

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การยืมติดของ โลหะและยาง



นายเกษร ฤตวิรุฬห์
นางสาวนันทกา อติเรกสมบัติ

๒/๗.

๗๗๕/๗

๒๕๓๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี.....

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๓๘

๗

๖๑๒๖๕๗ ๒๔๙



RUBBER TO METAL BONDING


MR. GECHA RITWIRULH
MISS NANTAKA ADIREKSOMBAT

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1995/4

หัวข้อโครงการพิเศษ การยึดติดของโลหะกับยาง
นักศึกษา นายเกชา ฤตวิรุฬห์
นางสาวนันทกา อติเรกสมบัติ
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ประเสริฐ คุณคำชู

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

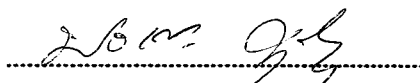

.....
(ผศ.ดร. เพชญชัย ไชยสิทธิ์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี


คณะกรรมการตรวจ-สอบโครงการพิเศษ


.....
(ผศ.ดร. สุนิตย์ สุขสำราญ)

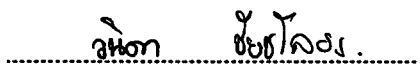
ประธานกรรมการ


.....
(ดร. ประเสริฐ คุณคำชู)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร. สักดา ไตรศักดิ์)

กรรมการ


.....
(อ. วนิดา ชัยชโลธร)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

หัวข้อโครงการพิเศษ	การยึดติดของ โลหะและยาง
นักศึกษา	นายเกชา ฤตวิรุฬห์ นางสาวนันทกา อติเรกสมบัติ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ประเสริฐ คุณคำชู
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

การใช้ยางสำหรับงานด้านวิศวกรรม ในบางกรณีจำเป็นต้องทำให้ยางยึดเกาะกับโลหะได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ในการยึดติดระหว่างยางและโลหะ สามารถกระทำในขณะที่ทำให้ยางสุกตัว (vulcanisation) อย่างไรก็ตามความสามารถในการยึดติดนี้ยังขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของผิวโลหะ ชนิดของยาง สูตรผสม ระยะเวลาของการสุกตัว การเตรียมพื้นผิว และอื่นๆ ในการศึกษานี้ จะเป็นการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวต่อการยึดติดของยางธรรมชาติกับโลหะ 3 ชนิด คือ เหล็ก ทองเหลือง และสแตนเลส โดยจะเป็นการประยุกต์ใช้ 2 level factorial experimental design และ polynomial regression analysis สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการยึดติด ที่สามารถตรวจสอบได้จากการวัดความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (tear strength) ของชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า tear strength จะขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ทำให้สุกตัว และปริมาณเขม่าดำ โดยสมการคณิตศาสตร์นั้น จะแสดงลำดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จะสามารถแสดงในรูปของ contour plots ซึ่งจะช่วยในการอธิบายพฤติกรรม และอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ โดยลำดับ

Special Project Title	Rubber to Metal Bonding
Name	Mr. Gecha Ritwirulh Miss Nantaka Adireksombat
Special Project Advisor	Dr. Prasert Khunkamchoo
Department	Chemistry
Academic Year	1994

ABSTRACT

It is well known that rubber is used extensively in many types of goods in the market. One of the most successful product is an utility of rubbers in engineering products such as a part of machine, automobile, bridge bearing, etc. In order to use rubber effectively as an engineering material, it is necessary in most case to bond it securely to metal, usually during the vulcanisation process. Therefore, the science and technology of rubber to metal bonding is interested. Since the capability of adhesion is dependent on many variables, for example type of rubbers and metals, rubber formulation and metal surface preparation. Thus, the current investigation will consider of those variables by employing, natural rubber to 3 types of metals, i.e. brass, iron and stainless steel. The rubber was formulated and mixed by using a closed mixing chamber of a Haake internal mixer according to the adopted of 2 level experimental design. The rubber stocked was then moulded to particular cure level in a transfer mould by using chemlok 205 and chemlok 220 as a primary and second coat respectively on each types of metal surface. The bonded specimens were measured tear strength with an Instron tensile testing machine. Then the polynomial regression analysis of dependent and independent variables were analysed with an application of a computer package named statgraphics to obtain a model with contain solely significant factors for each metal. It was found that tear strength was strongly dependent on cure time and carbon black loading. Likewise, a contour plot was developed which can be used to describe the relationships. The results obtained were found to be in good agreement with literatures and some interesting behaviours were discussed.

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนสำคัญต่อการทำโครงการพิเศษ ดังนี้

- ดร.ประเสริฐ คุณคำชู : กรุณาให้คำแนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษาโครงการพิเศษ
- ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครรัตน์ : กรุณาเอื้อเพื่อความสะดวก อุปกรณ์การทำงาน รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ
- ผศ.ดร.สุนิตย์ สุขสำราญ : กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ
- ผศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์ : กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ
- อ.วนิดา ชัชชโลธร : กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ และตรวจทานเนื้อหาโครงการพิเศษ
- นายประทีป สิทธิแพทย์ : กรุณาเอื้อเพื่อความสะดวก อุปกรณ์การทำงาน รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ
- นายชูเดช ศีประเสริฐกุล : กรุณาเอื้อเพื่อความสะดวก อุปกรณ์การทำงาน รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
: เอื้อเพื่อสถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่มีได้กล่าวนามทุกคน ซึ่งมีส่วนช่วยในการทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายเกษรา ฤตวิรุฬห์

นางสาวนันทกา อติเรกสมบัติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	a
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	b
กิตติกรรมประกาศ	c
สารบัญ	d
สารบัญตาราง	e
สารบัญรูป	f
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและการดำเนินการวิจัย	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	3
2.1 การศึกษาการยึดติดของโลหะกับยาง	3
2.2 สมบัติการฉีกขาด	9
2.3 การวางแผนการทดลอง	9
บทที่ 3 การทดลอง	12
3.1 เครื่องมือที่ใช้	12
3.2 สารเคมี	12
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	13
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	19
4.1 การขึ้นรูปและการวัดคาบไซส์	19
4.2 การทดสอบชิ้นงาน	19
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม STATGRAPHICS	25
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	35
5.1 สรุปผลการทดลอง	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
บรรณานุกรม	36
ภาคผนวก ก	38
ภาคผนวก ข	41

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3-1 แสดงการวางแผนการทดลองแบบ 2 ⁿ factorial experimental design	14
ตารางที่ 3-2 แสดงค่าจริงเทียบกับ code value ของตัวแปรอิสระ	14
ตารางที่ 4-1 แสดงค่า t_{90} , t_{80} และ t_{70} ของยางผสมสูตร	19
ตารางที่ 4-2 แสดงผลของความหนา พื้นที่หน้าตัด และค่า tear strength	20
ตารางที่ 4-3 แสดงค่า code value เมื่อเทียบกับค่าจริง	25
ตารางที่ 4-4 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ iteration ของ tear strength ของ NR/brass bonding	26
ตารางที่ 4-5 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ iteration ของ tear strength ของ NR/iron bonding	29
ตารางที่ 4-6 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ iteration ของ tear strength ของ NR/stainless bonding	32

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 แสดงการยึดติดระหว่างโลหะกับยาง โดยใช้ระบบ two coat system	3
รูปที่ 2-2 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ของค่าตอบสนองกับตัวแปรต่าง ๆ	11
รูปที่ 3-1 แสดงแบบ transfer mould	13
รูปที่ 3-2 แสดงชิ้นงานที่เตรียมได้	17
รูปที่ 3-3 แสดงลักษณะการจับชิ้นงานในการทดสอบ	18
รูปที่ 4-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับ tear strength เมื่อปริมาณเขม่าดำเท่ากับ 50 phr	23
รูปที่ 4-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับ tear strength เมื่อปริมาณเขม่าดำเท่ากับ 30 phr	24
รูปที่ 4-3 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณเขม่าดำ ที่มีผลต่อค่า tear strength ของ NR/brass bonding	27
รูปที่ 4-4 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณเขม่าดำ ที่มีผลต่อค่า tear strength ของ NR/iron bonding	30
รูปที่ 4-5 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณเขม่าดำ ที่มีผลต่อค่า tear strength ของ NR/stainless bonding	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

การใช้ยางสำหรับงานด้านวิศวกรรมให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพในบางกรณีจำเป็นต้องมีการทำให้ยางสามารถยึดเกาะกับโลหะได้อย่างดี โดยเฉพาะในการประยุกต์ใช้งานในส่วนประกอบสำคัญในรถยนต์ เครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์ และเครื่องยนต์ต่างๆ ในการทำให้เกิดการยึดติดระหว่างยางและโลหะ สามารถกระทำในขณะที่ทำให้ยางสุกตัว (vulcanisation) ซึ่งมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อการเกาะติดของยางและโลหะหลายปัจจัย และเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้จะมีผลสะท้อนต่อสมบัติของชิ้นงานนั้นๆ ได้ด้วยในขณะที่ใช้งานในภายหลังการศึกษาและพัฒนางานด้านการยึดติดระหว่างยางและโลหะจึงมีความสำคัญ

การปรับปรุงและพัฒนางานด้านการยึดติดระหว่างยางกับโลหะ ได้กระทำเรื่อยมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1862 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีการผลิตสารเคมีเป็นตัวกลางที่ช่วยทำให้การยึดติดนี้มีความแข็งแรงและทนทาน อย่างไรก็ตาม ใดๆ ก็ดี ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความแข็งแรงนี้ และสามารถเพิ่มสมบัติของชิ้นงานนั้นๆ ด้วย ได้แก่ ชนิดของยาง และ โลหะที่นำมายึดติด ชนิดของสารช่วยยึดติดซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของยางที่ใช้ การทำความสะอาดพื้นผิวและการเตรียมพื้นผิวโลหะเป็นต้น ดังนั้นโครงการพิเศษนี้ จึงมีแนวทางที่จะศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และประเมินผลโดยใช้หลักการทางสถิติ เพื่อให้สามารถบอกปัจจัยที่สำคัญที่สุดและลดต้นทุนลงมาตามนัยสำคัญ ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้สามารถปรับปรุงในกระบวนการผลิตและการผสมสูตร เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลที่มีความคงที่แน่นอนในแต่ละครั้ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมผิวหน้าของโลหะก่อนทำให้เกิดการยึดติดระหว่างโลหะกับยาง
2. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการยึดติดระหว่างโลหะกับยาง
3. ศึกษาสมบัติการฉีกขาดของยางที่ยึดติดกับ โลหะแล้ว

1.3 ขอบเขตและการดำเนินการวิจัย

1. โลหะที่ใช้ในการยึดติดในโรงงานพิเศษนี้ คือ เหล็ก สเตนเลส และทองเหลือง เนื่องจากโลหะเหล่านี้นิยมใช้ในการยึดติดกับยางในอุตสาหกรรม
2. ยางที่ใช้ในโรงงานพิเศษนี้ ได้มีการเลือกใช้ ยางธรรมชาติ(NR) TTR 5L
3. สูตรผสมยาง เพื่อศึกษาผลของปริมาณเจมาดำที่มีต่อการยึดติดระหว่างโลหะกับยาง จึงทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเจมาดำ ในขณะที่ปริมาณสารอื่นไม่เปลี่ยนแปลง
4. สารเคมีที่ใช้ในการยึดติดระหว่างโลหะกับยาง ที่นำมาใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น
 - primary bonding agent คือ chemlok 205
 - secondary bonding agent คือ chemlok 220
5. ในการขึ้นรูปของยางโดยใช้ transfer moulding ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C และความดัน 40 psi

