งอาจทำให้ค่าความทนแรงดึงที่ได้จากสมการมีความผิดพลาดได้ ดังแสดงในภาพ 66 ถึง 70 ต่อมาเมื่อพิจารณาค่า *NRMSE* ของการทดสอบค่าทนแรงดึงจากตารางที่ 4 มีค่าเป็น 14.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างสูงซึ่งจะขัดกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 0.948 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 มากซึ่งน่าจะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดต่ำ แต่เมื่อพิจารณาค่า *NRMSE* ของการหาค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล ที่มีค่าสูงถึง 13.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการจะคำนวณหาค่าทนแรงดึงนั้นจะต้องนำค่าอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิลมาคำนวณด้วย ซึ่งอาจจะเป็นเหตุทำให้การหาค่าทนแรงดึงมีความผิดพลาดสูงตามไปด้วย

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าทนแรงกระแทกกับอัตราผสมพลาสติกรีไซเคิล

จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมพลาสติกรีไซเคิลไป 10 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อทำการผสม 30 50 หรือที่ 100 เปอร์เซ็นจะมีความแตกต่างไม่มากนักกับการผสมที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลสอดคล้องกับภาพที่ 5 ซึ่งค่าทนทานแรงกระแทกจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะเริ่มมีคงที่ที่ระดับหนึ่ง ดังนั้นถ้าแบ่งสมการเป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 0-10 เปอร์เซ็นต์ และช่วง 10 – 100 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าสัมประสิทธ์การตัดสินใจมีค่าสูงกว่าวิธีการไม่มีการแบ่งช่วง จึงทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง ดังภาพที่ 71 ถึง 75 แต่วิธีการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกค่อนข้างจะมีความไม่แน่นอนสูง ดังได้กล่าวไปแล้วในการทดสอบค่าความทนแรงกระแทกในบทอุปกรณ์และวิธีการหัวข้อ 3.2 และอีกปัจจัยหนึ่งก็คือค่าอัตราส่วนผสมพลาสติกรีไซเคิลซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่จะนำมาคำนวณค่าความทนแรงกระแทกซึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่สูงอยู่แล้ว ทำให้ค่า *NRMSE* ของการวัดความทนแรงกระแทกในตารางที่ 4 มีค่าสูงถึง 22.8 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากแนวคิดในการวัดคุณสมบัติทางกลของพลาสติกด้วยวิธีการไม่ทำลายชิ้นงาน ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้คุณสมบัติเฉพาะทางแสงความถี่ใกล้กับอินฟราเรด เพื่อเปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางกล ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำลายชิ้นงาน แต่ทว่าวิธีการที่เสนอในงานวิจัยนี้มีปัจจัยอื่นๆมากระทบโดยตรงด้วยเช่น สีกับความทึบแสงของสีที่ใช้ผสมพลาสติก และความหนาของชิ้นงานพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมตัวแปรที่สามารถควบคุมได้เหล่านั้นให้มากที่สุด เพื่อจะลดความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถใช้เทคนิคการตรวจวัดค่าส่งผ่านแสงเพื่อตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิล, ค่าความทนแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล โดยใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ได้ แต่ต้องทราบส่วนผสมของค่าความทึบแสงของสีที่ค่อนข้างแน่นอน และความหนาอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้เท่านั้น

จากความสัมพันธ์ทางสมการเชิงเส้นต่างๆทั้งหมดในงานวิจัยนี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจค่อนข้างสูง จึงสามารถหาค่าการส่งผ่านแสงกับค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้ แต่จะมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเนื่องมาจากชิ้นงานค่อนข้างสูงเช่นค่าความหนาของชิ้นงานจากการขึ้นรูป และค่าการส่งผ่านของแสงของชิ้นงานจากการทดสอบทางแสง ซึ่งอาจทำให้มีความผิดพลาดได้ แต่เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าความผิดพลาดของการคำนวณหาอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล มาพิจารณา ซึ่งสามารถแบ่งแยกอัตราส่วนผสมพลาสติกได้

วิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์มีค่า *NRMSE* ของการตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลเมื่อเทียบกับการเตรียมตัวอย่างเท่ากับ 13.89 เปอร์เซ็นต์ ค่า *NRMSE* ของการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงเมื่อเทียบกับเครื่อง Universal testing machine เท่ากับ 14.77 เปอร์เซ็นต์และค่า *NRMSE* ของการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกเมื่อเทียบกับเครื่อง Pendulum impact tester เท่ากับ 22.8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นความแม่นยำและประสิทธิภาพจึงไม่อาจเทียบเท่ากับการใช้วิธีการทดสอบทางกล แต่การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย และบำรุงรักษาง่ายกว่าเครื่องทดสอบทางกลต่างๆ ชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นเพียงแผ่นพลาสติก ซึ่งสามารถมีความหนาได้ตั้งแต่ 0.73 ถึง 3.65

