รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์ และคณะ

กันยายน 2547

สัญญาเลขที่ RDG4650002

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย

คณะผู้วิจัย **สังกัด**

1. **ผศ. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์**
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. **นายอนันต์ เต็มเปี่ยม**
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

สนันสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

Project Title Development of Surface Swimming Goggle Design Process by Using Computer-Aided Technology

Principle Investigator and Affiliation

Asst. Prof. Satjarthip Thusneyapan

Department of Mechanical Engineering,

Faculty of Engineering

Kasetsart University, Bangkok 10900

Tel.: 02-642-8555 Ext. 1818

Fax: 02-579-4576

E-mail: fengsjt@ku.ac.th

Problem and Rational

Optec Co., Ltd. has been developed the product by manually design swimming goggles on drawing papers and presented to the customer. The current design method has a long product development period. The major draw back of this method is the time for modification to satisfy the customer requirement. Additionally, the product details drawing needs to be updated and used for manufacturing molds. Consequently, manually design possibly leads to error and makes the product development cycle longer, as well as lower new products annually than competitors. At the present, the company has the production rate at the average of 10 models per year.

Moreover, the goggles need to pass the standard product quality and safety evaluation according to BS5883. The evalution can only be done at the United Kingdom with great expenses. Therefore, the need for a mordern engineering design tool, the Computer-Aided Technology, will support the design to meet the above requirements. The design pratice will assist Optc Co., Ltd to be more competitive in the international market.

Objectives

1. To develop the surface swimming goggle design procedure by using Computer-Aided Design (CAD). The objective was to collect the features of the goggles as a library for quick, convenient, easy retrieval and modification. The procedures resulted in less development time for over 30% from the present method.
2. To use the Computer-Aided Engineering (CAE) simulate the goggle-testing standard according to the standard BS5883: 1996.
3. To apply the Computer-Aided Engineering analysis stresses on the face and head for wearing comfort evaluation.

Methodology

1. Use the Computer-Aided Design technology to collect solid models of the goggle features. The application software is Pro/ENGINEER.
2. Transfer design process and methodology for creating goggle features.
3. Use the Computer-Aided Engineering to analysis the mechanical product testing according to the standard BS5883: 1996, and perform the design testing from the existing products for at least two models.
4. Use the Computer-Aided Design technology to create the human face and head model by using surface scanned technology.
5. Use the Computer-Aided Engineering technology to evaluate goggle wearing comfort on face and head by using at least two existing products for test comparison.

Expected Outputs

1. Application of CAD in goggle design for ease of use, convenience and quick design. This will lead the goggle design and development done in minimal time and capable of having more design. Additionally, it assists the company to be the leader in goggle manufactures in the free trade market.

2. The availability of the product database in electronic CAD data. The databases provide the ease in searching and taken for the new design and development.
3. Capable of simulating the international product quality test of the goggles before actually built. The simulation will reduce time and raw materials from any modification in order to pass the test, and less expense in testing at the UK.
4. Gain engineering knowledge in analyzing goggle-wearing comfort at the face and the head. The analysis will provide the company sale marketing that will help the company to have its own trade brand for competitive international market.
5. Provide the technology transfer, which will assist the company to be self-dependent.

บทคัดย่อ

การว่ายน้ำเป็นกีฬา และกิจกรรมยามว่างอย่างหนึ่งที่ได้รับความนิยมทั่วโลก อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับกิจกรรมเหล่านี้คือ แว่นตาว่ายน้ำ จุดประสงค์หลักของการสวมแว่นตาว่ายน้ำคือความปลอดภัยและการมองเห็นอย่างชัดเจน มาตรฐานทดสอบคุณภาพของแว่นตาว่ายน้ำที่สำคัญ คือ BS5883 แว่นตาที่ผ่านการทดสอบนี้ นอกจากจะสามารถขายในทวีปยุโรปแล้ว ยังสามารถขายได้ทั่วโลก นอกจากนี้แว่นตาสมัยใหม่เป็นสิ่งที่เป็นแฟชั่นอย่างหนึ่ง จึงมีรูปทรงที่สวยงามและซับซ้อน ดังนั้นการออกแบบแว่นตาที่เหมาะสมจึง เป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้เวลาในการนำสินค้าออกจำหน่ายสั้นลง วัตถุประสงค์แรกของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนากระบวนการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (Computer - Aided Design, CAD) การจัดกลุ่มฟีเจอร์ของแว่นตาว่ายน้ำเป็นโซลิดโมเดลได้พิสูจน์ว่า เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการออกแบบการใช้ CAD จึงช่วยลดช่วงเวลาของการออกแบบถึงการนำจำหน่ายได้อย่างมาก วัตถุประสงค์ที่สอง เป็นการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer - Aided Engineering, CAE) จำลองการทดสอบคุณภาพ ชิ้นส่วนตัวอย่างของแว่นตาได้ทดสอบภายในประเทศตามมาตรฐานของ BS5883 เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลองการทดสอบโดยใช้ Finite Element Analysis (FEA) การจำลองระยะยืดของการทดสอบการดึงของชิ้นจมูก มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 11% ระยะยุบตัวภายใต้การทดสอบการอัดของถ้วยตามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในช่วง –4.21% ถึง 0.29% ผล FEA ของการทดสอบการกระแทก แสดงความเค้นต่ำกว่าค่าความเค้น Ultimate ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบทางกลที่ไม่พบการแตกร้าวหรือการบุบยุบถาวรบนผิวเลนส์ วิธี FEA ที่พัฒนาใช้สำหรับจำลองการสวมใส่ ในงานวิจัยนี้สามารถระบุตำแหน่งที่ทำให้เกิดความไม่สบายในการสวมใส่ได้

Abstract

Swimming is one of the most popular sport and pastime activities worldwide. The most essential device for the actives is a surface swimming goggle. The main purposes for wearing the goggles are safety and vision. The standard quality testing - BS5883, is an essential evaluation for safe goggles. The verification permits the sale not only in Europe but worldwide. Additionally, the modern swimming goggles become fashion items and have complex shapes. Therefore, the proper goggle design is the must for shortening the time to market. The first aim of this research is to develop the goggle design procedure by using Computer-Aided Design (CAD). Grouped goggle features into solid models, has been found convenient and accelerated the design. The use of CAD greatly reduces the design to market period. The second aim is to use Computer-Aided Engineering (CAE) simulate the quality test. Samples of goggle were locally tested, according to the BS Standard, for supporting the simulation of Finite Element Analysis (FEA). The elongation under tensile simulation of nosepieces has an average error of 11 %. The deformation under compressive test of eye cups has the average error from –4.21 % to 0.29%. The impact results by FEA indicated stresses less than the ultimate stress, satisfied the test result with no fracture or permanent deformation on lens. Our FEA method of conducting the wearing simulation can indicate the discomfort location.

แบบสรุปโครงการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5)

สัญญาเลขที่	RDG4650002	**ชื่อโครงการ**	การพัฒนาการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย
หัวหน้าโครงการ	ผศ. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์		
สถาบัน	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์		
โทรศัพท์	02-942-8555 ต่อ 1818	**โทรสาร**	02-579-4576
E-mail address	fengsjt@ku.ac.th		

ความสำคัญ/ความเป็นมา

อุตสาหกรรมการผลิตแว่นตาว่ายน้ำในตลาดการค้าโลก มีแห่งผลิตที่สำคัญแหล่งหนึ่ง คือ ประเทศไทย โดยมีบริษัท Optech Co., Ltd. เป็นบริษัทหนึ่งที่ได้ดำเนินธุรกิจการผลิตแว่นตาว่ายน้ำให้แก่ผู้จำหน่ายที่มีชื่อเสียงภายใต้เครื่องหมายการค้าต่าง ๆ เช่น Speedo, TYR และ Arena เป็นต้น โดยบริษัท Optech Co., Ltd. เป็นผู้ออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ แล้วสั่งผลิตแม่พิมพ์จากภายนอกโรงงาน ภายในโรงงานทำการผลิตชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำต่าง ๆ รวมถึงบรรจุภัณฑ์ และดำเนินการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำและบรรจุหีบห่อส่งให้แก่ลูกค้า

ผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว มีรูปทรงแปรเปลี่ยนตามยุคสมัย นอกเหนือจากจุดประสงค์เพื่อการมองเห็นอย่างชัดเจนใต้และเหนือผิวน้ำขณะว่ายน้ำและป้องกันนัยน์ตาจากสารเคมีและสิ่งสกปรกในน้ำ แว่นตาว่ายน้ำยังใช้เสมือนเป็นเครื่องประดับใบหน้าของนักว่ายน้ำ รูปทรงจึงเป็นแฟชั่นที่ทันสมัยและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งปี รูปแบบของแว่นตาว่ายน้ำส่วนหนึ่งมาจากการนำเสนอจากผู้ผลิต แล้วผู้ขายนำไปจัดจำหน่ายทั่วโลกภายใต้เครื่องหมายการค้าของตน

ณ ปัจจุบัน บริษัท Optech Co., Ltd. ดำเนินการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยใช้วิธีการออกแบบ บนแผ่นกระดาษขึ้นมาก่อน แล้วจึงนำแบบที่ได้ เสนอต่อลูกค้า ซึ่งทำให้เสียเวลามาก และเกิดการสูญเสียเวลาอย่างมากเมื่อต้องดำเนินการแก้ไขแบบเพื่อการนำเสนอใหม่ให้ได้ตรงตามความพอใจของลูกค้า นอกจากนี้แบบภาพวาดรายละเอียดเพื่อการผลิต จะต้องสร้างขึ้นใหม่เพื่อเป็นข้อมูลในการผลิตแม่พิมพ์ ทำให้เกิดความ คลาดเคลื่อน และเป็นผลให้ช่วงระยะเวลา การพัฒนาผลิตภัณฑ์ นานกว่าคู่แข่ง และมีจำนวนการนำเสนอรูปทรงใหม่ๆ ต่อปีต่ำ โดยปัจจุบัน บริษัท สามารถผลิตได้เฉลี่ย 10 แบบต่อปี

ความสำคัญ/ความเป็นมา (ต่อ)

ปัญหาอื่นๆ ที่ประสบ คือ การพัฒนาแว่นตาว่ายน้ำจากรูปทรงเดิมที่เป็นรูปทรงมาตรฐาน ที่ไม่เป็นรูปทรงตามแฟชั่น ซึ่งรูปแบบนี้เป็นผลิตภัณฑ์มีตลาดรองรับอย่างสม่ำเสมอทุกปี มีปัญหาด้านข้อมูลที่ใช้เป็นแบบกระดาษภาพวาด ทำให้ต้องเริ่มต้นวาดแบบใหม่ รวมถึงปัญหาการสูญเสียเวลาเนื่องจากการเปลี่ยนขนาด เช่น จากแบบสำหรับผู้ใหญ่ ให้เป็นขนาดเล็กสำหรับเด็ก จนถึงปัจจุบัน บริษัท Optech Co., Ltd. มีจำนวนแว่นตาว่ายน้ำที่ได้ผลิตมาแล้วรวมกันมากกว่า 200 แบบ แบบเหล่านี้ในอนาคตสามารถนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ได้ หรือใช้อ้างอิงเพื่อการผลิตทูลหรือแม่พิมพ์เพื่อทดแทนของเก่าที่เสื่อมอายุ ปัญหาเนื่องจากการออกแบบและการเก็บข้อมูลของแบบที่ใช้วิธีการเดิมนี้ ยังส่งผลต่อเนื่องต่อกระบวนการผลิต คือ คุณภาพและการสูญเสียวัตถุดิบโดยเฉพาะในช่วงการทดสอบสายการผลิตและเกิดการสูญเสียพลังงานจากข้อบกพร่องดังกล่าว

จากเหตุผลดังกล่าว แนวทางการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย (Computer-Aided Technology) อันได้แก่ คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (Computer-Aided Design หรือ CAD) และคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering หรือ CAE) จะสามารถช่วยเสริมให้บริษัท Optech Co., Ltd. เพิ่มศักยภาพด้านการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำให้สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ รวมถึงเป็นทางนำไปสู่การมีเครื่องหมายการค้าที่เป็นของประเทศไทยได้ โดยคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบจะนำมาประยุกต์เพื่อการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำจากรูปทรงเฉพาะแบบ (feature) ต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำที่จะดำเนินการวิจัยโดยการรวบรวมเป็น Library เพื่อให้การออกแบบสามารถดำเนินการได้โดยง่ายด้วยการแก้ไขขนาดต่าง ๆ และอาจมีดัดแปลงบ้างเพียงเล็กน้อย ส่วนคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมจะนำมาใช้เพื่อการจำลองการทดสอบให้ได้ตรงตามมาตรฐานสากลของผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำ (เช่นBS5883:1996) รวมถึงการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบให้สวมใส่ที่แนบสนิทกับใบหน้าและให้ความสบายต่อใบหน้าและศีรษะ

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ ในการพัฒนารูปทรงเฉพาะแบบ (Feature) ต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำ ให้ สะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการออกแบบ ทำให้สามารถลดเวลาการพัฒนาการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำได้เร็วมากกว่า 30% ของเวลาที่ใช้โดยวิธีการเดิม

วัตถุประสงค์ของโครงการ

2. เพื่อนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม ใช้จำลองการทดสอบทางกลตามมาตราฐานผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำ BS5883: 1996

3. เพื่อนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมวิเคราะห์ระดับความเค้นกดที่ใบหน้าและศีรษะและประเมินการสวมใส่ที่ให้ความสบายต่อใบหน้าและศีรษะ

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. สามารถออกแบบชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้โปรแกรม CAD ช่วยการออกแบบ ทำให้การพัฒนาสร้างแบบรุ่นใหม่ๆ ได้รวดเร็วขึ้น	1	- ลดเวลาการออกแบบ - การนำเสนอแบบต่อลูกค้าทำได้ง่ายและรวดเร็ว - ลดเวลาในการสร้างและแก้ไขแม่พิมพ์ - ลดพลังงานในกระบวนการออกแบบพัฒนาและการผลิต
2. สามารถกำหนดความแม่นยำในการใช้โปรแกรม CAE ในการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ	2 และ 3	- สามารถประมาณผลของการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำที่ต้องการผลิตได้ล่วงหน้า - ลดเวลาและการสูญเสียวัตถุดิบในการทดสอบจริง - ลดการแก้ไขแม่พิมพ์
3. สามารถวิเคราะห์ดูความเค้นที่กดบนใบหน้า จากแบบรูปทรงของแว่นตาว่ายน้ำที่ออกแบบได้	3	- ออกแบบรูปทรงของแว่นตาว่ายน้ำให้เหมาะสมกับใบหน้าผู้สวมใส่

การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ลำดับและวิธีการในแต่ละขั้นตอนของการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยกรรมวิธีทางวิศวกรรม ได้สรุปเป็นแนวทางดำเนินการซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับซอฟต์แวร์ CAD และ CAE ทั่วไปได้ โดยคุณสมบัติของซอฟต์แวร์ CAD และ CAE ที่ใช้ ใช้ความสามารถขั้นต่ำที่มีในซอฟต์แวร์ CAE ทั่วไป ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ชิ้นส่วนอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์ทั่วไปได้ ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีใดและวัสดุชนิดใดก็ตาม รายละเอียดในงานวิจัยนี้บุคคลทั่วไปและนิสิตนักศึกษาสามารถนำไปใช้ประกอบเป็นกรณีศึกษา และดำเนินการในการพัฒนาและการทดสอบผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

การประชาสัมพันธ์

1. จัดบรรยายเรื่องการใช้ CAD/CAE ในการออกแบบและทดสอบผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้มาตรฐานด้านคุณภาพและความปลอดภัย
2. การนำ CAE มาช่วยในการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ ในการทดสอบคุณภาพและประเมินความสบายในการสวมใส่