บทที่ 2

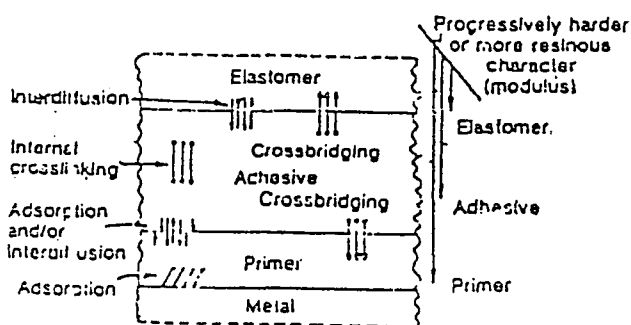
หลักการและทฤษฎี

2.1 การศึกษาการยึดติดของโลหะกับยาง

การใช้ยางในงานวิศวกรรมส่วนมากจะต้องมีการนำมายึดติดกับโลหะก่อน ซึ่งจะทำระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ ในสมัยก่อนจะใช้ ebonite interlayer ซึ่งกระบวนการนี้ก็ยังคงมีใช้อยู่ เช่น การทำลูกกลิ้งในอุตสาหกรรมการพิมพ์ ซึ่ง ebonite จะยึดแน่นกับผิวของโลหะที่ขรุขระ และยึดกับยางระหว่างการวัลคาไนซ์ด้วยกระบวนการ chemical crosslinks แต่การยึดติดจะสูญเสียไปเมื่อชั้นของ ebonite อ่อนตัว (100°C)

วิธีที่ใช้กันแพร่หลายคือ ใช้วิธีชุบทองเหลืองเป็นตัวกลางสำหรับยึดติดยางกับเหล็ก (1920-1960) ปัจจุบันหันมาใช้ bonding agents ที่เป็น organic polymer แทนการยึดติดยางกับโลหะโดยตรงก็ได้ แต่มีข้อจำกัดตรงที่จะเกิด self-bonding compounds และบางครั้งมันก็จะไปติดกับ mould ด้วย ซึ่งสิ่งนี้จะเป็นตัวจำกัดการใช้ประโยชน์และโดยทั่วไปการทำ bonding medium บนผิวของโลหะจะทำเมื่อทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะแล้ว

เมื่อพิจารณาถึงการยึดติดของโลหะและยางจะมุ่งไปที่ชนิดของ bonding agent โดยจะถือเอาว่าไม่มีปฏิกิริยาระหว่างสารยึดติดกับยางในการศึกษาค่าความแข็งแรงสูงสุด อย่างไรก็ตาม การยึดติดระหว่างโลหะและยางก็เป็นระบบที่ซับซ้อน ซึ่งเกิดการแพร่เข้าหากันของส่วนผสมของยางและสารเชื่อมโยงของสารยึดติด



รูปที่ 2-1 แสดงการยึดติดระหว่างโลหะกับยางโดยใช้ระบบ two coat system

จากรูปที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบในการยึดติดระหว่างโลหะและยาง ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงสูงสุดของพันธะซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ได้แก่ โลหะ วิธีเตรียมผิวโลหะ ส่วนประกอบของสารยึดติด และ primer และยาง การเปลี่ยนแปลงชนิดของยาง เวลาในการสุกตัว ชนิดและปริมาณเขม่าดำหรือแอนติออกซิแดนท์

จากรูปสามารถอธิบายกลไกการยึดติดได้ว่าเกิดการดูดซับของ primer บนผิวของโลหะ ซึ่งขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิว ถ้าขนาดพื้นที่ผิวมากจะดูดซับได้มาก ทำให้เกิดการยึดติดได้ดี และระหว่างชั้นของ second coat กับยาง และ primer จะเกิดการแพร่เข้าหากันและมีลักษณะคล้ายกับเป็นสะพานเชื่อมทำให้เกิดการถ่ายเทของโมเลกุลเสมือนหนึ่งว่าเป็นเนื้อเดียวกัน เรียกว่า crossbridging และภายในชั้นของ second coat เองก็จะเกิดการเชื่อมโยงภายใน ทำให้การยึดติดดียิ่งขึ้น

การทำความสะอาดผิวโลหะ

เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่ปกคลุมด้วย น้ำมัน(oils) และจาระบี (greases) เพื่อใช้ป้องกันโลหะไม่ให้เกิดสนิม หรือการกัดกร่อนซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากความร้อน น้ำมัน และจาระบีสามารถขจัดออกโดยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ ไตรคลอโรเอททิลีน ใน vapour degreaser บางทีก็ใช้สารละลายอัลคาไลที่ร้อนซึ่งประกอบด้วย wetting agents สลับกับตัวทำละลายชนิด degreasing agents

สิ่งปนเปื้อนที่ยังคงเหลืออยู่สามารถขจัดได้โดยวิธีทำความสะอาดทางเคมี หรือเชิงกล ซึ่งบางครั้งวิธีการเคมีก็ไม่เพียงพอที่จะขจัดสิ่งปนเปื้อนได้หมด ต้องใช้วิธีเชิงกลด้วย วิธีทางเชิงกลที่นิยม คือการพ่นเป่าด้วยวัสดุสำหรับขัดทั้งชนิดที่เป็นโลหะและอโลหะ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อ

1. ขจัดฝุ่น ทราย สนิม และพวกคาร์บอนที่สะสมบนผิวชิ้นงาน
2. ทำให้ผิวขรุขระขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เพื่อประโยชน์ในการทาสีหรือเคลือบ

สารยึดติด

3. เพื่อขจัดความผิดปกติของผิว เช่น รอยขีดขูดบนผิวโลหะ

การทำความสะอาดโลหะที่เป็นเหล็ก นิยมใช้ผงเหล็กกล้า หรือจะใช้ผงอลูมินา หรือโลหะที่ไม่ใช่เหล็กก็ได้ สำหรับการทำความสะอาดโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก จะใช้พวกอลูมินาและผงโลหะที่ไม่ใช่เหล็กเช่นกันเพื่อหลีกเลี่ยงการทำลายพันธะอันเนื่องมาจากผลของ galvanic action ตัวอย่างเช่น การใช้ผงเหล็กพ่นบนอลูมิเนียม

ในการทำความสะอาดทางเคมี การขจัดออกไซด์ของโลหะทำได้โดยวิธี dilute acids หรือวิธีอื่นที่เหมาะสมกับโลหะที่ต้องการทำความสะอาด การทำความสะอาดมีหลายวิธี สามารถขจัดฟิล์มของน้ำมัน และออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางๆ ของไอรอนฟอสเฟต หรือซิงค์ฟอสเฟต (ฟิล์มหนาของผิวฟอสเฟตก็ต้องหลีกเลี่ยงและจะต้องทำ final chromic passivating rinse) อาจจะใช้ Ultrasonics ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความสะอาดด้วยก็ได้ โดยเฉพาะสำหรับการขจัด inertsoils เช่นคาร์บอน

มีการใช้ rigid plastics หลายตัวแทนโลหะ ซึ่งสามารถยึดกับยางได้ โดยใช้เทคนิคเดียวกัน แต่การทำความสะอาดจะมีปัญหาน้อยกว่า และในหลายๆกรณี (เช่น ไนลอน) การ degrease ใช้เพียงไตรคลอโรเอทที่ลีนก็เพียงพอ

การเคลือบ bonding medium ลงบน substrate

หลังจากทำความสะอาดผิวแล้วควรเคลือบ bonding medium ลงไปทันที การทำ Grit-blasted ที่ผิวโลหะต้องทำในสภาวะ reactive และต้องป้องกันให้สนิมของสารปนเปื้อน (เช่น airborne dusts) มีน้อยที่สุด

ปัจจุบันมีการใช้ bonding agents ที่เหมาะสมสำหรับการยึดติดของยาง bonding agents ที่ใช้มีการผสมสูตรโดยเฉพาะสำหรับโลหะแต่ละชนิด ซึ่งเป็นเทคนิคที่ดีกว่าใช้วิธีชุบทองเหลือง

วิธีชุบด้วยทองเหลือง

ถึงแม้ว่าจะมีการใช้วิธีชุบด้วยทองเหลืองน้อยมากในปัจจุบัน แต่ก็ยังใช้อยู่ในบางกรณี เช่นในกรณีของยางเสริมใยเหล็ก ในกระบวนการชุบด้วยทองเหลือง ส่วนของโลหะซึ่งได้ทำความสะอาดด้วยวิธีการทางเคมีแล้วถูกทำเป็นขั้วแคโทด ในอ่างชุบที่มีสารละลายคอปเปอร์ไซยาไนด์ และซิงค์ไซยาไนด์ ในโซเดียมไซยาไนด์ สภาวะที่ใช้ในการทำ คือ ปรับให้ทองเหลืองที่ได้มีองค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับการเกิดพันธะ ซึ่งปกติอยู่ในช่วง 68-75 % ทองแดง

ยางที่ใช้ยึดติดกับทองเหลืองต้องผสมด้วยกำมะถัน เพราะกำมะถันทำให้เกิดพันธะและสำหรับผิวของทองเหลืองก็ควรทำการกัดกร่อนผิว โดยใช้ลุมิเนียมเปอร์ซัลเฟต เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดพันธะได้คือ

Bonding Agents

ในอดีตสารยึดติดที่ใช้เป็นพวก cyclised rubber, rubber hydrochloride, chlorinated rubber ผสมกับยาง และเรซิน แต่ในกระบวนการผลิตสมัยใหม่ส่วนมากจะใช้ bonding agents

ในช่วงก่อนสงครามได้มีการพัฒนาใช้ isocyanates แต่จะไวต่อความชื้นและหลุดออกจากโลหะได้ง่ายขณะทำการขึ้นรูป ในปัจจุบัน สารยึดติดที่ใช้จะเป็นสูตรที่ซับซ้อนซึ่งไม่เปิดเผยสูตร และมีหลายตัวอย่างมากซึ่งเหมาะกับยางและ substrate แต่ละตัวโดยเฉพาะ

bonding agents มีการใช้ทั้งแบบ one coat system และ two coat system

- ชั้นแรก (primer coating) เป็นสูตรที่ยึดติดได้ดีกับโลหะและประกอบด้วยวัสดุที่มีขี้ เช่น chlorinated rubber และละลายได้ในตัวทำละลายที่เหมาะสม

- ชั้นที่สอง (the covercoat) ประกอบด้วยโพลิเมอร์หลายตัวผสมกัน ปกติจะเป็นพวกที่มีขี้ปานกลาง และพวกที่มีสมบัติคล้ายยางและวัสดุสำหรับสร้าง chemical bridges ระหว่างสารยึดติดและยาง

การเคลือบ bonding agents ลงบนโลหะทำได้หลายวิธีตามความเหมาะสมของสารละลายและการกระจายของ organic polymers และรงควัตถุ การทาเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และเหมาะกับงานที่พื้นผิวที่เกิดการยึดติดมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป

ถ้าจะใช้แบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ ก็จะเป็นแบบฉีดสเปรย์ การจะเลือกวิธีใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงานเป็นสำคัญรวมทั้งขนาดพื้นที่ที่ต้องการยึดติด ฯลฯ

ก่อนที่จะเคลือบชั้นที่ 2 จะต้องมั่นใจก่อนว่าชั้นแรกแห้งสนิทแล้ว และในกรณีของการฉีดสเปรย์จะต้องทำการ preheat โลหะก่อนเพื่อให้แห้งเร็ว (เป็นวินาทีเท่านั้นไม่ถึงนาที)

bonding agents ส่วนมากจะเตรียมในรูปสารแขวนลอย ฉะนั้นต้องระวังไม่ให้ตกตะกอน ดังนั้นควรทำการปั่นและคนทั้งก่อนใช้และระหว่างที่ใช้ด้วย เพราะประสิทธิภาพของสารยึดติด ขึ้นอยู่กับส่วนที่ไม่ละลายนั่นเอง

การยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์กับโลหะ

การยึดติดของยางวัลคาไนซ์กับโลหะพบน้อยกว่าเทคนิคการยึดติดระหว่างการวัลคาไนซ์ ขนาดของโลหะไม่ควรใหญ่เกินไปสำหรับแม่พิมพ์ สารยึดติดที่ใช้ในกรณีนี้เป็นพวก epoxy ซึ่งจะต้องมีการเตรียมผิวของยางเป็นกรณีพิเศษเช่น cyclising ด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อเพิ่มการยึดติดของยางกับ epoxy resin ถ้าเป็นสารยึดติดพวก cyanoacrylate ซึ่งสารยึดติดจะเกิดโพลิเมอร์เมื่อผิวของโลหะกับยางประกบกันภายใต้ความดัน แต่ว่าวัสดุพวกนี้ต้นทุนสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

การยึดติดจะเกิดเมื่อมีการสัมผัสอย่างสนิทระหว่างยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์กับโลหะที่เคลือบด้วยสารยึดติดและยางจะต้องมีสูตรผสมที่เหมาะสมเช่น % sulphur ที่ใช้อยู่ประมาณ 3 % ตัวเร่งที่ใช้ก็ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะระหว่างยางกับเหล็ก เช่น thiurans มีผลกระทบต่อทองเหลือง ตัวเร่งที่นิยมใช้คือ thiazole และอนุพันธ์ของ thiazole

การยึดติดของยางกับโลหะนั้นจะขึ้นกับความเป็นขี้ของยาง เช่น ยางที่มีขี้ (NBR, CR) สามารถยึดติดกับโลหะได้ง่ายกว่าโดยใช้เพียง one-coat bonding agent เพียงอย่างเดียว ถ้าเป็นยางที่ไม่มีขี้ เช่น NR, SBR จะต้องใช้ two-coat bonding agent แต่บางทีอาจใช้เพียง one-coat bonding agent เนื่องจากคาดว่าพันธะโครงร่างเหมือนอิทธิพลมากกว่าความเป็นขี้ของยาง

ในการวัลคาไนซ์นั้น เราจะสนใจถึงคุณสมบัติที่ต้องการมากกว่าในเรื่องของพันธะ ส่วนสำหรับสารตัวเติมนั้น จะใช้ในปริมาณปานกลางจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะในกรณีที่ต้องการมอดูลัสต่ำๆจะใช้สารตัวเติม เช่น เชม่าคำ ในปริมาณปานกลางหรืออาจมีการเติมน้ำมันลงไปเพื่อช่วยลดค่ามอดูลัส

การขึ้นรูป

สิ่งที่ควรคำนึงถึง คือ

- สามารถบรรจุโลหะลงใน mould และสามารถนำออกมาจาก mould ได้ง่าย
- ความสะอาดของพื้นผิวของโลหะและยาง
- การปนเปื้อนของสารสำหรับหล่อขึ้น mould

การที่จะบรรจุโลหะลงไป ใน mould และสามารถนำออกมาจาก mould ได้ง่ายนั้นส่งผลให้ mould จะแบ่งเป็นส่วนย่อยๆหลายส่วนมากขึ้น และความแน่นของโลหะจะต้องไม่แน่นหรือหลวมจนเกินไปโดยที่เมื่อใส่โลหะลงไป ใน mould แล้วก็จะถือว่าโลหะเป็นส่วนหนึ่งของ cavity ช่องว่างระหว่างโลหะกับ mould จะต้องทำให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยที่โลหะไม่แน่นจนเกินไปเพื่อมิให้เป็นการสิ้นเปลืองยาง และต้นทุนในการตัดขอบออกและที่สำคัญ เพื่อป้องกันไม่ให้ยางไหลผ่านผิวหน้าของโลหะแล้วไปทำให้สารยึดติดหลุดออกจากผิวหน้าของโลหะซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของการยึดติดลดลง

สำหรับพื้นผิวของยางจะต้องสะอาด เพื่อใช้ในการยึดติดและเก็บสารยึดติดให้อยู่ในสภาพที่สะอาด ส่วนโลหะที่จะใช้ควรเก็บไว้ในระบบปิดเพื่อป้องกันการถูกออกซิไดซ์โดยบรรยากาศ หรืออาจจะใช้สารป้องกันเคลือบไว้และการที่จะบรรจุโลหะลงไป ใน mould จะต้องไม่สัมผัสบริเวณผิวหน้าของโลหะที่จะทำการยึดติดกับยาง สำหรับน้ำมันหล่อลื่นนั้น จะต้องระมัดระวัง เพราะถ้ามีน้ำมันหล่อลื่นอยู่ระหว่างผิวของโลหะและยางเนื่องจากจะทำให้โลหะและยางไม่ติดกัน แต่ถ้าไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเลยจะทำให้การนำโลหะออกจาก mould เป็นไปได้ยากหรืออาจจะทำให้ mould เกิดรอยขีดข่วนหรือเสียหายจากการนำโลหะออกจาก mould และในการใช้น้ำมันหล่อลื่นนั้นจะใช้การทาดีกว่าการ spray

สิ่งที่ต้องระมัดระวัง คือ mould อาจจะถูกประกบได้เนื่องมาจากสารยึดติดส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรอยเกิดขึ้น ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะกับยางเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องสนใจ เนื่องจากยางจะเกิดการหดตัวมากกว่าโลหะ ซึ่งจะทำให้พันธะของยางกับโลหะเกิด strain เพราะฉะนั้นจะต้องทำให้พันธะของโลหะกับยางมีความแข็งแรงเพียงพอ ซึ่งอาจชดเชยโดยใช้ยางที่ผ่านการ pre-compress

2.2 สมบัติการฉีกขาด (Tear Strength)

การวัดสมบัติการฉีกขาด เป็นการวัดความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างโลหะ กับยางซึ่งคำนวณ ได้ดังสมการ 2.1

$$\text{tear strength} = \frac{F}{A} \times \frac{1}{2d} \quad (2.1)$$

เมื่อ F คือแรงที่ใช้ในการดึง (kg)

A คือพื้นที่หน้าตัดของการยึดติด (m²)

d คือความหนาของยาง (m)

2.3 การวางแผนการทดลอง

2.3.1 Factorial Experimental Design

การทดลองทางวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่มักจะขึ้นกับตัวแปรหลาย ๆ ตัวแปร ซึ่งในวิธีการแบบเก่า การทดลองมักกระทำโดย การเปลี่ยนแปลงตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง ในขณะที่ให้ค่าตัวแปรอื่น ๆ คงที่ อย่างไรก็ตาม การทดลองเหล่านั้นจะให้ผลการทดลองที่ไม่ถูกต้องนัก หากว่าตัวแปรแต่ละตัวมีความสัมพันธ์กัน

Sir Ronald A.Fisher ได้ปรับปรุงการวางแผนการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วย ทำให้สามารถแก้ไขวิธีทดลองซึ่งให้ผลคลาดเคลื่อน เนื่องจากความสำคัญของตัวแปรต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี วิธีการนี้เรียกว่า Factorial Experiments

ข้อได้เปรียบของ Factorial Experiments

1. ทำให้จำนวนครั้งของการทดลองต่อตัวแปรมีเพียงเท่าที่จำเป็น
2. ให้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ หรือสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ หรือผลตอบสนองต่อตัวแปรที่ศึกษา
3. ให้ผลการทดลองซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

4. เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการทำนายผลหลัก ๆ ของการทดลอง ถ้าไม่มีความเกี่ยวข้องกันของตัวแปร
5. เป็นพื้นฐานที่ดีของการขยายขนาดการทดลอง

2.3.2 2ⁿ Factorial Design

2ⁿ Factorial Design เป็นการพิจารณาถึงผลการทดลองที่มี n ตัวแปร แต่มีเพียง 2 ระดับ คือสูงและต่ำ เช่น การทดลองที่มี 3 ตัวแปร จำนวนการทดลองในกรณีนี้จะเป็น 8 การทดลอง

2ⁿ Factorial Design จะให้ผลของตัวแปรเดี่ยว และผลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ โดยการสร้างรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างค่าที่วัดได้จากการทดลองกับตัวแปรซึ่งตัวแปรที่เป็นอิสระต่อกัน จะให้ผลหลักของตัวแปรแต่ละตัว และถ้าค่าที่ได้จากการทดลองของตัวแปรใด ๆ เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนระดับของตัวแปรอื่น ตัวแปรนั้นจะสัมพันธ์กัน

2.3.3 Linear Regression Analysis

สำหรับความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างผลที่เกิดกับตัวแปรอิสระ สามารถเขียนเป็นสมการ Polynomial ดังเช่น

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n + e \quad (2.2)$$

เมื่อ y	คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง หรือตัวแปรที่ไม่เป็นอิสระ
B_0, B_1, \dots, B_n	คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ
X_1, X_2, \dots, X_n	คือ ตัวแปรอิสระ
e	คือ ค่าความผิดพลาดของการทดลอง

สมการ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในรูปสมการเส้นตรง อย่างไรก็ตามในบางครั้งความสัมพันธ์นี้จะไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์อันดับสอง และความเกี่ยวข้องของตัวแปรจะสามารถแสดงได้ด้วยสมการ 2.3

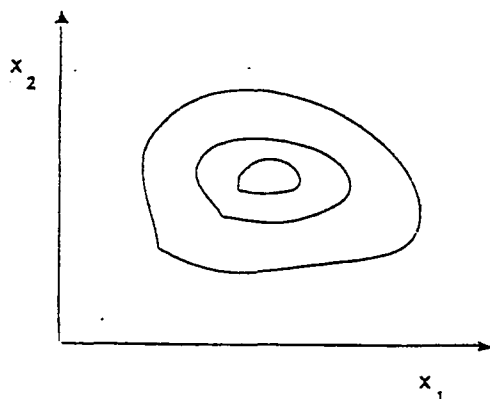
$$\begin{aligned}
 y = & B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \\
 & + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + \dots + B_{nn}X_n^2 \\
 & + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + \dots + B_{(n-1)n}X_{(n-1)}X_n + e
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

- B_0 : mean value
 B_1, B_2, B_3 : linear coefficient
 B_{11}, B_{22}, B_{33} : quadratic coefficient
 B_{12}, B_{13} : interaction term coefficient

2.3.4 แผนภาพทางสถิติ

จากสมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาแล้ว จะสามารถนำไปสร้างเป็นแผนภาพ (รูปที่ 2-2) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าตอบสนอง (ผลจากการวัดในการทดลอง) y กับค่าตัวแปรตามสมการ

$$y = f(X_1, \dots, X_n)$$



รูปที่ 2-2 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ของค่าตอบสนองกับตัวแปรต่าง ๆ

แผนภาพดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทดลอง y และตัวแปร 2 ตัวคือ X_1, X_2 ซึ่งตัวแปรทั้ง 2 นี้มีความเกี่ยวพันกัน โดยความสูงของแต่ละตัวแปรแสดงความสัมพันธ์กับค่า y

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้

- Torque Rheometer : Haake Rheocord 90 FISONS
- เครื่องผสมระบบปิดขนาดเล็ก : Rheomix 600
- เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง : Polymer Laboratories
- เครื่องอัดรีด : Polymer Laboratories
- เครื่องวัดเวลาการสุกตัวของยาง : Shimadzu
- เครื่องวัดคุณสมบัติทางเชิงกล : INSTRON 4301

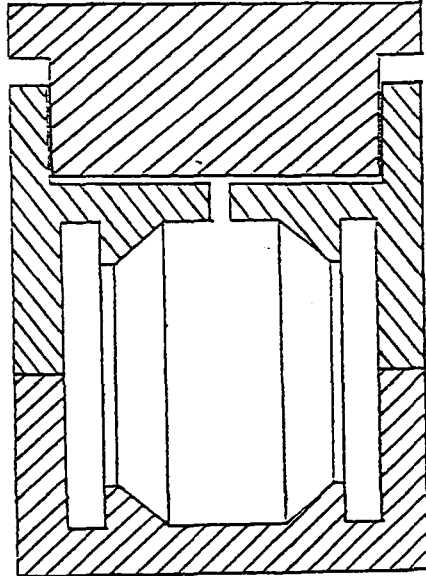
3.2 สารเคมี

- NR : TTR 5L
- เหม่าดำ : HAF N330
- กรดสเตียริก : เกรดการทดลอง
- ซิงค์ออกไซด์ : เกรดการค้า
- PVI 50 retarder : เกรดการค้า
- FLEXTOL H antioxidant : เกรดการค้า
- กำมะถัน : เกรดการค้า
- CBS : BAYER 343/92 Vulkacit CZ/EGC
- MBTS : เกรดการค้า