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มิลลิเมตร ซึ่งจะสะดวกรวดเร็ว สามารถนำมาตรวจวัดได้ทันทีและไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงาน ซึ่งต่างจากการทดสอบสมบัติทางกลโดยทั่วไปที่ต้องขึ้นรูปชิ้นงานเป็นตามมาตรฐานเท่านั้นเพื่อนำมาทดสอบ

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากขณะทำงานวิจัยนี้ ช่วงความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดที่ดีที่สุด เหมาะสมที่สุดและสามารถหาได้คือช่วงความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร แต่ช่วงที่ดีที่สุดในการที่จะนำมาทดสอบคือช่วงความยาวคลื่น 2000 – 2100 นาโนเมตรเพราะมีอัตราการดูดกลืนแสงที่ต่ำซึ่งสามารถใช้กับพลาสติกที่มีความหนามากกว่าได้ แต่ติดปัญหาเนื่องด้วยราคาที่สูงกว่าเลเซอร์ไดโอด ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรอยู่ประมาณ 50 เท่าจึงไม่สามารถที่จะใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่นดังกล่าวได้ ส่วนการขึ้นรูปพลาสติก ได้ใช้เครื่องฉีดพลาดติกชนิด CNC เป็นรุ่นที่มีอายุไม่ต่ำกว่า 10 ปีมาแล้ว การจำกัดความคลาดเคลื่อนของความหนาได้มากที่สุด 8% ซึ่งจากการนำผลที่ได้มาทดสอบต้องทำการเฉลี่ยค่าความหนา จากทุกๆชิ้นงาน ซึ่งอาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นปัญหาส่วนหนึ่งของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในโครงการวิจัย อาจมาจากเครื่องฉีดพลาสติกนี้ได้ นอกเหนือจากนั้นค่าการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาการใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นทดสอบสมบัติทางกลหรือคุณสมบัติอย่างอื่นเช่น ค่าการยืดตัว (Elongation) และค่าความหนาแน่น (Density) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังคงต้องอาศัยการทดสอบสมบัติทางกลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและค่าการส่งผ่านแสงในขั้นตอนแรก ดังนั้นการใช้งานเซนเซอร์จึงเหมาะกับกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเปลี่ยนชนิดของพลาสติกและมีการผลิตทีละจำนวนมากเช่นในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะดวกรวดเร็วในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิตโดยไม่สร้างความเสียหายกับผลิตภัณฑ์

นอกจากที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้ได้จำกัดชนิดของพลาสติกรวมทั้งความหนาและสีของตัวอย่างที่ใช้ โดยเลือกพิจารณาเฉพาะพลาสติกชนิดเอบีเอสเท่านั้นเนื่องจากชนิดของพลาสติกแต่ละชนิดมีความแตกต่างทางคุณสมบัติทางแสงแตกต่างกันไป รวมทั้งสีและความหนาที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงเช่นเดียวกัน ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นตรวจวัดคุณลักษณะของพลาสติกชนิดอื่น ดังนั้นขอบเขตของการวิจัยจึงสามารถขยายให้กว้างขึ้นได้เช่น เพิ่มชนิดของพลาสติกที่ใช้การทดสอบ, ทดสอบชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน, เพิ่มจำนวนสีที่ใช้ทดสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกเหนือจากแม่สีที่ใช้ รวมทั้งเพิ่มความละเอียดของอัตราส่วนผสมรีไซเคิลให้มากขึ้น เพื่อศึกษาข้อจำกัดและขีดความสามารถในการใช้งานเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

โกสินทร์ วสะศิริ. 2551. **การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสติกรีไซเคิล** วิทยานิพนธ์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จินตมัย สุวรรณประทีป. 2547. **การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก**. บริษัท ดวงกมลสมัยจำกัด, กรุงเทพฯ.

ดุสิต เครืองาม. 2542. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 2**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2547. **สเปกโทรสโคปีด้านการวิเคราะห์**. ศูนย์หนังสือ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ฐิติยา ไพจิตรสาคร, ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์ และ ชวลิต แสงสวัสดิ์. 2545. **การศึกษาสมบัติการไหลของโพลิ-เอทธิลีนที่ผ่านการรีไซเคิลในสถานการณ์จริง**. โครงงานวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทร-วิโรฒ. แหล่งที่มา: http://facstaff.swu.ac.th/siriwans/pe_recycle.pdf, 11 มีนาคม 2551.