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(5)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
1. โครงสร้างของแว่นตาว่ายน้ำ	4
2. กระบวนการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ	5
2.1 การผลิตชิ้นส่วน	5
2.1.1 สายการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก	5
2.1.2 สายการผลิตชิ้นส่วนยาง/ซิลิโคน	6
2.2 การประกอบ (Assembly Line)	7
2.3 การบรรจุหีบห่อ (Packaging Line)	7
3. กรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนโดยการฉีดพลาสติก	9
3.1 ประเภทของเครื่องฉีดพลาสติก	9
3.2 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติกแนวนอน	10
3.3 ชุดฉีด (Injection Unit)	10
3.4 ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)	11
3.5 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก	13
4. วัสดุที่ใช้ในการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ	14
4.1 โพลีคาร์บอเนต	14
4.2 PVC (Polyvinyl Chloride)	15
4.3 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	15
4.4 ซิลิโคน (Silicone)	15
4.5 ยางธรรมชาติ	16
5. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของพลาสติก	16

สารบัญ (ต่อ)

6. มาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ 19
   6.1 การทดสอบการดึง (Tensile Test) 19
   6.2 การทดสอบการอัด (Compressive Test) 19
   6.3 การทดสอบการกระแทก (Impact Test) 20
7. คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบและคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม 20
   7.1 การวิเคราะห์เพื่อช่วยการออกแบบ 20
   7.2 การวิเคราะห์เพื่อช่วยกระบวนการผลิต 21

อุปกรณ์ 22
1. อุปกรณ์และชิ้นงานสำหรับพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ 22
2. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางกลตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ 22
3. ชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ 22
4. อุปกรณ์ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ 23
5. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ CAD/CAE 27

วิธีการ 28
1. วิธีการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบ 28
2. วิธีการทดสอบทางกลของแว่นตาว่ายน้ำ 29
   2.1 วิธีการทดสอบการดึงของชิ้นจมูก 29
   2.2 วิธีการทดสอบการอัดของถ้วยตา 30
   2.3 วิธีการทดสอบการกระแทกของเลนส์ถ้วยตา 31
3. วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ 32
4. วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ CAE 33

ผลการวิจัยและทดลอง 36
1. ผลการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ 36
   1.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ 36
   1.2 ผลการออกแบบฟีเจอร์ 38

สารบัญ (ต่อ)

1.3 ผลออกแบบถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ 50

1.3.1 ผลการประกอบถ้วยตา 50

1.3.2 ตัวอย่างของการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ 52

2. ผลการทดสอบทางกลตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ 54

2.1 ผลการทดสอบทางกลของการดึงชิ้นจมูก 54

2.2 ผลการทดสอบทางกลของการอัดถ้วยตา 55

2.3 ผลการทดสอบทางกลของการกระแทกเลนส์ถ้วยตา 57

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ 57

4. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบการดึงชิ้นจมูก 59

4.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM ของชิ้นจมูก 59

4.2 ผล FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูก 59

4.3 ผล FEA ของความเค้นของชิ้นจมูก 65

5. ผลการวิเคราะห์การทดสอบการอัดถ้วยตาโดยใช้ FEA 66

5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM ของถ้วยตา 66

5.1.1 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง FEM สำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก 67

5.1.2 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง FEM สำหรับการทดสอบการอัดแบบ ข 70

5.1.3 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง FEM สำหรับการทดสอบการอัดแบบ ค 70

5.2 ผลการวิเคราะห์การยุบตัวของถ้วยตาโดยใช้ FEA 71

5.2.1 ผล FEA ของการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ก 71

5.2.2 ผล FEA ของการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ข 75

5.2.3 ผล FEA ของการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ค 76

5.2.4 การเปรียบเทียบผล FEA ของแบบจำลองการทดสอบการอัด 77

สารบัญ (ต่อ)

5.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของถ้วยตาภายใต้แรงอัดโดยใช้ FEA 83

5.3.1 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก 83

5.3.2 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข 85

5.3.3 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค 87

6. ผลการวิเคราะห์การทดสอบการกระแทกเลนส์ถ้วยตาโดยใช้ FEA 89

6.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM สำหรับวิเคราะห์การกระแทก 89

6.2 การวิเคราะห์แรงกระแทก 90

6.3 การวิเคราะห์ความเค้นของการทดสอบการกระแทกโดยใช้ FEA 91

6.4 การวิเคราะห์ความเครียดของการทดสอบการกระแทกโดยใช้ FEA 93

7. ผลการทดสอบความสบายในการสวมใส่โดยใช้ FEA 93

7.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM 93

7.2 ผลการวิเคราะห์ระยะยุบบนใบหน้าโดยใช้ FEA 97

7.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นบนใบหน้าโดยใช้ FEA 97

สรุป 102

เอกสารอ้างอิง 106

ภาคผนวก 107

ภาคผนวก 1 คุณลักษณะเฉพาะของชุดทดสอบการดึงและการอัด 108

ภาคผนวก 2 การสร้างโซลิดโมเดลของชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ 110

ภาคผนวก 3 ภาพวาดรายละเอียดของชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ 115

ภาคผนวก 4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ของการดึงของชิ้นจมูก 121

ภาคผนวก 5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ของการกดของเลนส์ 132

ภาคผนวก 6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ของการกระแทกของเลนส์ 144

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D638	18
2	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำของแต่ละรุ่น	37
3	ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของส่วนฐาน	41
4	ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของกรอบลำตัว	43
5	ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของเลนส์	45
6	ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของชิ้นหู	46
7	ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของชิ้นจมูก	47
8	ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของตัวกึ่งกลาง (Middle)	49
9	ความสัมพันธ์ของกรอบลำตัวกับส่วนประกอบอื่น	51
10	ความสัมพันธ์ของ σ - ε จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของ PVC และ PC	59
11	ค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของการยืดตัวของชิ้นจมูก ในการทดสอบการดึง	64
12	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว (Δ) จากการทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น JR-1006	80
13	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว (Δ) จากการทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น 2006	81
14	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว (Δ) จากการทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น 981	82
15	สรุปฟีเจอร์ต่างๆ ของถ้วยตาจำนวน 31 รุ่น	103