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การออกแบบ transfer mould

เพื่อเตรียมชิ้นงานให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ในการวัดสมบัติทางเชิงกลจึงทำการศึกษาและออกแบบ transfer mould เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงแบบ transfer mould

3.3.2 การวางแผนการทดลอง

โดยอาศัยหลักการของ 2-Level Factorial Experimental Design โดย

X_1 : ปริมาณของเขม่าดำ

X_2 : เวลาที่ใช้ในการสุกตัวของยาง

ตารางที่ 3-1 แสดงการวางแผนการทดลองแบบ 2^n factorial experimental design

batch	X_1	X_2
1	+	-
2	+	+
3	-	+
4	-	-
5	0	0
6	0	0

ตารางที่ 3-2 แสดงค่าจริงเทียบกับ code value ของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	-	0	+
X_1	30%	40%	50%
X_2	t_{70}	t_{80}	t_{90}

3.3.3 การเตรียมยาง

การผสมยางทำได้โดยใช้เครื่อง Torque Rheometer ที่ติดตั้งเครื่องผสมระบบปิดขนาด

เล็ก

สูตรผสมยาง

สารเคมี	สัดส่วน (phr)
ยาง	100
ซิงค์ออกไซด์	4
กรดสเตียริก	1
PVI 50	0.7
FLEXTOL H	0.7
CBS	1.5
MBTS	1
กำมะถัน	1.25
เขม่าดำ	X_1

สถานะของการผสมยาง

$$\text{fill factor} = 0.6$$

$$\text{เมื่อ } \text{fill factor} = \frac{W}{\rho_c V_c}$$

W : น้ำหนักของยาง

ρ_c : ความหนาแน่นของยางธรรมชาติ = 0.93 g/cm^3

V_c : ปริมาตรห้องผสม (500 cm^3)

อุณหภูมิห้องผสม = 40°C

ความเร็วโรเตอร์ = 40 รอบต่อนาที

อุณหภูมิโรเตอร์ = 40°C

วิธีการผสมที่เลือกใช้เป็นแบบ Regular Mixing โดยมีลำดับการเตรียมดังนี้

นาทีที่	ลำดับการผสมยาง
0	* ยาง - ปล่อยตัวกดลง
1	- ยกตัวกดขึ้น * ซิงค์ออกไซด์ * กรดสเตียริก * FLEXTOL H * PVI 50 * CBS * MBTS * เชมม่าดำ - ปล่อยตัวกดลง
10	- นำส่วนผสมออกจากห้องผสม

เมื่อใส่สารเคมีที่ใช้ผสมยางจนหมด ทำการผสมต่อจนครบเวลาตามที่ได้วางแผนไว้

3.3.4 การขึ้นรูปและการวัลคาไนซ์

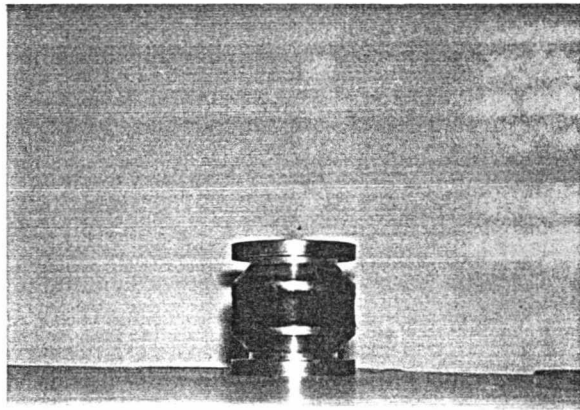
นำยางผสมสูตรที่เตรียมแล้วไปวัดเวลาการสุกตัวของยาง ด้วยเครื่องวัดการสุกตัวของยาง (Curelastomer)

ยางที่ผสมออกจากเครื่องผสมระบบปิด นำมารีดเป็นแผ่นโดยใช้เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง แล้วนำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และคำนวณปริมาณที่เหมาะสมที่จะใช้ในการขึ้นรูปแต่ละครั้ง เพื่อให้มีเศษยางเหลือน้อยที่สุด

การเตรียมผิวโลหะทำโดยการล้างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (Xylene) การพ่นด้วยทราย (Sand Blasting) และเคลือบด้วยสารยึดติด (Bonding Agent) ซึ่งในการทดลองใช้ระบบ two coat system คือ Chemlok 205 (primer coating) และ Chemlok 220 (second coating)

การขึ้นรูป

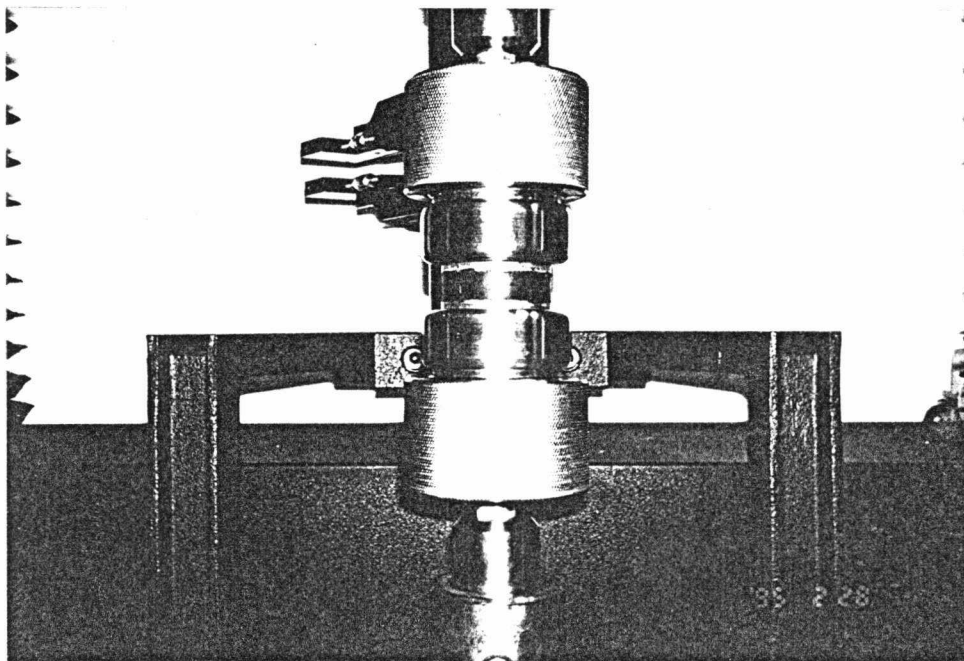
1. ทำการ pre-heat แม่แบบในเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
2. ชั่งยางให้มีน้ำหนักตามต้องการ
3. นำชิ้นโลหะที่เตรียมไว้ใส่ในส่วน cavity ของ transfer mould
4. นำยางใส่ลงในส่วน pot ของ transfer mould
5. ทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 40 psi โดยกำหนดเวลาตามที่วัดได้จากเครื่องวัดการสุกตัวของยาง ซึ่งจะได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงชิ้นงาน

3.3.5 การทดสอบฉันทันงาน

นำฉันทันงานที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการฉีกขาด (Tear Strength) โดยทำการบากที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับยางให้มีความลึก 1 เซนติเมตร แล้วนำมาทดสอบด้วยเครื่อง INSTRON 4301 ที่อัตราเร็ว 25 mm/min ใช้ load cell 500 kN โดยมีลักษณะการจับฉันทันงานในการทดสอบ ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 แสดงการจับฉันทันงานในการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 การขึ้นรูปและการวัลคาไนซ์

ทดสอบเวลาในการสุกตัวของยางผสมสูตรโดยใช้เครื่องวัล Curelastermer

ตารางที่ 4-1 แสดงค่า t_{70} t_{80} และ t_{90} ของยางผสมสูตร

ชนิดของยางผสม	t_{70} (นาที)	t_{80} (นาที)	t_{90} (นาที)
30 %CB	6.80	7.60	9.00
40 %CB(1)	-	5.85	-
40 %CB(2)	-	5.50	-
50 %CB	6.30	6.90	8.35

4.2 การทดสอบชิ้นงาน

นำชิ้นงานไปวัดความหนา และเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนที่จะทำการบด และทดสอบการฉีกขาด ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงผลของความหนา พื้นที่หน้าตัด และค่า Tear Strength

ชนิดของชิ้นงาน	แรง (kg)	พื้นที่หน้าตัด ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)	ความหนา ($\times 10^{-3} \text{ m}$)	Tear Strength ($\times 10^{10} \text{ N/m}^3$)	ค่าเฉลี่ย ($\times 10^{10} \text{ N/m}^3$)
t ₉₀ S+ (1)	227.4	10.566	0.947	11.363	11.977
t ₉₀ S+ (2)	258.1	10.566	0.948	12.83	
t ₉₀ S+ (3)	235.0	10.533	0.953	11.684	
t ₉₀ B+ (1)	308.2	10.516	0.935	15.673	16.669
t ₉₀ B+ (2)	354.9	10.566	0.940	17.866	
t ₉₀ B+ (3)	326.7	10.553	0.935	16.467	
t ₉₀ I+ (1)	269.9	10.566	0.950	13.444	14.658
t ₉₀ I+ (2)	289.1	10.566	0.977	14.003	
t ₉₀ I+ (3)	334.2	10.566	0.957	16.526	
t ₇₀ S+ (1)	78.93	10.329	1.255	3.045	4.170
t ₇₀ S+ (2)	110.5	10.266	1.108	4.857	
t ₇₀ S+ (3)	94.47	10.491	0.977	4.608	
t ₇₀ B+ (1)	89.6	10.316	1.133	3.817	4.585
t ₇₀ B+ (2)	105.5	10.429	0.973	5.100	
t ₇₀ B+ (3)	114.0	10.360	1.142	4.838	
t ₇₀ I+ (1)	114.8	10.441	1.128	4.874	4.678
t ₇₀ I+ (2)	112.0	10.150	1.030	5.356	
t ₇₀ I+ (3)	98.7	10.485	1.237	3.805	
GN 9 S (1)	79.87	10.454	0.942	4.055	3.915
GN 9 S (2)	72.65	10.566	0.975	3.523	
GN 9 S (3)	83.97	10.335	0.975	4.167	
GN 9 B (1)	83.54	10.391	0.983	4.090	5.160
GN 9 B (2)	136.9	10.347	0.970	6.820	
GN 9 B (3)	94.27	10.441	0.988	4.569	