วิชัย ริ้วตระกูล, โกศัลย์ คูสำราญ, พิเชษฐ์ วิริยะจิตรา, สุรชัย นิมจิรวัฒน์ และ อภิชาต สุข สำราญ. 2526. **การประยุกต์สเปคโทรสโคปีในเคมีอินทรีย์**. สำนักพิมพ์ห้องเรียน, กรุงเทพฯ.

สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. 2549. **การเพิ่มมูลค่าพลาสติกด้วยเทคโนโลยีสะอาด**. แหล่งที่มา: http://www.nia.or.th/innolinks/200609/innovtrend.htm, 28มีนาคม 2551.

สินีนาถ จริยโชติเลิศ, นฤมล คูอุดมรัตน์ และ วิภาดา ฤทธิสิทธิ์. 2549. **คุณสมบัติของพลาสติกแปรใช้ใหม่ จากขวดน้ำดื่มทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง**. การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร แหล่งที่มา: http://kucon.lib.ku.ac.th/Fulltext/KC4406039.pdf, 11 มีนาคม 2551.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Boldizar,A. and K.Moller.2003. Degradation of ABS during repeated processingand accelerated ageing. **Polymer Degradation and Stability** 81 (2003) 359–366.

Charles,H. and E. M. Petrie. 2003. **Plastics Materials and Process a Concise Encyclopedia .** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey**.**

Inada, K., R. Matsuda, Ch. Fujiwara, M. Nomura, T. Tamon, I. Nishihara, T. Takao, and T. Fujita. 2001. Identification of plastics by infrared absorption using InGaAsP laser diode. **Resource Conservation & Recycling**. 33: 131-146.

Kawaguchi,Y., Sumida, Y. Fukushima and H. Kosaka. 2005. Closed material recycling for plastics from waste appliances, pp. 133-138. **Fourth International Symposium of Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing**. Eco Design 2005.

Laasonen,M., T. Harmia-Pulkkinen, C. Simard, M. Räsänen and H. Vuorela. 2003. Determination of the thickness of plastic sheets used in blister packaging by near infrared spectroscopy: development and validation of the method. **European Journal of Pharmaceutical Sciences** (2004)21 493- 500.

Legrand,A.-C., F.Meriaudeau and P.Gorria. 2002. Active infrared non-destructive testing for glue occlusion detection within plastic lids. **NDT&E International** 35 177-187.

Markovich, R. J., C. A. Evans, C. B. Coscolluela, S. A. Zibas and J. Rosen. 1997. Spectroscopic identification of an amorphous-to-crystalline drug transition in a solid dispersion SCH 48461 capsule formulation. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis** 16 (1997) 661–673.

Tiganis, B.E., L.S Burn, P Davis and A.J Hill. 2002. Thermal degradation of acrylonitrile–butadienestyrene (ABS) blends. **Polymer Degradation and Stability** 76 (2002) 425– 434.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Van den Broek, W.H.A.M., D. Wienke and W.J. Melssen and L.M.C. Buydens. 1997. Plastic material identification with spectroscopic near infrared imaging and artificial neural networks. **Chimica Acta** 361 (1998) 161±176.

Wasasiri, K. and S. Pranonsatit, “Laser diode sensors for measuring mechanical properties of recycled plastics,” **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2009),** Pattaya, Thailand, vol. 1,pp. 490-493, 2009.

Wilson, J. and J. Hawkes. 1998. **Optoelectronics : An introduction**. 3rd ed. Prentice Hall, Hertfordshire.

Yin, Z.N. and T.J. Wang. 2010. Deformation response and constitutive modeling of PC, ABS and PC/ABS alloysunder impact tensile loading. **Materials Science and Engineering A** 527 1461–1468.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์รีไซเคิลของการอัตราส่วนผสมพลาสติกจริงกับการวัดด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์รีไซเคิลจริงกับค่าเปอร์เซ็นต์รีไซเคิลที่ได้จากการทดสอบแบบเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เทียบกับอัตราส่วนผสมพลาสติกตั้งแต่ขั้นตอนการผสมและทำชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 1 ถึง 5