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ	4
2	ขั้นตอนการทำยางแผ่นเพื่อนำไปทำสายยาง	6
3	การขึ้นรูปสายยางด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อน	7
4	แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ	8
5	เครื่องฉีดพลาสติกแบบต่างๆ	9
6	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติกแนวนอน	10
7	ส่วนประกอบของชุดฉีด	11
8	เกลียวหนอนแบบธรรมดา (ก) และ แบบมีช่วงไล่อากาศ (ข)	11
9	วิธีการทำงานของระบบ เปิด-ปิด แม่พิมพ์แบบใช้แรง	12
10	การ เปิด-ปิด แม่พิมพ์โดยใช้ระบบกลไกล็อค	13
11	ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก	14
12	ภาพวาดชิ้นทดสอบแสดงขนาดต่างๆ ของชิ้นทดสอบแบบ 1, 2, 3 และ 5	17
13	ภาพวาดชิ้นทดสอบแสดงขนาดต่างๆ ของแบบที่ 4	18
14	เวอร์เนียชนิดแสดงตัวเลข	22
15	ชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น J-1 (ก) และ รุ่น J-10 (ข)	22
16	ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น JR-1006 (ก), 2006 (ข) และรุ่น 981 (ค)	23
17	เครื่องทดสอบการดึงและการกด (Tensile and Compress Tester)	23
18	อุปกรณ์สำหรับจับยึด (Fixture) ชิ้นจมูก	24
19	เครื่องชั่งน้ำหนัก และ เวอร์เนียวัดขนาด	24
20	แผ่นโลหะทดสอบการอัด	25
21	ฐานรองถ้วยตา (Steel support) สำหรับทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น JR-1006 (ก) รุ่น 2006 (ข) และรุ่น 981 (ค)	25
22	ชุดทดสอบการกระแทก (ก) และ ลูกบอลโลหะ (ข)	26
23	(ก) รูปปั้นศีรษะจำลองสำหรับทดสอบการกระแทก (ข) เบ้ารองศีรษะจำลอง	26
24	เครื่อง Optical 3-D Scanner	27
25	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ก) การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับอุปกรณ์จับยึด และ ข) การติดตั้งอุกรณ์จับยึดบนเครื่องทดสอบ	30
27	การติดตั้งถ้วยตาลงบนฐานรองถ้วยตา	30
28	ชิ้นงานและอุปกรณ์ ในการทดสอบการกด	31
29	การสวมแว่นตาว่ายน้ำเข้ากับศีรษะจำลองเพื่อทดสอบการกระแทก	31
30	การวางเบ้ารองศีรษะจำลองเข้ากับชุดทดสอบการกระแทก	32
31	ขั้นตอนการปฏิบัติงานการวิเคราะห์โดยใช้ CAE	34
32	แผนผังขั้นตอนการใช้ FEA ในโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows	35
33	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ	36
34	การแบ่งแบบของรูปทรงของถ้วยตาได้เป็นสามแบบ	38
35	ลำดับการสร้างโซลิตโมเดลของรูปทรงเฉพาะแบบของถ้วยตา	38
36	แสดงการกำหนดขนาดต่างๆ ของ Arc	39
37	แสดงการสร้างวงรีด้วย Conic	39
38	แสดงการสร้างเส้น Spline	40
39	การสร้าง Surface ด้วยการ Extrude (ภาพ ก) และโดยการให้ Boundary (ภาพ ข)	40
40	การสร้าง Surface ด้วยการ Trim (ภาพ ก) และโดยการ Merge (ภาพ ข)	41
41	ผลการใช้ ฟีเจอร์ มาช่วยในการออกแบบถ้วยตาว่ายน้ำรุ่น 982	50
42	ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 01	52
43	ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 02	53
44	ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 03	53
45	ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 04	53
46	ระยะยืดจากการทดสอบทางกลของการดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-1	54
47	ระยะยืดจากการทดสอบทางกลของการดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-10	55
48	ระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น JR-1006 จากการทดสอบทางกลของการอัด	56
49	ระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 2006 จากการทดสอบทางกลของการอัด	56
50	ระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 981 จากการทดสอบทางกลของการอัด	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	ไดอะแกรมความสัมพันธ์ ระหว่าง σ - ε ของ PVC	58
52	ไดอะแกรมความสัมพันธ์ ระหว่าง σ - ε ของ PC	58
53	ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิดโมเดล (ภาพ ข) ของชิ้นจมูกรุ่น J-1	60
54	ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิดโมเดล (ภาพ ข) ของชิ้นจมูกรุ่น J-10	60
55	ลักษณะการแบ่งชิ้นประกอบของแบบจำลองชิ้นจมูก รุ่น J-1 และ รุ่น J-10	60
56	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-1	61
57	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-10	61
58	ผล FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูก รุ่น J-1 ภายใต้แรงดึง 10 N	62
59	ผล FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูกรุ่น J-10 ภายใต้แรงดึง 10 N	62
60	กราฟเปรียบเทียบระยะยืด (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของชิ้นจมูกรุ่น J-1 ภายใต้แรงดึง 5 N ถึง 60 N	63
61	กราฟเปรียบเทียบระยะยืด (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของชิ้นจมูกรุ่น J-10 ภายใต้แรงดึง 5 N ถึง 60 N	63
62	ความเค้นจากผล FEA ที่บริเวณต่างๆ ภายใต้แรงดึง 10 N ของชิ้นจมูกรุ่น J-1	65
63	ความเค้นจากผล FEA ที่บริเวณต่างๆ ภายใต้แรงดึง 10 N ของชิ้นจมูกรุ่น J-10	65
64	กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการดึงของชิ้นจมูกภายใต้แรงดึง 5 N ถึง 60 N	66
65	ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิดโมเดล (ภาพ ข) ของเลนส์รุ่น JR-1006	67
66	ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิดโมเดล (ภาพ ข) ของเลนส์รุ่น 2006	67
67	ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิดโมเดล (ภาพ ข) ของเลนส์รุ่น 981	67
68	แบบจำลอง FEM ของถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981	68
69	แบบจำลอง FEM แบบไม่มีเลนส์ของถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981	68
70	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก ของถ้วยตารุ่น JR-1006	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก ของถ้วยตารุ่น 2006	69
72	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก ของถ้วยตารุ่น 981	69
73	เงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ข	70
74	เงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ค	71
75	ผล FEA แบบ ก ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น JR-1006 ที่แรงอัด 600 N	72
76	ผล FEA แบบ ก ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 2006 ที่แรงอัด 600 N	72
77	ผล FEA แบบ ก ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 981 ที่แรงอัด 600 N	73
78	กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006	73
79	กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 2006	74
80	กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 981	74
81	ผล FEA แบบ ข ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น JR-1006 ที่แรงอัด 600 N	75
82	ผล FEA แบบ ข ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 2006 ที่แรงอัด 600 N	75
83	ผล FEA แบบ ข ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 981 ที่แรงอัด 600 N	76
84	ผล FEA แบบ ค ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น JR-1006 ที่แรงอัด 600 N	76
85	ผล FEA แบบ ค ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 2006 ที่แรงอัด 600 N	77
86	ผล FEA แบบ ค ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 981 ที่แรงอัด 600 N	77
87	กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
88	กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 2006	79
89	กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 981	79
90	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006	83
91	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 2006	83
92	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 981	84
93	กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น	84
94	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006	85
95	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 2006	85
96	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 981	86
97	กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น	86
98	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006	87
99	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 2006	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
100	ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 981	88
101	กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น	88
102	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ทิศทางและตำแหน่งของแรงกระแทกของเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 (ก) 2006 (ข) และ 981 (ค)	89
103	กราฟของอิมพัลส์ ที่เกิดจากลูกบอลโลหะตกกระแทกผิวหน้าเลนส์ถ้วยตาจากที่สูง 1.3 เมตร	90
104	ความเค้นจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 (ความสูง 1.3 เมตร)	91
105	ความเค้นจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 2006 (ความสูง 1.3 เมตร)	92
106	ความเค้นจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 981 (ความสูง 1.3 เมตร)	92
107	กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการกระแทกในช่วงความสูง 0.7 ม. ถึง 1.6 ม. ของเลนส์ถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981	93
108	ความเครียดจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 (ความสูง 1.3 เมตร)	94
109	ความเครียดจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 2006 (ความสูง 1.3 เมตร)	94
110	ความเครียดจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 981 (ความสูง 1.3 เมตร)	95
111	กราฟของความเครียดสูงสุดจากผล FEA ของการกระแทกในช่วงความสูง 0.7 ม. ถึง 1.6 ม. ของเลนส์ถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981	95
112	แบบจำลอง CAD และ FEM ของใบหน้า	96
113	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางของแรงสำหรับวิเคราะห์ความสบายในการสวมใส่	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
114	ผล FEA ของระยะที่ผิวหนังบนใบหน้ายุบเมื่อมีแรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 2006	98
115	ผล FEA ของระยะที่ผิวหนังบนใบหน้ายุบเมื่อมีแรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 1006	98
116	กราฟของระยะยุบ 4 บริเวณบนผิวหนังจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 2006	99
117	กราฟของระยะยุบ 4 บริเวณบนผิวหนังจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 1006	99
118	ความเค้นบนใบหน้าจากผล FEA ที่แรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 2006	100
119	ความเค้นบนใบหน้าจากผล FEA ที่แรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 1006	100
120	กราฟของความเค้น 4 บริเวณบนใบหน้าจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 2006	101
121	กราฟของความเค้น 4 บริเวณบนใบหน้าจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 1006	101

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่		หน้า
1	คุณลักษณะของชุดทดสอบการดึงและการอัด	109
2	ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของชิ้นจมูกรุ่น J-1	116
3	ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของชิ้นจมูกรุ่น J-10	117
4	ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตารุ่น JR-1006	118
5	ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตารุ่น 2006	119
6	ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตารุ่น 981	120

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ABS	=	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASTM	=	American Standard
BSI	=	British Standard Institute
CAD	=	Computer-Aided Design
CAM	=	Computer-Aided Manufacturing
CAE	=	Computer-Aided Engineering
e	=	Error
e_{AVG}	=	Average Error
e_P	=	Percent Error
$\|e\|_{AVG}$	=	Average of Absolute Error
E	=	Young's Modulus, Modulus of Elasticity
F	=	Force หรือ Load
FEA	=	Finite Element Analysis
FEM	=	Finite Element Model
h	=	Drop height
ISO	=	International Standards Organization
mm	=	Millimeter
N	=	Newton
PC	=	Polycabonate
PVC	=	Polyvinyl chloride
Δ	=	Displacement หรือ Deflection
σ	=	Stress
ε	=	Strain
Δ_{EXP}	=	Displacement from Experiment
Δ_{FEA}	=	Displacement from Finite Element Analysis