ชนิดของชิ้นงาน	แรง (kg)	พื้นที่หน้าตัด ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)	ความหนา ($\times 10^{-3} \text{ m}$)	Tear Strength ($\times 10^{10} \text{ N/m}^2$)	ค่าเฉลี่ย ($\times 10^{10} \text{ N/m}^2$)
GN 9 I (1)	128.9	10.379	0.960	6.468	6.705
GN 9 I (2)	132.9	10.304	0.962	6.704	
GN 9 I (3)	143.1	10.379	0.993	6.942	
GN 9 S (1)	86.17	10.429	0.975	4.237	3.637
GN 9 S (2)	69.50	10.422	0.965	3.455	
GN 9 S (3)	65.99	10.548	0.972	3.218	
GN 10 B (1)	60	10.460	0.970	2.957	4.796
GN 10 B (2)	157.0	10.273	0.983	7.773	
GN 10 B (3)	73.37	10.410	0.963	3.659	
GN 10 I (1)	123.0	10.422	0.972	6.071	6.486
GN 10 I (2)	212.8	10.298	1.023	10.100	
GN 10 I (3)	68.56	10.360	1.007	3.286	
t ₉₀ S- (1)	136.8	10.504	0.953	6.833	6.787
t ₉₀ S- (2)	129.9	10.504	0.950	6.509	
t ₉₀ S- (3)	139.5	10.516	0.945	7.019	
t ₉₀ B- (1)	208.1	10.548	0.943	10.461	11.607
t ₉₀ B- (2)	263.7	10.554	0.975	12.813	
t ₉₀ B- (3)	234.6	10.548	0.963	11.548	
t ₉₀ I- (1)	238.9	10.548	0.955	11.858	12.094
t ₉₀ I- (2)	250.2	10.460	0.960	12.458	
t ₉₀ I- (3)	236.8	10.516	0.957	11.965	
t ₇₀ S- (1)	124.6	10.554	1.032	5.720	4.958
t ₇₀ S- (2)	109.7	10.554	1.150	4.514	
t ₇₀ S- (3)	113.7	10.426	1.175	4.640	

ชนิดของ ชิ้นงาน	แรง (kg)	พื้นที่หน้าตัด ($\times 10^{-6} \text{ m}^2$)	ความหนา ($\times 10^{-3} \text{ m}$)	tear strength ($\times 10^{10} \text{ N/m}^3$)	ค่าเฉลี่ย ($\times 10^{10} \text{ N/m}^3$)
t ₇₀ B- (1)	81.15	10.535	1.028	3.747	3.786
t ₇₀ B- (2)	67.30	10.566	0.968	3.290	
t ₇₀ B- (3)	97.52	10.516	1.073	4.321	
t ₇₀ I- (1)	71.36	10.566	1.022	3.304	4.654
t ₇₀ I- (2)	151.40	10.554	1.140	6.296	
t ₇₀ I- (3)	91.60	10.522	0.998	4.362	

หมายเหตุ

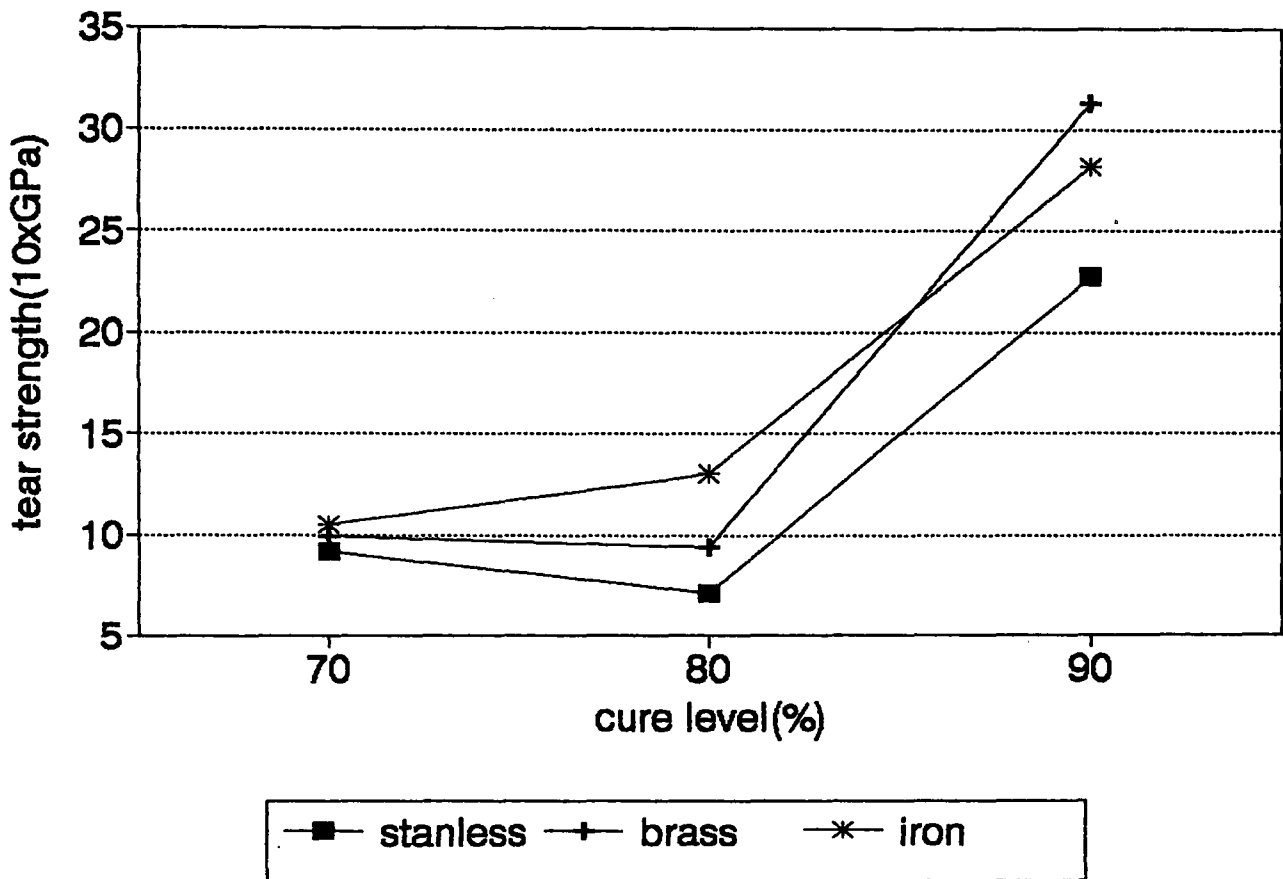
t₇₀, t₈₀ และ t₉₀ คือเวลาที่ใช้ในการสุกตัว

S, B และ I คือชนิดของโลหะ (สแตนเลส, ทองเหลือง และเหล็กตามลำดับ)

+ และ - คือ ปริมาณเขม่าดำ 50% และ 30% ตามลำดับ

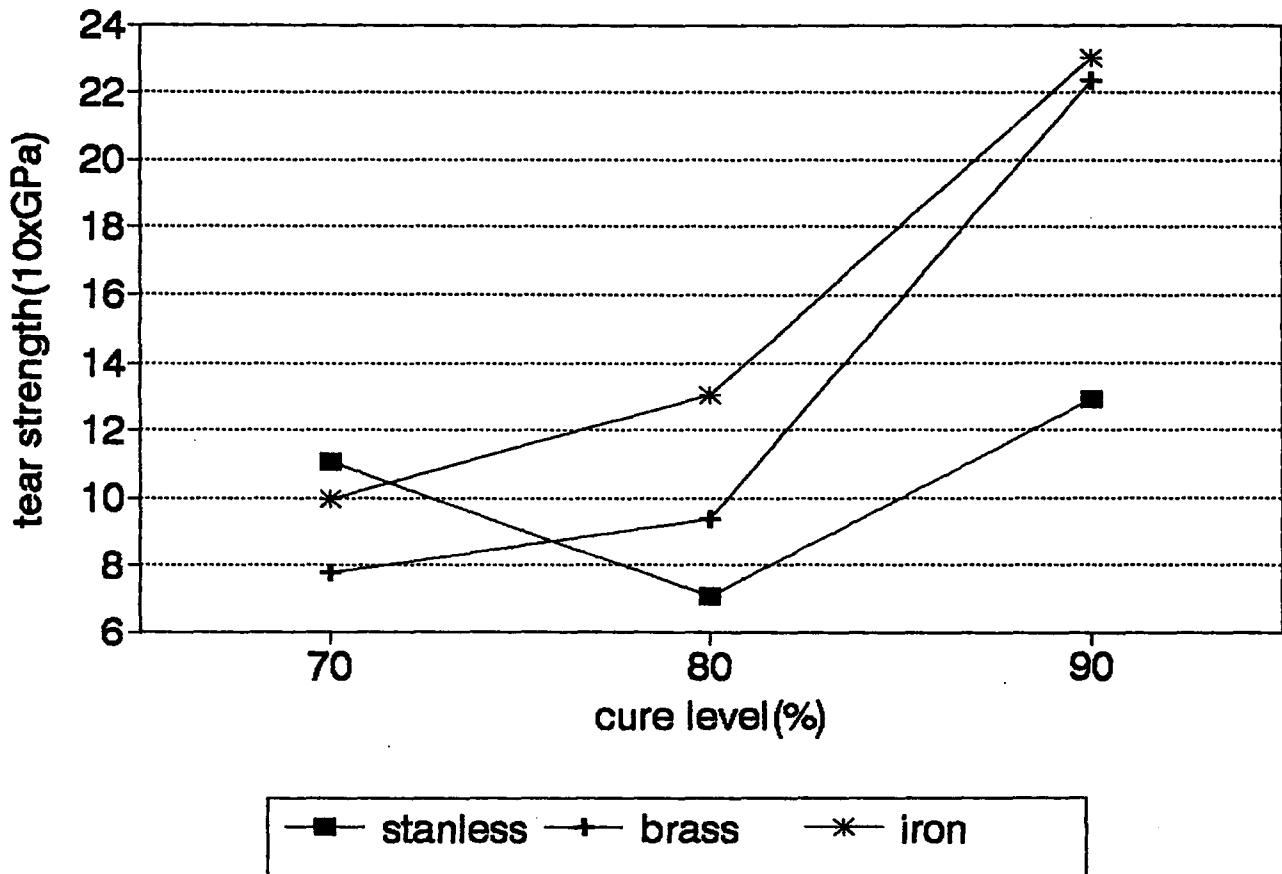
GN 9 และ GN 10 คือยางผสมที่มีเขม่าดำ 40% สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 ตามลำดับ

effect of cure time on tear strength of NR/metal bonding (high CB)



รูปที่ 4-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับ tear strength
เมื่อปริมาณเขม่าดำเท่ากับ 50 phr

effect of cure time on tear strength of NR/metal bonding (low CB)



รูปที่ 4-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับ tear strength
เมื่อปริมาณเคมีค่าเท่ากับ 30 phr

4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆด้วยโปรแกรม STATGRAPHICS

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปลี่ยนเป็น code value เพื่อให้อยู่ในหน่วยเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงค่า code value เมื่อเทียบกับค่าจริง

สูตรยาง	ปริมาณเขม่าดำ (X_1)		cure time (X_2)	
	ค่าจริง	ค่าที่ใช้	ค่าจริง	ค่าที่ใช้
$t_{90} +$	50	+1	9.00	+1
$t_{70} +$	50	+1	5.50	-1
$t_{90} -$	30	-1	9.00	+1
$t_{70} -$	30	-1	5.50	-1
0	40	0	7.25	0

ทำการป้อน code value ทั้งหมดลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป STATGRAPHICS คอมพิวเตอร์จะทำการ iteration เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระต่อค่า tear strength ผลลัพธ์ที่ได้จากการ iteration จะแสดงค่าคงที่ (B_0) ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระกำลัง 1, 2 และเทอมแสดงความเกี่ยวพัน ($B_1, B_2, \dots, B_{11}, B_{22}, \dots, B_{12}, B_{13}, \dots$) นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะระบุค่า t-value ด้วย ซึ่งค่า t-value นี้จะเป็นตัวหลักสำคัญในการพิจารณานัยสำคัญของแต่ละเทอมของตัวแปรโดยพบว่า $t\text{-value} \geq 2$ จะถือว่าตัวแปรมีระดับนัยสำคัญ 95% การพิจารณานัยสำคัญของแต่ละตัวแปรจะทำให้สามารถตัดตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่ำกว่า 95% ($t\text{-value} < 2$) ออกไปโดยลำดับ ทำให้เหลือตัวแปรในสมการน้อยลง ซึ่งสุดท้ายจะได้สมการที่บรรจุหรือประกอบด้วยตัวแปรที่นัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 95% เป็น model สำหรับอธิบายสมบัตินั้น ๆ ต่อไปโดยในการอธิบายความสัมพันธ์นั้นจะต้องสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ กับค่า tear strength ในรูปของ contour plot