ตารางผนวกที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 0.73 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จาก เลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า % ความ ผิดพลาด
N000	0	0.83	1.86	0.00
N010	10	16.30	7.25	62.98
N030	30	32.53	9.00	8.45
N050	50	46.43	12.03	7.14
N100	100	77.93	14.24	22.07
Y000	0	0.00	0.00	0.00
Y010	10	13.10	5.20	31.01
Y030	30	40.34	4.36	34.48
Y050	50	57.48	7.78	14.96
Y100	100	93.95	7.21	6.05
R000	0	0.00	0.00	0.00
R010	10	9.09	6.03	9.14
R030	30	31.55	15.97	5.16
R050	50	57.81	16.02	15.61
R100	100	97.47	3.62	2.53
B000	0	0.00	0.00	0.00
B010	10	8.99	8.71	10.15

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จากเลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
B030	30	41.01	4.89	36.70
B050	50	56.13	3.82	12.26
B100	100	92.24	8.60	7.76
G000	0	0.00	0.00	0.00
G010	10	13.17	19.77	31.70
G030	30	39.95	7.86	33.17
G050	50	53.81	5.41	7.63
G100	100	92.80	9.88	7.20
P000	0	0.00	0.00	0.00
P010	10	12.25	7.57	22.48
P030	30	36.39	0.30	21.31
P050	50	58.07	4.48	16.13
P100	100	92.99	2.35	7.01

ตารางผนวกที่ 2 แสดงอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 1.46 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จากเลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	0	0.00	0.00	0.00
N010	10	13.85	4.05	38.54
N030	30	34.51	11.06	15.03
N050	50	47.53	4.57	4.93
N100	100	96.20	6.49	3.80
Y000	0	0.00	0.00	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จากเลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
Y010	10	6.69	2.72	33.14
Y030	30	34.88	3.79	16.26
Y050	50	71.00	8.77	42.01
Y100	100	89.04	5.93	10.96
R000	0	0.00	0.00	0.00
R010	10	13.85	4.19	38.46
R030	30	34.60	3.32	15.32
R050	50	49.07	2.84	1.85
R100	100	98.89	2.11	1.11
B000	0	0.00	0.00	0.00
B010	10	14.24	2.51	42.45
B030	30	36.75	4.55	22.49
B050	50	58.44	6.87	16.89
B100	100	96.05	3.98	3.95
G000	0	0.00	0.00	0.00
G010	10	9.42	10.76	5.79
G030	30	37.26	15.38	24.21
G050	50	59.04	25.59	18.08
G100	100	99.14	1.89	0.86
P000	0	0.00	0.00	0.00
P010	10	18.98	3.95	89.79
P030	30	39.77	3.27	32.56
P050	50	47.97	3.51	4.05
P100	100	95.66	4.01	4.34

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 2.19 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า% recycle จริง	ค่า% recycle จาก เลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า % ความ ผิดพลาด
N000	0	0.00	0.00	0.00
N010	10	14.11	5.73	41.11
N030	30	38.56	10.08	28.52
N050	50	52.10	3.82	4.20
N100	100	97.05	6.50	2.95
Y000	0	0.00	0.00	0.00
Y010	10	12.20	5.86	21.98
Y030	30	36.41	6.59	21.38
Y050	50	54.17	4.21	8.35
Y100	100	96.59	4.48	3.41
R000	0	0.00	0.00	0.00
R010	10	12.24	4.40	22.38
R030	30	36.36	5.09	21.21
R050	50	58.33	10.34	16.66
R100	100	96.32	4.86	3.68
B000	0	0.00	0.00	0.00
B010	10	16.94	3.77	69.45
B030	30	34.05	4.11	13.49
B050	50	53.11	3.60	6.22
B100	100	97.51	3.80	2.49
G000	0	0.20	0.45	0.00
G010	10	12.68	5.53	26.77
G030	30	32.35	10.99	7.83

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จาก เลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า % ความ ผิดพลาด
G050	50	51.14	7.47	2.28
G100	100	98.62	3.09	1.38
P000	0	0.00	0.00	0.00
P010	10	18.32	6.51	83.16
P030	30	45.36	6.62	51.19
P050	50	62.20	4.81	24.39
P100	100	89.49	2.71	10.51