คำนำ

อุตสาหกรรมการผลิตแว่นตาว่ายน้ำในตลาดการค้าโลก มีแห่งผลิตที่สำคัญแหล่งหนึ่ง คือ ประเทศไทย โดยมีบริษัท Optech Co., Ltd. เป็นบริษัทหนึ่งที่ได้ดำเนินธุรกิจการผลิตแว่นตาว่ายน้ำให้แก่ผู้จำหน่ายที่มีชื่อเสียงภายใต้เครื่องหมายการค้าต่าง ๆ เช่น Speedo, TYR และ Arena เป็นต้น โดยบริษัท Optech Co., Ltd. เป็นผู้ออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ แล้วสั่งผลิตแม่พิมพ์จากภายนอกโรงงาน ภายในโรงงานทำการผลิตชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำต่าง ๆ รวมถึงบรรจุภัณฑ์ และดำเนินการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำและบรรจุหีบห่อส่งให้แก่ลูกค้า

ผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว มีรูปทรงแปรเปลี่ยนตามยุคสมัย นอกเหนือจากจุดประสงค์เพื่อการมองเห็นอย่างชัดเจนใต้และเหนือผิวน้ำขณะว่ายน้ำและป้องกันนัยน์ตาจากสารเคมีและสิ่งสกปรกในน้ำ แว่นตาว่ายน้ำยังใช้เสมือนเป็นเครื่องประดับใบหน้าของนักว่ายน้ำ รูปทรงจึงเป็นแฟชั่นที่ทันสมัยและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งปี รูปแบบของแว่นตาว่ายน้ำส่วนหนึ่งมาจากการนำเสนอจากผู้ผลิต แล้วผู้ขายนำไปจัดจำหน่ายทั่วโลกภายใต้เครื่องหมายการค้าของตน

ณ ปัจจุบัน บริษัท Optech Co., Ltd. ดำเนินการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยใช้วิธีการออกแบบ บนแผ่นกระดาษขึ้นมาก่อน แล้วจึงนำแบบที่ได้ เสนอต่อลูกค้า ซึ่งทำให้เสียเวลามากและเกิดการสูญเสียเวลาอย่างมากเมื่อต้องดำเนินการแก้ไขแบบเพื่อการนำเสนอใหม่ให้ได้ตรงตามความพอใจของลูกค้า นอกจากนี้แบบภาพวาดรายละเอียดเพื่อการผลิต จะต้องสร้างขึ้นใหม่เพื่อเป็นข้อมูลในการผลิตแม่พิมพ์ ทำให้เกิดความ คลาดเคลื่อน และเป็นผลให้ช่วงระยะเวลา การพัฒนาผลิตภัณฑ์ นานกว่าคู่แข่ง และมีจำนวนการนำเสนอรูปทรงใหม่ๆ ต่อปีต่ำ โดยปัจจุบันบริษัท สามารถผลิตได้เฉลี่ย 10 แบบต่อปี

ปัญหาอื่นๆ ที่ประสบ คือ การพัฒนาแว่นตาว่ายน้ำจากรูปทรงเดิมที่เป็นรูปทรงมาตรฐานที่ไม่เป็นรูปทรงตามแฟชั่น ซึ่งรูปแบบนี้เป็นผลิตภัณฑ์มีตลาดรองรับอย่างสม่ำเสมอทุกปี มีปัญหาด้านข้อมูลที่ใช้เป็นแบบกระดาษภาพวาด ทำให้ต้องเริ่มต้นวาดแบบใหม่ รวมถึงปัญหาการสูญเสียเวลาเนื่องจากการเปลี่ยนขนาด เช่น จากแบบสำหรับผู้ใหญ่ ให้เป็นขนาดเล็กสำหรับเด็ก จนถึงปัจจุบัน บริษัท Optech Co., Ltd. มีจำนวนแว่นตาว่ายน้ำที่ได้ผลิตมาแล้วรวมกันมากกว่า 200 แบบ แบบเหล่านี้ในอนาคตสามารถนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ได้ หรือใช้อ้างอิงเพื่อการผลิตทูลหรือแม่พิมพ์เพื่อทดแทนของเก่าที่เสื่อมอายุ ปัญหาเนื่องจากการออกแบบและการเก็บข้อมูลของแบบที่ใช้วิธีการเดิมนี้ ยังส่งผลต่อเนื่องต่อกระบวนการผลิต คือ คุณภาพและการ

สูญเสียวัตถุดิบโดยเฉพาะในช่วงการทดสอบสายการผลิตและเกิดการสูญเสียพลังงานจากข้อบกพร่องดังกล่าว

จากเหตุผลดังกล่าว แนวทางการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย (Computer-Aided Technology) อันได้แก่ คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (Computer-Aided Design หรือ CAD) และ คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering หรือ CAE) จะสามารถช่วยเสริมให้บริษัท Optech Co., Ltd. เพิ่มศักยภาพด้านการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำให้สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ รวมถึงเป็นทางนำไปสู่การมีเครื่องหมายการค้าที่เป็นของประเทศไทยได้ โดยคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบจะนำมาประยุกต์เพื่อการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำจากรูปทรงเฉพาะแบบ (feature) ต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำที่จะดำเนินการวิจัยโดยการรวบรวมเป็น Library เพื่อให้การออกแบบสามารถดำเนินการได้โดยง่ายด้วยการแก้ไขขนาดต่าง ๆ และอาจมีดัดแปลงบ้างเพียงเล็กน้อย ส่วนคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม จะนำมาใช้เพื่อการจำลองการทดสอบให้ได้ตรงตามมาตรฐานสากลของผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำ (เช่น BS5883:1996) รวมถึงการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบให้สวมใส่ที่แนบสนิทกับใบหน้าและให้ความสบายต่อใบหน้าและศีรษะ

การตรวจเอกสาร

การว่ายน้ำเป็นกิจกรรมการออกกำลังกายที่นิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก และเป็นหลักสูตรการศึกษาและกิจกรรมเสริมในสถานศึกษา ตั้งแต่ระดับอนุบาลถึงระดับอุดมศึกษา กีฬาทางน้ำนอกจากกีฬาว่ายน้ำแล้ว ได้แก่กีฬากระโดดน้ำ และโปโลน้ำ โดยกีฬาเหล่านี้มีอุปกรณ์ ที่ใช้ที่สำคัญคือ แว่นตาว่ายน้ำ การใช้แว่นตาว่ายน้ำมีจุดประสงค์เพื่อ การมองเห็นอย่างชัดเจนทั้งใต้และเหนือผิวน้ำ การป้องกันนัยน์ตาจากสิ่งสกปรกและสารเคมีในน้ำ และปกป้องลูกตาจากวัตถุของแข็งเข้าตา แว่นตาว่ายน้ำที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ เป็นแว่นตาว่ายน้ำที่ใช้ที่ระดับผิวน้ำ (Surface Swimming Goggle) ซึ่งไม่จัดเป็นประเภทเดียวกันกับแว่นตาสำหรับการดำน้ำ ฯลฯ