4.3.1 ค่า tear strength ของ NR/brass bonding

จากการทำ iteration โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป STATGRAPHICS จะให้ข้อมูลที่ี้จากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ iteration ของค่า tear strength ของ NR/brass bonding

ตัวแปรอิสระ	coefficient	std. error	t-value
ค่าคงที่	4.978	0.182	27.3516
X_1	1.46525	0.128693	11.3856
X_2	4.97625	0.128693	38.6675
X_1^2	4.18375	0.222904	18.7693
X_1X_2	1.06575	0.128693	8.2813

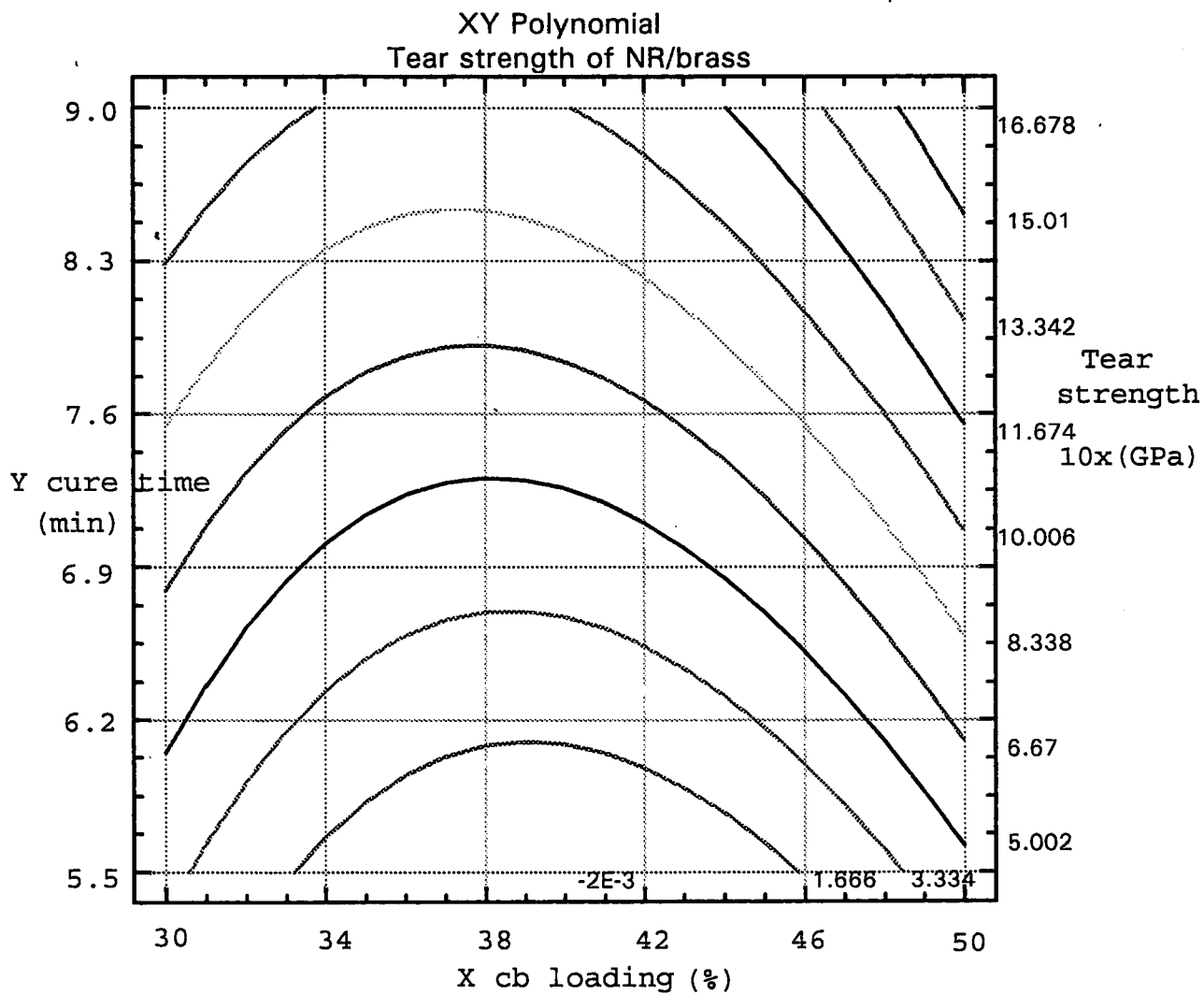
โดยค่า t-value คำนวณได้จาก

$$t\text{-value} = \frac{\text{Coefficient}}{\text{Std. error}}$$

จากตารางที่ 4-4 สามารถเขียนเป็นสมการสำหรับอธิบายพฤติกรรมของ tear strength ของ NR/brass bonding ได้ดังนี้

$$\text{tear strength}_{\text{NR/brass}} = 4.978 + 1.465X_1 + 4.976X_2 + 4.184X_1^2 + 1.066X_1X_2 \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 4.2 เทอมที่ 2 และ 4 หมายถึงความสัมพันธ์กับปริมาณเขม่าดำ (X_1) เทอมที่ 3 หมายถึงความสัมพันธ์กับ cure time (X_2) และเทอมที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่า มีผลเนื่องจากการเกิด interaction ระหว่างปริมาณเขม่าดำและ cure time



รูปที่ 4-3 contour ความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อ
ค่า tear strength ของ NR/brass bonding

จากรูปที่ 4-3 เป็นกราฟ contour ที่แสดงอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำและ cure time ต่อค่า tear strength ของ NR/brass bonding ในการอธิบายกราฟสามารถสังเกตได้จากเมื่อกำหนดปริมาณเขม่าดำให้คงที่ พบว่าที่ cure time ต่ำค่า tear strength จะมีค่าน้อยเนื่องจาก ณ ตำแหน่งนี้เกิดการ crosslinking ยังไม่สมบูรณ์ทำให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นน้อยและไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อ cure time มากขึ้นการเชื่อมโยงจะมากขึ้นทำให้ tear strength สูงขึ้น

พิจารณาที่ cure time คงที่เมื่อปริมาณเขม่าดำต่ำ ค่า tear strength จะมีค่าปานกลางและเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น tear strength จะลดลงจนถึงระดับหนึ่งและเพิ่มขึ้นอีกซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากที่ปริมาณเขม่าดำน้อย ๆ ยางจะมีความแข็งแรงน้อยทำให้เกิดการขาดที่บริเวณเนื้อยางและเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ tear strength จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเติมเขม่าดำจะทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้ง เพราะที่ผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งจะส่งผลได้ดีกับการยึดติดโลหะ

4.3.2 ค่า tear strength ของ NR/iron bonding

จากการทำ iteration โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATGRAPHICS จะให้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4-5

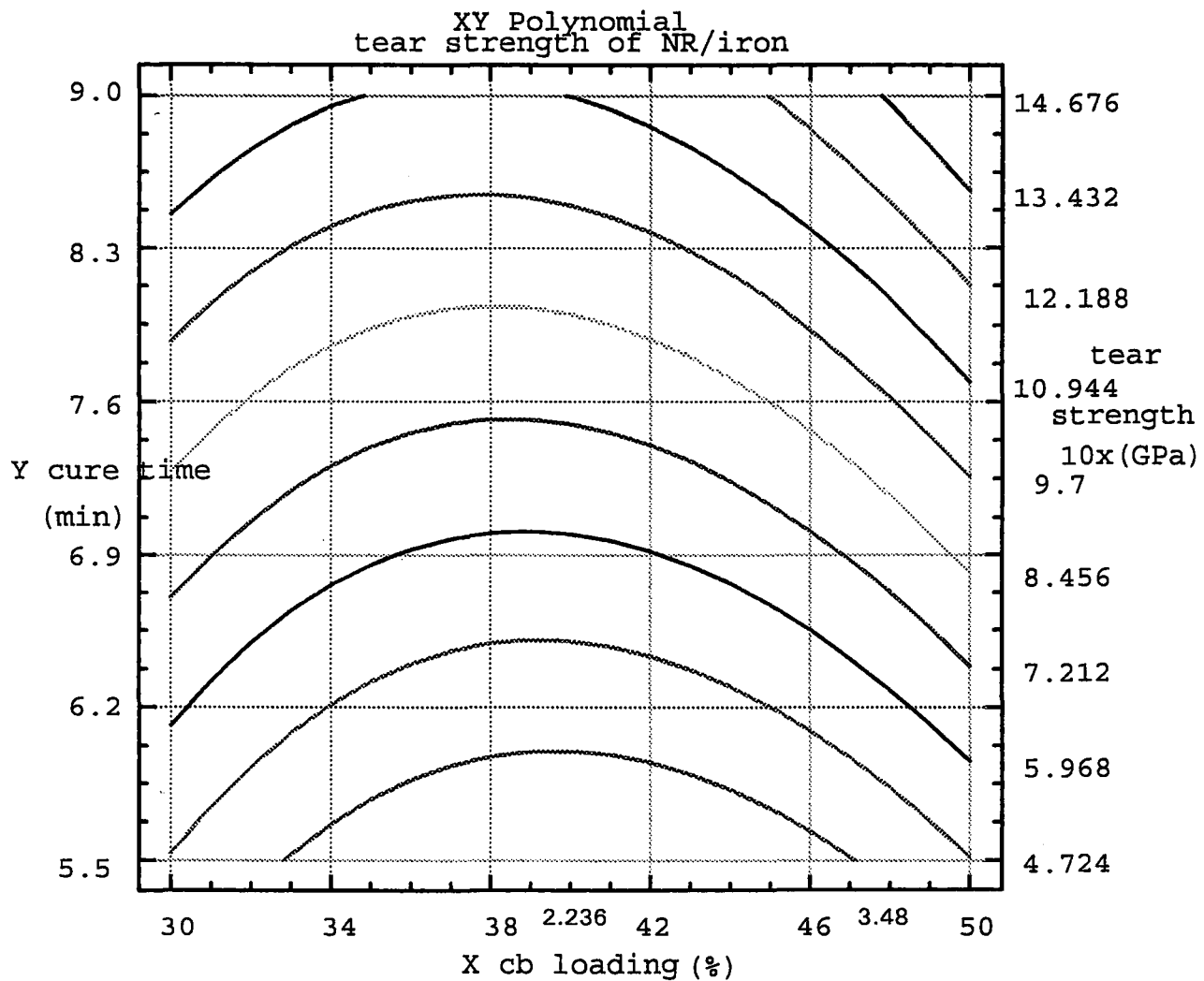
ตารางที่ 4-5 แสดงค่าที่ได้จากการทำ iteration ของ tear strength ของ NR/iron bonding

ตัวแปรอิสระ	coefficient	std. error	t-value
ค่าคงที่	6.5955	0.1095	60.2329
X_1	0.647	0.077428	8.3561
X_2	4.355	0.077428	56.2457
X_1^2	2.4255	0.13411	18.0860
X_1X_2	0.635	0.077428	8.2011

จากตารางที่ 4-5 สามารถเขียนสมการอธิบายพฤติกรรมของ tear strength ของ NR/iron bonding ได้ดังนี้

$$\text{tear strength}_{\text{NR/iron}} = 6.596 + 0.647X_1 + 4.355X_2 + 2.426X_1^2 + 0.635X_1X_2 \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 จะเห็นว่าเทอมที่ 2 และ 4 แสดงถึงความสัมพันธ์กับปริมาณเขม่าดำ สำหรับเทอมที่ 3 แสดงถึงความสัมพันธ์กับ cure time และเทอมที่ 5 แสดงให้เห็นว่ามีผลเนื่องจากเกิด interaction ระหว่างเขม่าดำและ cure time ซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟ contour แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ตามสมการได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 contour ความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อค่า tear strength ของ NR/iron bonding