ตารางผนวกที่ 4 แสดงอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 2.92 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จาก เลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า % ความ ผิดพลาด
N000	0	0.00	0.00	0.00
N010	10	11.29	4.53	12.92
N030	30	34.28	7.07	14.26
N050	50	56.50	7.26	13.00
N100	100	99.38	1.40	0.63
Y000	0	0.00	0.00	0.00
Y010	10	9.61	5.15	3.86
Y030	30	42.78	10.02	42.59
Y050	50	61.80	10.41	23.60
Y100	100	91.35	7.97	8.65
R000	0	0.00	0.00	0.00
R010	10	15.41	9.87	54.10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า % recycle จริง	ค่า% recycle จากเลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
R030	30	26.75	6.55	10.84
R050	50	60.47	11.79	20.94
R100	100	92.14	27.29	7.86
B000	0	0.00	0.00	0.00
B010	10	10.50	7.09	4.95
B030	30	33.97	10.73	13.23
B050	50	64.46	19.94	28.93
B100	100	93.99	26.85	6.01
G000	0	0.00	0.00	0.00
G010	10	15.53	5.33	55.32
G030	30	41.28	10.83	37.60
G050	50	55.90	16.08	11.80
G100	100	96.32	4.73	3.68
P000	0	0.59	1.32	0.00
P010	10	15.71	8.47	57.14
P030	30	36.27	7.77	20.90
P050	50	51.91	6.93	3.82
P100	100	98.05	2.25	1.95

ตารางผนวกที่ 5 แสดงอัตราส่วนผสมของพลาสติกหนา 3.65 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า% recycle จริง	ค่า% recycle จากเลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	0	0.00	0.00	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า% recycle จริง	ค่า% recycle จากเลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N010	10	10.04	5.95	0.37
N030	30	42.65	6.34	42.17
N050	50	58.91	6.36	17.82
N100	100	94.91	10.51	5.09
Y000	0	0.00	0.00	0.00
Y010	10	13.00	5.65	30.00
Y030	30	37.23	6.79	24.08
Y050	50	59.05	8.53	18.10
Y100	100	90.54	10.12	9.46
R000	0	0.00	0.00	0.00
R010	10	16.63	2.91	66.32
R030	30	37.70	10.19	25.66
R050	50	50.39	9.75	0.77
R100	100	89.26	6.28	10.74
B000	0	0.00	0.00	0.00
B010	10	19.21	4.50	92.06
B030	30	40.24	7.02	34.12
B050	50	61.48	14.20	22.96
B100	100	93.04	9.60	6.96
G000	0	0.74	1.65	0.00
G010	10	10.97	10.66	9.71
G030	30	45.44	8.87	51.47
G050	50	55.67	7.73	11.33
G100	100	96.38	5.01	3.62

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า% recycle จริง	ค่า% recycle จาก เลเซอร์ไดโอด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า % ความ ผิดพลาด
P000	0	0.00	0.00	0.00
P010	10	8.26	6.19	17.37
P030	30	33.92	5.92	13.08
P050	50	57.83	10.81	15.65
P100	100	95.72	8.02	4.28

2. การเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบทางกลและการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

เมื่อเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึงซึ่งเป็นวิธีทางกล กับค่าทนแรงดึงที่ได้กระบวนการทดสอบแบบเลเซอร์ไดโอด ได้ผลดังตารางที่ 6 ถึง 10

ตารางผนวกที่ 6 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 0.73 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	45.00	44.77	0.00	0.51
N010	44.41	44.57	0.12	0.35
N030	44.21	43.92	0.13	0.67
N050	43.55	43.59	0.13	0.10
N100	42.88	42.87	0.21	0.01
Y000	45.00	44.77	0.00	0.51
Y010	44.41	44.51	0.11	0.22

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strange จริง	ค่า tensile strange เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
Y030	44.21	44.03	0.14	0.42
Y050	43.55	43.59	0.17	0.09
Y100	42.88	42.96	0.20	0.20
R000	45.00	44.77	0.00	0.51
R010	44.41	44.44	0.06	0.06
R030	44.21	44.02	0.20	0.44
R050	43.55	43.76	0.20	0.49
R100	42.88	42.98	0.13	0.26
B000	45.00	44.77	0.00	0.51
B010	44.41	44.39	0.09	0.06
B030	44.21	43.97	0.14	0.56
B050	43.55	43.54	0.28	0.02
B100	42.88	42.91	0.19	0.08
G000	45.00	44.76	0.03	0.54
G010	44.41	44.55	0.21	0.31
G030	44.21	43.86	0.18	0.79
G050	43.55	43.66	0.15	0.24
G100	42.88	42.84	0.10	0.08
P000	45.00	44.77	0.00	0.51
P010	44.41	44.60	0.12	0.43
P030	44.21	44.09	0.12	0.27
P050	43.55	43.61	0.22	0.15
P100	42.88	42.86	0.16	0.05