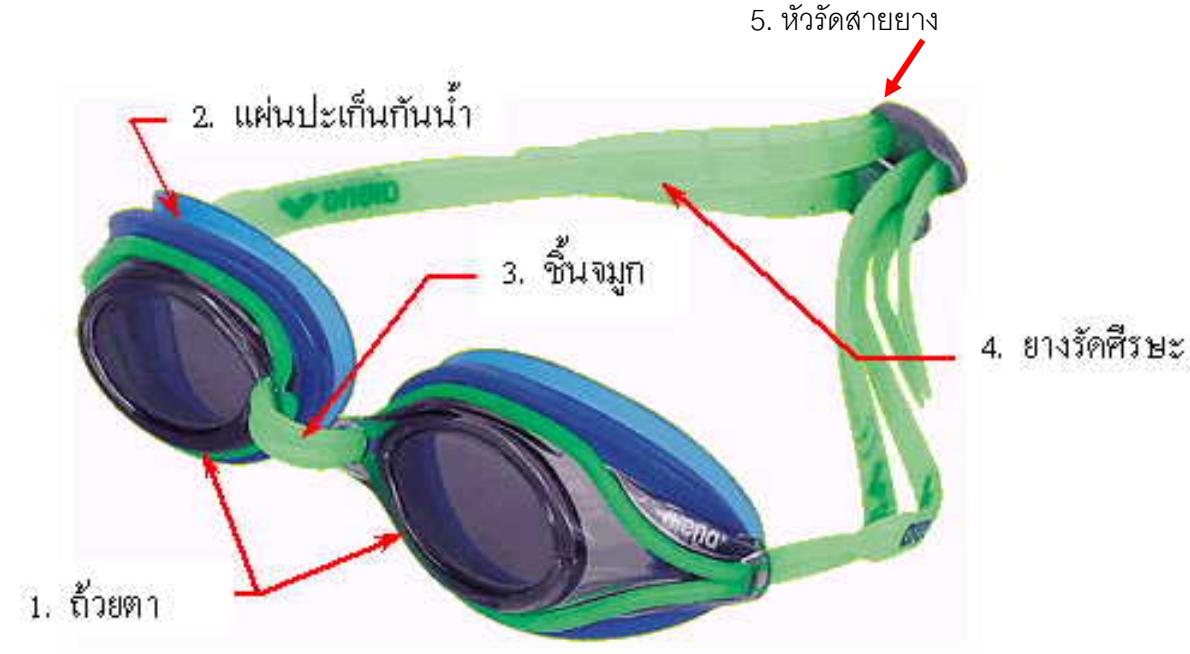
คุณสมบัติที่สำคัญของแว่นตาว่ายน้ำที่ดี ได้แก่

1. น้ำไม่รั่วซึมเข้าภายในแว่นตา
2. มีความใสปราศจากรอยตำหนิต่าง ๆ เช่น ฟองอากาศ และรอยตำหนิที่เกิดจากการผลิตโดยกรรมวิธีการฉีดพลาสติก
3. โปร่งใส ภาพไม่บิดเบี้ยว อาจมีสีเข้มได้เพื่อกันแสงแดดเมื่อใช้กลางแจ้ง
4. ให้มุมมองของสายตาที่กว้าง
5. ไม่มีโลหะและแก้วเป็นชิ้นส่วนของแว่นตา
6. แผ่นหน้าหรือเลนส์มีความคงทน โดยวัสดุที่เป็นเลนส์ต้องไม่เกิดการแตกกระจายเมื่อหักหรือเกิดการกระแทก
7. ไม่เกิดหมอกไอน้ำหรือฝ้า จับผิวภายในแว่นตา
8. สามารถป้องกันแสง UV ได้
9. มีน้ำหนักเบา
10. ไม่มีขอบหรือมุมที่คม ที่จะทำให้เกิดบาดแผลบนใบหน้า
11. ไม่หลุดหรือลื่นไถล ออกจากตาหรือใบหน้า
12. สวมใส่สบายไม่รัดศีรษะและใบหน้ามากจนเจ็บหรือปวด
13. สามารถทำการสวมใส่ได้สดวกและง่าย
14. ทนทานต่อการเกิดรอยขีดข่วนโดยเฉพาะบริเวณแผ่นเลนส์

1. **<u>โครงสร้างของแว่นตาว่ายน้ำ</u>**

แว่นตาว่ายน้ำพลาสติกประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ที่สำคัญ คือ

1. ถ้วยตา (Eye Cup) ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ลำตัวหรือกรอบหรือตัวกระบอก (Body หรือ Frame หรือ Cup) และแผ่นหน้าหรือเลนส์ (Lens) ตัวถ้วยตา อาจแยกเป็นสองชิ้นส่วน คือ ตัวกรอบและแผ่นเลนส์หรือฉีดพลาสติกรวมกันเป็นชิ้นเดียว วัสดุที่นิยมใช้เป็นพลาสติก Polycarbonate (PC)
2. แผ่นปะเก็นกันน้ำ (Water Seal หรือ Lipseal หรือ Gaskets หรือ Cushion) วัสดุที่นิยมใช้เป็นวัสดุที่มีความอ่อนนุ่ม ได้แก่ silicone, TPE และ polyvinyl เป็นต้น
3. ชิ้นจมูก (Joint หรือ Nose Pieces หรือ Bridge Strap) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างถ้วยตาทั้งสองข้าง แว่นตาบางรุ่นจะไม่มีชิ้นจมูก เนื่องจากถ้วยตาทั้งสองข้างเชื่อมต่อเป็นชิ้นเดียวกัน
4. สายยางรัดศีรษะ (Head Strap หรือ Belt)
5. หัวรัดสายยาง (Buckle) ใช้สำหรับรัดสายยางรัดศีรษะและปรับความยาวของสายยางรัดศีรษะ



<u>ภาพที่ 1</u> ชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ

2. **<u>กระบวนการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ</u>**

การผลิตแว่นตาว่ายน้ำแยกออกเป็นสองสายการผลิต คือ สายการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก และสายการผลิตชิ้นส่วนยาง/ซิลิโคน ทั้งสองสายการผลิต สามารถแยกเป็น 4 กระบวนการหลักคือ

1. การผลิตชิ้นส่วน
2. การพิมพ์เครื่องหมายและลวดลาย
3. การประกอบ
4. การบรรจุ

2.1 การผลิตชิ้นส่วน

2.1.1 สายการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก

การผลิตชิ้นส่วนที่เป็นพลาสติกใช้กระบวนการฉีด ซึ่งมีชิ้นส่วนที่ทำการผลิต คือ ถ้วยตา หัวรัดสายยาง ชิ้นจมูก แผ่นปะเก็นกันน้ำ ชิ้นส่วนที่เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เหล่านี้มีกระบวนการผลิตตามแสดงในภาพที่ 2 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Plastic Compound เป็นกระบวนการเตรียมเม็ดพลาสติก คือ การนำเอาเม็ดพลาสติกไปทำการอบความร้อนเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิที่เหมาะสมตามคุณสมบัติของพลาสติกนั้น
2. Mixing เป็นขั้นตอนการผสมสีเพื่อให้เป็นสีตามต้องการ
3. Injection เป็นกระบวนการฉีดพลาสติกขึ้นเป็นรูปทรง โดยเริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกที่ผสมสีแล้วใส่ในกรวยเติมพลาสติก (hopper) ของเครื่องฉีดพลาสติก เครื่องฉีดที่ใช้มีขนาด 50 ถึง 100 ตัน ตามขนาดเล็กใหญ่ของแม่พิมพ์ ชิ้นงานพลาสติกที่ได้ออกมาจากแม่พิมพ์ มีส่วนที่ไม่ใช่ชิ้นส่วนของชิ้นงานที่ต้องการ เช่น Sprue และ Runner ชิ้นส่วนเหล่านี้สามารถ recycle มาใช้ใหม่ได้ ตามสัดส่วนที่เหมาะสมของเม็ดพลาสติกใหม่และพลาสติก recycle
4. ถ้วยตาหรือเลนส์ จะผ่านการเคลือบสารกันฝ้า (Anti-Fog) โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้
   ก. ทำความสะอาดตัวเลนส์โดยการพ่นลมแรง เพื่อให้ฝุ่นที่เกาะอยู่หลุดออกจากตัวเลนส์ และทำให้ตัวเลนส์มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า ขั้นตอนนี้ทำให้ฝุ่นไม่กลับมาเกาะบนเลนส์อีก
   ข. ทำการหยดสาร Polyurethan Aqucous Dispersion (OK300) เพื่อเคลือบผิวภายในเลนส์ สารที่ใช้นี้เป็นสารเคลือบกันฝ้าไอน้ำ
   ค. ทำการดูดสารเคลือบกันฝ้า (Polyurethan Aqucous Dispersion) ที่เกินและตกค้างออกจากเลนส์

ง. นำเลนส์เข้าเครื่องอบความร้อน เพื่อให้สารแห้ง แล้วนำเข้าเครื่องดูดความชื้น

2. ชิ้นส่วนพลาสติกที่ได้ จะนำไปทำการพิมพ์เครื่องหมายการค้า หรือตบแต่งลวดลาย โดยถ้วยตาพิมพ์โดยวิธี Pad Printing และ ชิ้นจมูก (Joint) พิมพ์โดยวิธี Hot - Stamping.