จากรูปที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณเขม่าดำคงที่เมื่อ cure time เพิ่มขึ้นค่า tear strength จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อ cure time เพิ่มการเชื่อมโยงก็จะเพิ่มด้วย

เมื่อให้ cure time คงที่ พบว่าที่ปริมาณเขม่าดำคงที่ค่า tear strength จะมีค่าหนึ่งและเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ค่า tear strength จะลดลงหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นอีกซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในช่วงแรกยางยังไม่มีความแข็งแรงมากพอ จึงเกิดการขาดที่ยาง ค่า tear strength จึงมีค่าน้อยแต่เมื่อหลังจากยางมีความแข็งแรงในระดับหนึ่ง ค่า tear strength ก็จะเพิ่ม เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่ม

4.3.3 ค่า tear strength ของ NR/stainless bonding

จากการทำ iteration โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATGRAPHICS จะให้ข้อมูลที่ได้จาก การคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4-6

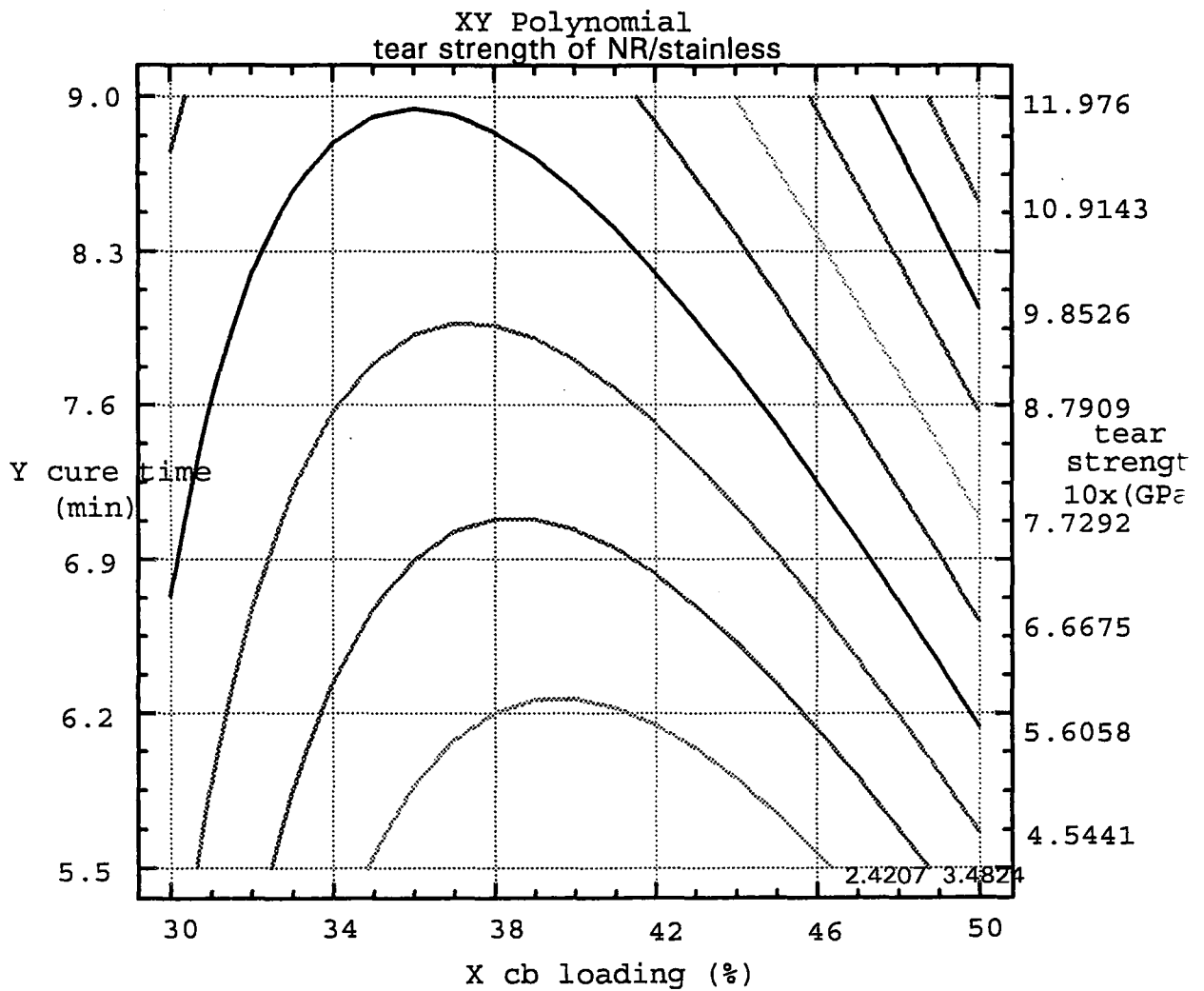
ตารางที่ 4-6 แสดงค่าที่ได้จากการทำ iteration ของ tear strength ของ NR/stainless bonding

ตัวแปรอิสระ	coefficient	std. error	t-value
ค่าคงที่	3.766	0.139	27.1655
X_1	1.1005	0.098288	11.1967
X_2	2.409	0.098288	24.5096
X_1^2	3.197	0.17024	18.7794
X_1X_2	1.4945	0.098288	15.2053

จากตารางที่ 4-6 สามารถเขียนสมการอธิบายพฤติกรรมของ tear strength ของ NR/stainless bonding ได้ดังนี้

$$\text{tear strength}_{\text{NR/stainless}} = 3.776 + 1.101X_1 + 2.409X_2 + 3.197X_1^2 + 1.495X_1X_2 \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 จะเห็นว่าเทอมที่ 2 และ 4 แสดงถึงความสัมพันธ์กับปริมาณเขม่าดำ เทอมที่ 3 แสดงถึงความสัมพันธ์กับ cure time และเทอมที่ 5 แสดงให้เห็นว่ามีผลเนื่องจากการเกิด interaction ระหว่างปริมาณเขม่าดำและ cure time ซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟ contour แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของตัวแปรตามสมการได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 contour ความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อค่า tear strength ของ NR/stainless bonding

จากรูปที่ 4-5 เมื่อพิจารณาผลของ cure time ต้องพิจารณาที่เขม่าดำคงที่จะพบว่าเมื่อ cure time มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ tear strength มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นผลจาก degree of crosslinking ที่มากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาผลของปริมาณเขม่าดำจะต้องพิจารณาที่ cure time คงที่ จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ จะส่งผลให้ค่า tear strength ลดลงเล็กน้อย จากนั้นจึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชัน จึงช่วยเพิ่มความมีขั้วให้แก่ง่ายทำให้การยึดติดมีความแข็งแรงขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การยึดติดของยางกับโลหะจะมีความแข็งแรงขึ้นเมื่อเพิ่ม cure time เพราะจะเป็นการเพิ่ม crosslink density
2. การเพิ่มปริมาณเคมีดำในยางผสมสูตรจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างโลหะกับยาง
3. การยึดติดระหว่างยางกับโลหะต่างชนิดกันจะให้ค่าความแข็งแรงไม่เท่ากัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมชิ้นโลหะก่อนทำการยึดติดกับยาง เพื่อความสะดวกในการวัดค่า tear strength ควรทำการเคลือบด้วยสารยึดติดเพียงครั้งหนึ่งของพื้นที่ผิวสัมผัส
2. ควรเตรียมชิ้นงานให้มีความหนาของยางน้อยลง

บรรณานุกรม

1. Weih,M.A. , Siverling,C.E. and Sexsmeth, F.H. "Effect of compounding ingredients on esatomer to metal adhesion" RUBBER WORLD pp. 29-35, August 1986.
2. CUTTS,C. in Laboratory Tesing of Rubber to Metal Bond pp.367-404, Malaysian Rubber Producers' Research Association, Brickendonbury, Herford, UK.
3. Blow,C.M. and Hepbum,C. in Rubber Technology and Manufacture 2nd ed., pp.463-470, Page bros Ltd., London, 1982.
4. ASTM Commitee on Standards "Standard Test Methods for Rubber property - Adhesion to Rigid Substrates" American Society for testing & Materials, Philadelphia, 1989.
5. เจษฎา เชนรักมาตุภูมิ และ สุภาวดี รักจิตต์ "อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อสมบัติทางไดนามิกส์ของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง 2536

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

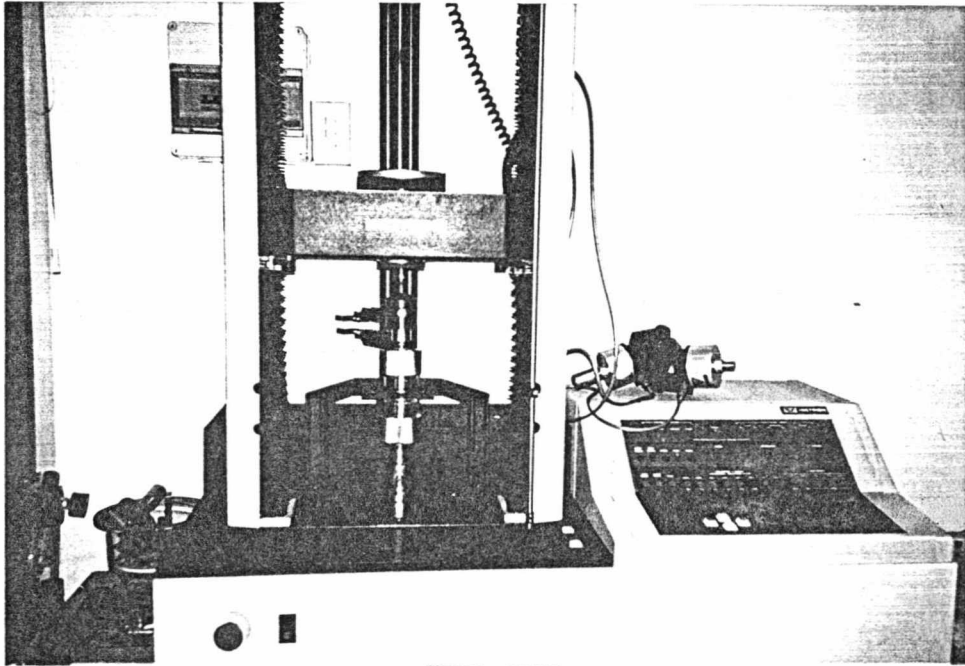
ตารางแสดงความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนการทดสอบ

สูตร	ความหนา (เซนติเมตร)				เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
t ₉₀ S+ (1)	0.940	0.955	0.945	0.947	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₉₀ S+ (2)	0.950	0.950	0.945	0.948	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₉₀ S+ (3)	0.955	0.950	0.955	0.953	4.000	4.000	3.995	3.998
t ₉₀ B+ (1)	0.935	0.940	0.930	0.935	3.985	3.995	3.995	3.992
t ₉₀ B+ (2)	0.940	0.940	0.940	0.940	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₉₀ B+ (3)	0.925	0.9452	0.935	0.935	3.995	4.000	4.000	3.998
t ₉₀ I+ (1)	0.940	0.950	0.960	0.950	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₉₀ I+ (2)	0.970	0.980	0.980	0.977	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₉₀ I+ (3)	0.945	0.965	0.960	0.957	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₇₀ S+ (1)	1.170	1.300	1.295	1.255	3.950	3.950	3.985	3.962
t ₇₀ S+ (2)	1.115	1.135	1.075	1.108	3.955	3.900	4.000	3.952
t ₇₀ S+ (3)	0.995	0.995	0.940	0.977	3.990	3.990	3.985	3.988
t ₇₀ B+ (1)	1.105	1.170	1.125	1.133	3.950	3.960	3.970	3.960
t ₇₀ B+ (2)	0.975	1.005	0.940	0.973	4.000	3.965	3.970	3.978
t ₇₀ B+ (3)	1.210	1.125	1.090	1.142	3.985	3.945	3.970	3.967
t ₇₀ I+ (1)	1.010	1.235	1.140	1.128	3.960	4.000	3.980	3.980
t ₇₀ I+ (2)	1.105	1.040	0.945	1.030	3.900	3.930	3.920	3.917
t ₇₀ I+ (3)	1.315	1.210	1.185	1.237	3.995	3.980	3.985	3.987