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 7 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 1.46 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	45.00	44.77	0.00	0.51
N010	44.41	44.49	0.08	0.18
N030	44.21	44.08	0.22	0.30
N050	43.55	43.82	0.09	0.62
N100	42.88	42.85	0.13	0.07
Y000	45.00	44.77	0.00	0.51
Y010	44.41	44.64	0.05	0.50
Y030	44.21	44.07	0.08	0.32
Y050	43.55	43.35	0.18	0.46
Y100	42.88	42.99	0.12	0.27
R000	45.00	44.77	0.00	0.51
R010	44.41	44.49	0.08	0.18
R030	44.21	44.08	0.07	0.30
R050	43.55	43.79	0.06	0.55
R100	42.88	42.79	0.04	0.19
B000	45.00	44.77	0.00	0.51
B010	44.41	44.49	0.05	0.16
B030	44.21	44.04	0.09	0.40
B050	43.55	43.60	0.14	0.12
B100	42.88	42.85	0.08	0.06
G000	45.00	44.77	0.00	0.51
G010	44.41	44.58	0.24	0.38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
G030	44.21	44.02	0.31	0.42
G050	43.55	43.59	0.51	0.09
G100	42.88	42.79	0.04	0.20
P000	45.00	44.77	0.00	0.51
P010	44.41	44.39	0.08	0.05
P030	44.21	43.97	0.07	0.54
P050	43.55	43.81	0.07	0.60
P100	42.88	42.86	0.08	0.04

ตารางผนวกที่ 8 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.19 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	45.00	44.77	0.00	0.51
N010	44.41	44.49	0.11	0.17
N030	44.21	44.00	0.20	0.48
N050	43.55	43.73	0.08	0.41
N100	42.88	42.83	0.13	0.11
Y000	45.00	44.77	0.00	0.51
Y010	44.41	44.53	0.12	0.26
Y030	44.21	44.04	0.13	0.39
Y050	43.55	43.69	0.08	0.31
Y100	42.88	42.84	0.09	0.09

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
R000	45.00	44.77	0.00	0.51
R010	44.41	44.53	0.09	0.25
R030	44.21	44.04	0.10	0.38
R050	43.55	43.60	0.21	0.12
R100	42.88	42.84	0.10	0.07
B000	45.00	44.77	0.00	0.51
B010	44.41	44.43	0.08	0.04
B030	44.21	44.09	0.08	0.28
B050	43.55	43.71	0.07	0.36
B100	42.88	42.82	0.08	0.13
G000	45.00	44.77	0.01	0.52
G010	44.41	44.52	0.11	0.23
G030	44.21	44.12	0.22	0.20
G050	43.55	43.75	0.15	0.45
G100	42.88	42.80	0.06	0.18
P000	45.00	44.77	0.00	0.51
P010	44.41	44.40	0.13	0.02
P030	44.21	43.86	0.13	0.79
P050	43.55	43.53	0.10	0.05
P100	42.88	42.98	0.05	0.25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 9 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.92 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	45.00	44.77	0.00	0.51
N010	44.41	44.54	0.09	0.30
N030	44.21	44.08	0.14	0.29
N050	43.55	43.64	0.15	0.21
N100	42.88	42.78	0.03	0.22
Y000	45.00	44.77	0.00	0.51
Y010	44.41	44.58	0.10	0.37
Y030	44.21	43.91	0.20	0.67
Y050	43.55	43.53	0.21	0.04
Y100	42.88	42.94	0.16	0.16
R000	45.00	44.77	0.00	0.51
R010	44.41	44.46	0.20	0.11
R030	44.21	44.24	0.13	0.05
R050	43.55	43.56	0.24	0.02
R100	42.88	42.93	0.55	0.12
B000	45.00	44.77	0.00	0.51
B010	44.41	44.56	0.14	0.33
B030	44.21	44.09	0.21	0.28
B050	43.55	43.48	0.40	0.16
B100	42.88	42.89	0.54	0.04
G000	45.00	44.77	0.00	0.51
G010	44.41	44.46	0.11	0.11
G030	44.21	43.94	0.22	0.61

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
G050	43.55	43.65	0.32	0.23
G100	42.88	42.84	0.09	0.07
P000	45.00	44.76	0.03	0.54
P010	44.41	44.46	0.17	0.10
P030	44.21	44.04	0.16	0.38
P050	43.55	43.73	0.14	0.42
P100	42.88	42.81	0.04	0.15