2.1.2 <u>สายการผลิตชิ้นส่วนยาง/ซิลิโคน</u>

ชิ้นส่วนที่เป็นยางทำการผลิตโดยใช้วิธีการกดอัดด้วยความร้อน ชิ้นส่วนที่ผลิต ได้แก่ แผ่นปะเก็นกันน้ำ และ สายยางรัดศีรษะ กระบวนการผลิตมีลำดับตามแสดงในภาพที่ 4 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Mixing หรือ การตียาง เป็นกระบวนการผสมยางกับสารเคมีพิเศษ เพื่อทำให้ยางอ่อนตัว แล้วนำไปรีด เพื่อให้ได้ยางเป็นแผ่นออกมา (ภาพที่ 2)
2. Compress เป็นกระบวนอัดและอบความร้อนให้ยางสุข เป็นการทำให้ยางแข็งตัวและคงรูปทรงตามแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดนี้ (ภาพที่ 3)
3. Trimming เป็นการลอกยางหรือตัดแต่งตามขอบของชิ้นงาน ให้ได้ขนาดตามต้องการ
4. สำหรับสายยางรัดศีรษะ (Belt) จะนำไปทำการพิมพ์เครื่องหมายการค้าหรือตบแต่งลวดลาย ด้วยวิธีการพิมพ์แบบ Silk Screen Printing.

ก)

ข)

ค)

<u>ภาพที่ 2</u> ขั้นตอนการทำยางแผ่นเพื่อนำไปทำสายยาง ก) ยางดิบ ข) เครื่องรีดยางดิบ และ ค) ยางดิบที่ผ่านการรีดแล้ว

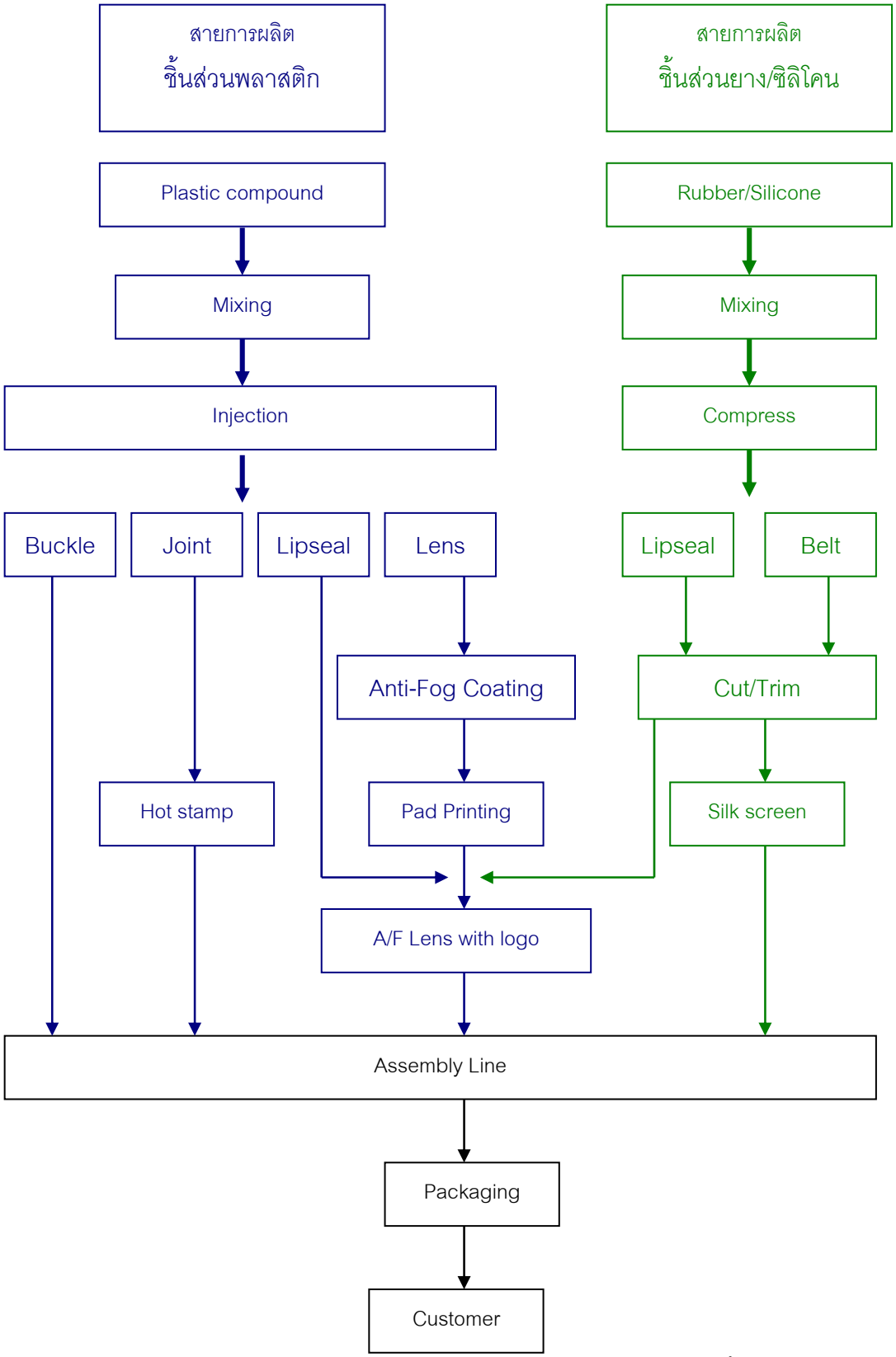
ภาพที่ 3 การขึ้นรูปสายยางด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อน

2.2 การประกอบ (Assembly Line)

เมื่อได้ชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำครบทุกชิ้นแล้ว จึงนำชิ้นส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันโดยเริ่มจากนำ ถ้วยตา มาทำการติดกับ แผ่นประเก็นกันน้ำ ทั้งด้านซ้ายและขวา แล้วนำไปติดกับยาง Neoprene เพื่อกันการกดทับบริเวณขอบตา โดยใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นส่วนของยาง Neoprene แล้วทากาวทับลงไป แล้วจึงกดตัว Lens เพื่อให้ชิ้นส่วนทั้งสองยึดติดกัน หลังจากนั้นนำ Lens ทั้งสองข้างมาประกอบติดกันด้วย ชิ้นจมูก แล้วใส่สายรัดและหัวรัดสายยาง ตามลำดับ

2.3 การบรรจุหีบห่อ (Packaging Line)

การบรรจุหีบห่อแว่นตาว่ายน้ำ เป็นสายการผลิตต่อเนื่องจากสายการประกอบ โดยนำแว่นตาว่ายน้ำมาประกอบติดกับแกนกระดาษแข็ง โดยใช้สายยางรัดศีรษะมาพันกับแกนกระดาษเพื่อกันการเคลื่อนตัวในขณะการขนส่ง บรรจุเอกสารแนะนำวิธีการใช้และข้อมูลของแว่นตาว่ายน้ำ ใส่กล่อง ติดรูปลอก (Sticker) ของบริษัทที่สั่งผลิต ผลิตภัณฑ์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้วนำไปบรรจุลงลังเพื่อการจัดส่งให้แก่ผู้สั่งผลิตต่อไป