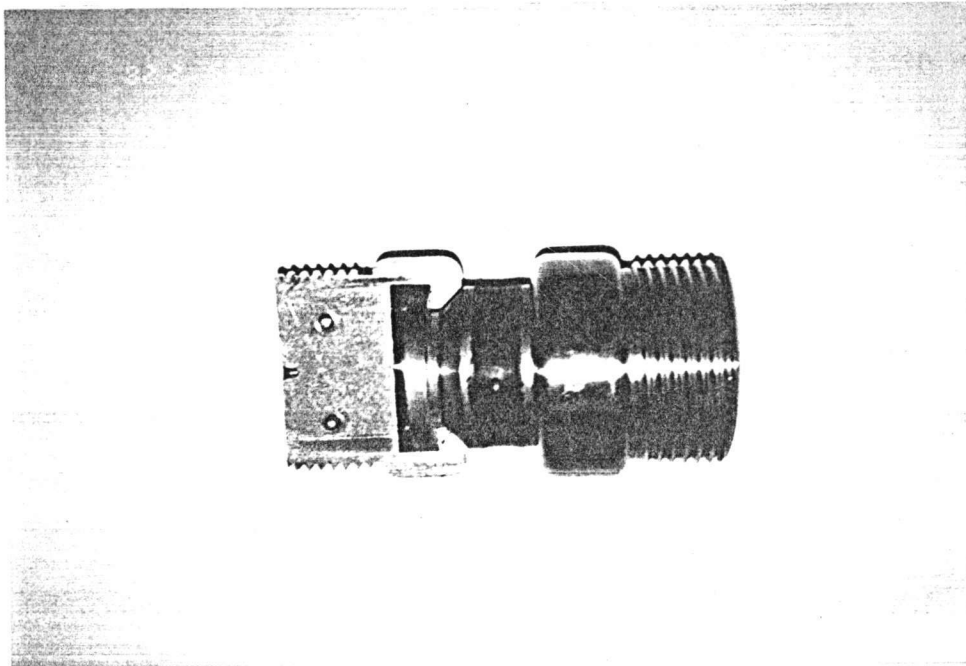
สูตร	ความหนา (เซนติเมตร)				เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
t ₉₀ S- (1)	0.950	0.950	0.960	0.953	3.990	3.990	3.990	3.990
t ₉₀ S- (2)	0.950	0.955	0.945	0.950	3.980	4.000	3.990	3.990
t ₉₀ S- (3)	0.930	0.950	0.955	0.945	3.995	4.000	3.980	3.992
t ₉₀ B- (1)	0.940	0.950	0.940	0.943	3.990	4.000	4.000	3.997
t ₉₀ B- (2)	0.970	0.970	0.985	0.975	3.995	4.000	4.000	3.998
t ₉₀ B- (3)	0.955	0.970	0.965	0.963	3.995	4.000	3.995	3.997
t ₉₀ I- (1)	0.950	0.960	0.955	0.955	3.990	4.000	4.000	3.997
t ₉₀ I- (2)	0.950	0.970	0.960	0.960	3.995	3.980	3.975	3.983
t ₉₀ I- (3)	0.950	0.960	0.960	0.957	4.000	3.975	4.000	3.992
t ₇₀ S- (1)	1.060	1.030	1.005	1.032	3.995	4.000	4.000	3.998
t ₇₀ S- (2)	1.315	0.990	1.145	1.150	4.000	3.995	4.000	3.998
t ₇₀ S- (3)	1.350	1.165	1.010	1.175	3.985	3.990	3.960	3.978
t ₇₀ B- (1)	1.030	1.040	1.015	1.028	4.000	3.985	4.000	3.995
t ₇₀ B- (2)	0.965	0.940	1.000	0.968	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₇₀ B- (3)	1.135	1.030	1.055	1.073	3.995	3.985	3.995	3.992
t ₇₀ I- (1)	1.020	1.030	1.015	1.022	4.000	4.000	4.000	4.000
t ₇₀ I- (2)	1.250	1.100	1.070	1.140	4.000	4.000	3.995	3.998
t ₇₀ I- (3)	1.035	0.985	0.975	0.998	3.990	3.990	4.000	3.993

สูตร	ความหนา (เซนติเมตร)				เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
GN 9S (1)	0.925	0.885	1.015	0.942	3.990	3.980	3.975	3.982
GN 9S (2)	0.970	0.970	0.985	0.975	4.000	4.000	4.000	4.000
GN 9S (3)	0.985	0.960	0.980	0.975	3.975	3.965	3.950	3.963
GN 9B (1)	0.990	1.000	0.960	0.983	3.975	3.970	3.970	3.972
GN 9B (2)	0.985	0.965	0.960	0.970	3.950	3.955	3.990	3.965
GN 9B (3)	0.980	0.990	0.995	0.988	4.000	3.970	3.970	3.980
GN 9 I (1)	0.910	1.005	0.965	0.960	3.955	3.960	3.995	3.970
GN 9 I (2)	0.965	0.980	0.940	0.962	3.955	3.940	3.980	3.958
GN 9 I (3)	0.985	0.980	1.015	0.993	3.960	3.965	3.985	3.970
GN 10S (1)	0.980	0.955	0.990	0.975	3.975	4.000	3.945	3.978
GN 10S (2)	0.980	0.960	0.995	0.965	3.970	3.995	3.965	3.977
GN 10S (3)	0.970	0.950	0.985	0.972	4.000	3.985	4.000	3.997
GN 10B (1)	1.035	0.960	0.915	0.970	4.000	3.960	3.980	3.983
GN 10B (2)	0.990	0.970	0.990	0.983	3.955	3.940	3.965	3.953
GN 10B (3)	0.960	0.950	0.980	0.963	3.985	3.970	3.970	3.975
GN 10 I (1)	0.985	0.950	1.025	0.972	3.970	3.970	3.990	3.977
GN 10 I (2)	1.020	1.000	1.051	1.023	3.990	3.970	3.930	3.957
GN 10 I (3)	0.960	1.005	1.010	1.007	3.980	3.970	3.950	3.967

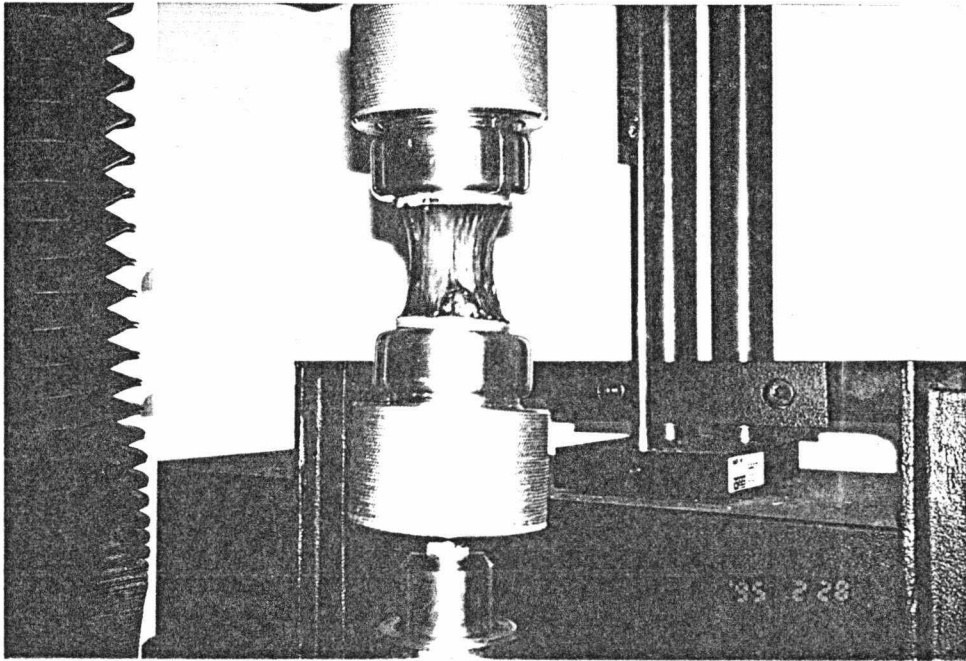
ภาคผนวก ข



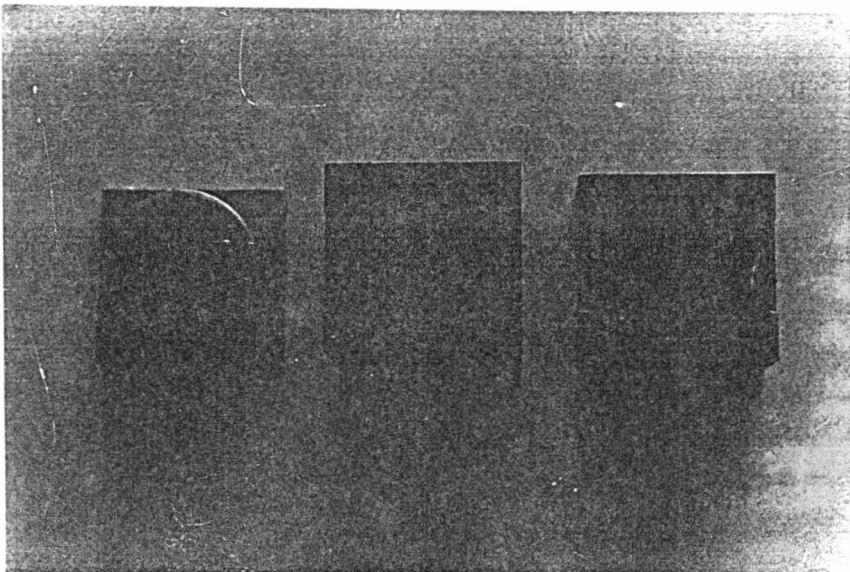
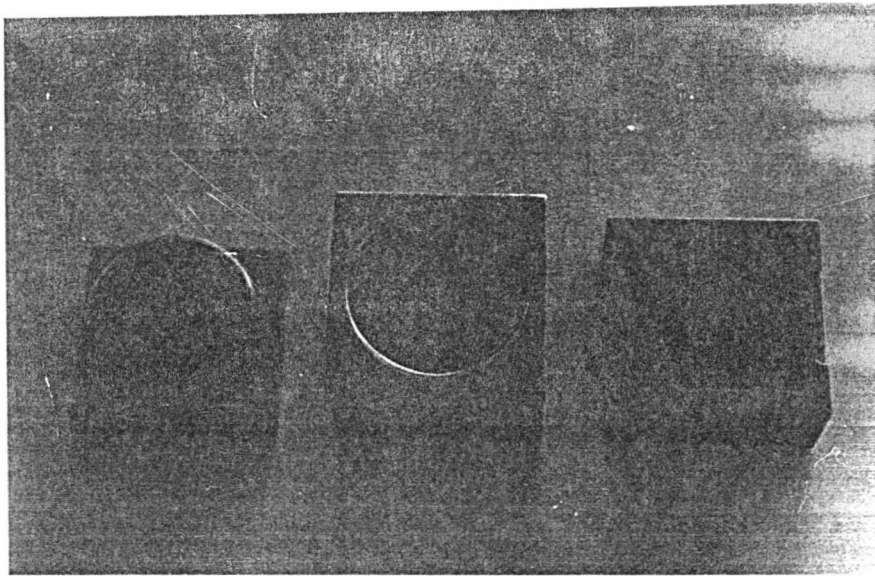
รูปแสดงเครื่องวัดคุณสมบัติเชิงกล (INSTRON 4301)



รูปแสดงหัวจับชิ้นงาน



รูปแสดงการขาดของชิ้นงานขณะตั้ง



รูปแสดง transfer mould