ตารางผนวกที่ 10 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 3.65 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	45.00	44.77	0.00	0.51
N010	44.41	44.57	0.12	0.35
N030	44.21	43.92	0.13	0.67
N050	43.55	43.59	0.13	0.10
N100	42.88	42.87	0.21	0.01
Y000	45.00	44.77	0.00	0.51
Y010	44.41	44.51	0.11	0.22
Y030	44.21	44.03	0.14	0.42
Y050	43.55	43.59	0.17	0.09
Y100	42.88	42.96	0.20	0.20
R000	45.00	44.77	0.00	0.51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า tensile strength จริง	ค่า tensile strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
R010	44.41	44.44	0.06	0.06
R030	44.21	44.02	0.20	0.44
R050	43.55	43.76	0.20	0.49
R100	42.88	42.98	0.13	0.26
B000	45.00	44.77	0.00	0.51
B010	44.41	44.39	0.09	0.06
B030	44.21	43.97	0.14	0.56
B050	43.55	43.54	0.28	0.02
B100	42.88	42.91	0.19	0.08
G000	45.00	44.76	0.03	0.54
G010	44.41	44.55	0.21	0.31
G030	44.21	43.86	0.18	0.79
G050	43.55	43.66	0.15	0.24
G100	42.88	42.84	0.10	0.08
P000	45.00	44.77	0.00	0.51
P010	44.41	44.60	0.12	0.43
P030	44.21	44.09	0.12	0.27
P050	43.55	43.61	0.22	0.15
P100	42.88	42.86	0.16	0.05

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การเปรียบเทียบค่าทนแรงดึงที่ได้จากการทดสอบทางกลและการทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

เมื่อเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกซึ่งเป็นวิธีทางกลกับค่าทนแรงดึงที่ได้กระบวนการทดสอบแบบเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ ได้ผลดังตารางที่ 11 ถึง 15

ตารางผนวกที่ 11 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 0.73 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	19.84	19.45	0.86	1.96
N010	15.22	15.41	0.38	1.25
N030	15.13	15.02	0.14	0.75
N050	14.88	14.80	0.19	0.59
N100	13.80	14.29	0.23	3.57
Y000	19.84	19.83	0.00	0.03
Y010	15.22	15.57	0.60	2.32
Y030	15.13	14.89	0.07	1.58
Y050	14.88	14.62	0.12	1.78
Y100	13.80	14.04	0.12	1.71
R000	19.84	19.83	0.00	0.03
R010	15.22	16.41	1.95	7.83
R030	15.13	15.21	0.62	0.49
R050	14.88	14.62	0.26	1.81
R100	13.80	13.98	0.06	1.30
B000	19.84	19.83	0.00	0.03
B010	15.22	17.21	1.96	13.05

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
B030	15.13	14.88	0.08	1.65
B050	14.88	14.64	0.06	1.63
B100	13.80	14.06	0.14	1.91
G000	19.84	19.83	0.00	0.03
G010	15.22	17.51	2.27	15.06
G030	15.13	14.90	0.13	1.54
G050	14.88	14.68	0.09	1.38
G100	13.80	14.06	0.16	1.84
P000	19.84	19.83	0.00	0.03
P010	15.22	16.02	1.07	5.26
P030	15.13	14.96	0.00	1.16
P050	14.88	14.61	0.07	1.84
P100	13.80	14.05	0.04	1.82

ตารางผนวกที่ 12 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 1.46 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	19.84	19.83	0.00	0.03
N010	15.22	15.32	0.06	0.64
N030	15.13	14.99	0.18	0.96
N050	14.88	14.78	0.07	0.71
N100	13.80	14.00	0.10	1.45

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 12 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
Y000	19.84	19.83	0.00	0.03
Y010	15.22	16.75	1.25	10.03
Y030	15.13	14.98	0.06	1.00
Y050	14.88	14.40	0.14	3.23
Y100	13.80	14.12	0.09	2.28
R000	19.84	19.83	0.00	0.03
R010	15.22	15.49	0.44	1.78
R030	15.13	14.99	0.05	0.97
R050	14.88	14.75	0.05	0.87
R100	13.80	13.96	0.03	1.14
B000	19.84	19.83	0.00	0.03
B010	15.22	15.31	0.04	0.60
B030	15.13	14.95	0.07	1.20
B050	14.88	14.60	0.11	1.88
B100	13.80	14.00	0.06	1.47
G000	19.84	19.83	0.00	0.03
G010	15.22	17.49	2.11	14.90
G030	15.13	14.94	0.25	1.25
G050	14.88	14.60	0.41	1.94
G100	13.80	13.95	0.03	1.11
P000	19.84	19.83	0.00	0.03
P010	15.22	15.24	0.06	0.10
P030	15.13	14.90	0.05	1.52
P050	14.88	14.77	0.06	0.75

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 12 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
P100	13.80	14.01	0.06	1.51

ตารางผนวกที่ 13 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.19 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	19.84	19.83	0.00	0.03
N010	15.22	15.59	0.69	2.44
N030	15.13	14.92	0.16	1.39
N050	14.88	14.71	0.06	1.20
N100	13.80	13.99	0.10	1.35
Y000	19.84	19.83	0.00	0.03
Y010	15.22	15.98	1.50	4.98
Y030	15.13	14.96	0.11	1.16
Y050	14.88	14.67	0.07	1.42
Y100	13.80	13.99	0.07	1.40
R000	19.84	19.83	0.00	0.03
R010	15.22	15.60	0.60	2.50
R030	15.13	14.96	0.08	1.16
R050	14.88	14.61	0.17	1.87
R100	13.80	14.00	0.08	1.43
B000	19.84	19.83	0.00	0.03
B010	15.22	15.27	0.06	0.32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 13 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
B030	15.13	15.00	0.07	0.91
B050	14.88	14.69	0.06	1.31
B100	13.80	13.98	0.06	1.30
G000	19.84	19.74	0.21	0.50
G010	15.22	15.34	0.10	0.78
G030	15.13	15.02	0.18	0.73
G050	14.88	14.72	0.12	1.09
G100	13.80	13.96	0.05	1.17
P000	19.84	19.83	0.00	0.03
P010	15.22	15.46	0.58	1.59
P030	15.13	14.81	0.11	2.11
P050	14.88	14.54	0.08	2.28
P100	13.80	14.11	0.04	2.23

ตารางผนวกที่ 14 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 2.92 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ย จากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	19.84	19.83	0.00	0.03
N010	15.22	15.78	0.83	3.66
N030	15.13	14.99	0.11	0.94
N050	14.88	14.64	0.12	1.67
N100	13.80	13.95	0.02	1.08

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ยจากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
Y000	19.84	19.83	0.00	0.03
Y010	15.22	16.32	1.50	7.23
Y030	15.13	14.86	0.16	1.84
Y050	14.88	14.55	0.17	2.24
Y100	13.80	14.08	0.13	2.01
R000	19.84	19.83	0.00	0.03
R010	15.22	16.04	1.18	5.39
R030	15.13	15.11	0.10	0.14
R050	14.88	14.57	0.19	2.10
R100	13.80	14.07	0.44	1.92
B000	19.84	19.83	0.00	0.03
B010	15.22	16.34	1.68	7.37
B030	15.13	15.00	0.17	0.90
B050	14.88	14.51	0.32	2.53
B100	13.80	14.04	0.43	1.70
G000	19.84	19.83	0.00	0.03
G010	15.22	15.31	0.11	0.57
G030	15.13	14.88	0.17	1.68
G050	14.88	14.65	0.26	1.61
G100	13.80	14.00	0.08	1.43
P000	19.84	19.56	0.61	1.40
P010	15.22	16.02	1.76	5.24
P030	15.13	14.96	0.12	1.15
P050	14.88	14.71	0.11	1.18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ยจากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
P100	13.80	13.97	0.04	1.23

ตารางผนวกที่ 15 แสดงค่าความทนแรงดึงจากตัวอย่างพลาสติกหนา 3.65 มิลลิเมตรที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอด

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ยจากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
N000	19.84	19.83	0.00	0.03
N010	15.22	16.32	1.06	7.23
N030	15.13	14.86	0.10	1.82
N050	14.88	14.60	0.10	1.93
N100	13.80	14.02	0.17	1.60
Y000	19.84	19.83	0.00	0.03
Y010	15.22	15.58	0.44	2.34
Y030	15.13	14.94	0.11	1.25
Y050	14.88	14.60	0.14	1.94
Y100	13.80	14.09	0.16	2.10
R000	19.84	19.83	0.00	0.03
R010	15.22	15.27	0.05	0.35
R030	15.13	14.94	0.16	1.30
R050	14.88	14.73	0.16	1.01
R100	13.80	14.11	0.10	2.25
B000	19.84	19.83	0.00	0.03

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 15 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่า Impact strength จริง	ค่า Impact strength เฉลี่ยจากการวัด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า % ความผิดพลาด
B010	15.22	15.23	0.07	0.08
B030	15.13	14.90	0.11	1.57
B050	14.88	14.56	0.23	2.21
B100	13.80	14.05	0.15	1.81
G000	19.84	19.49	0.76	1.75
G010	15.22	16.63	1.87	9.27
G030	15.13	14.81	0.14	2.12
G050	14.88	14.65	0.12	1.58
G100	13.80	14.00	0.08	1.43
P000	19.84	19.83	0.00	0.03
P010	15.22	16.79	1.48	10.31
P030	15.13	15.00	0.09	0.90
P050	14.88	14.61	0.17	1.81
P100	13.80	14.01	0.13	1.50

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายพัฒนโชค คุนาพงษ์กิติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 มกราคม 2531
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์