ภาพที่ 4 แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ

3. กรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนโดยการฉีดพลาสติก

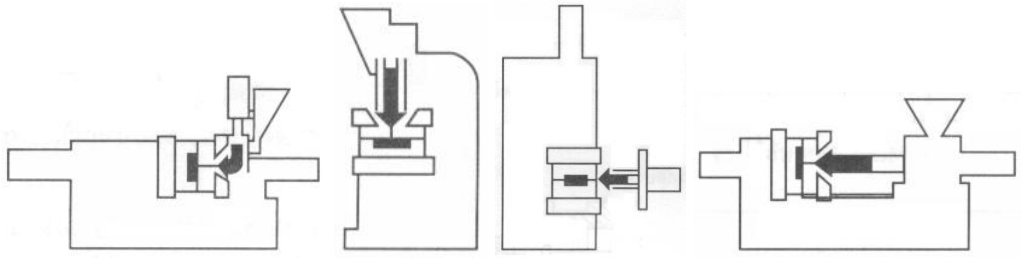
การฉีดพลาสติกเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนและต้องการผลิตจำนวนมาก ระบบการผลิตเป็นแบบอัตโนมัติจึงทำงานได้รวดเร็วและให้อัตราการผลิตที่สูง การผลิตชิ้นส่วนโดยการฉีดพลาสติกจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบันอย่างมาก

เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) สามารถทำงานได้กับพลาสติกที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นผง นิยมใช้กับพลาสติกประเภท เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ทั้งเครื่องจักรและแม่พิมพ์ต่างมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก

3.1 ประเภทของเครื่องฉีดพลาสติก

เครื่องฉีดพลาสติกสามารถแบ่งตามลักษณะของทิศทางการฉีดได้ 4 แบบ [1, 2] คือ

1. แบบแนวตั้งพลาสติกไหลเข้าแนวนอน (ภาพที่ 5ก) พลาสติกเหลวฉีดออกจากกระบอกฉีด (Barrel) ในแนวดิ่งแล้วเปลี่ยนทิศทางการไหล 90° เข้าแม่พิมพ์ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง
2. แบบฉีดแนวดิ่ง (ภาพที่ 5ข) พลาสติกเหลวฉีดลงในแนวดิ่งตั้งฉากกับแม่พิมพ์ ที่ติดตั้งในแนวนอน
3. แบบฉีดตั้ง (ภาพที่ 5ค) พลาสติกเหลวฉีดในแนวนอนเข้าด้านข้างของแม่พิมพ์ที่ติดตั้งในแนวนอน
4. แบบแนวนอน (ภาพที่ 5ง) พลาสติกเหลวฉีดในแนวนอนเข้าเป็นเส้นตรงตั้งฉากกับระนาบของแม่พิมพ์ ที่ติดตั้งในแนวตั้ง เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอนนี้ เป็นเครื่องฉีดพลาสติกที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน



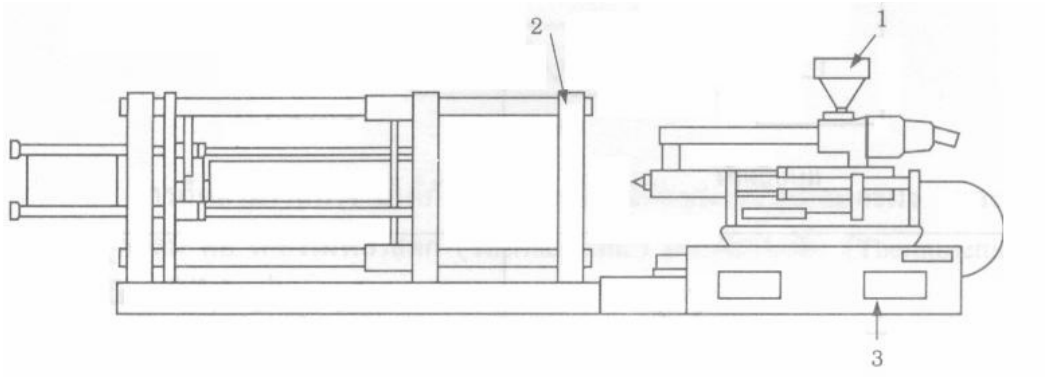
(ก) (ข) (ค) (ง)

ภาพที่ 5 เครื่องฉีดพลาสติกแบบต่างๆ

3.2 <u>ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติกแนวนอน</u>

เครื่องฉีดพลาสติกแบบแนวนอน มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน ตามแสดงในภาพที่ 6 ดังต่อไปนี้

1. ชุดฉีด หรือ Injection Unit
2. ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ หรือ Clamping Unit
3. ฐานเครื่อง หรือ Base

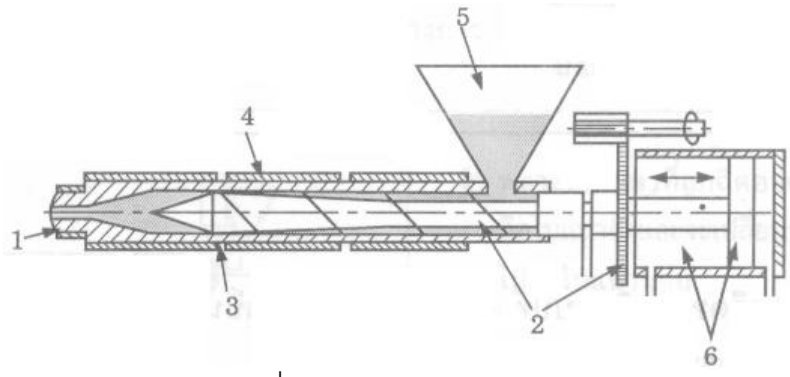


<u>ภาพที่ 6</u> ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติกแนวนอน

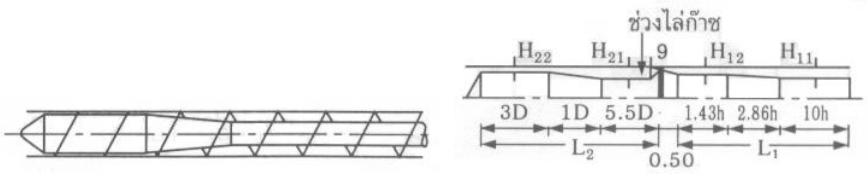
3.3 <u>ชุดฉีด (Injection Unit)</u>

ชุดฉีดพลาสติก จะอยู่ทางด้านขวาของเครื่อง มีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 7 ดังต่อไปนี้

1. หัวฉีด (Nozzle) เป็นปลายหัวมนเพื่อเชื่อมต่อให้พลาสติกไหลเข้าแม่พิมพ์
2. เกลียวหนอน (Screw) และชุดขับเคลื่อน ทำหน้าที่ในการหมุนเกลียวเพื่อลำเลียงพลาสติกไปยังปลายเกลียว ในจังหวะฉีดจะทำหน้าที่เป็นลูกสูบอัดพลาสติกไปในแนวแกน เกลียวหนอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 8
   ก. แบบธรรมดา เม็ดพลาสติกในช่วงบริเวณเข้าจะถูกหลอมเหลวและส่งเข้าช่วงบริเวณอัดต่อไปยังปลายเกลียวหนอนเพื่อฉีดออก เกลียวหนอนส่วนใหญ่จะกลายเป็นเกลียวซ้าย มีความยาว 18D (18 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) ถึง 22D อัตราส่วน ความลึกของร่องเกลียว 2 : 1 ถึง 2.5 : 1
   ข. แบบมีช่วงไล่อากาศ ตามมาตรฐานใช้เกลียวหนอนยาว ที่มีความยาวมากกว่า 20D



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของชุดฉีด



(ก) แบบธรรมดา (ข) แบบมีช่วงไล่อากาศ

ภาพที่ 8 เกลียวหนอนแบบธรรมดา (ก) และ แบบมีช่วงไล่อากาศ (ข)

3. กระบอกฉีด (Barrel) ทำหน้าที่ในการประคองเกลียวหนอนและบรรจุและลำเลียงพลาสติกเหลวเพื่อฉีดออกไปยังหัวฉีด
4. แผ่นให้ความร้อน (Heater) เป็นอุปกรณ์ ให้ความร้อนล้อมรอบนอกกระบอกฉีด เพื่อควบคุมความร้อนของพลาสติกในกระบอกฉีด
5. กรวย (Hopper) สำหรับใช้เติมเม็ดพลาสติกเพื่อป้อนพลาสติกเข้าสู่กระบอกฉีด
6. ชุดไฮดรอลิกส์ ประกอบด้วยกระบอกสูบและลูกสูบไฮดรอลิกส์ มีหน้าที่ส่งกำลังขับเคลื่อนในแนวนอนให้แก่ชุดขับเคลื่อนของเกลียวหนอน

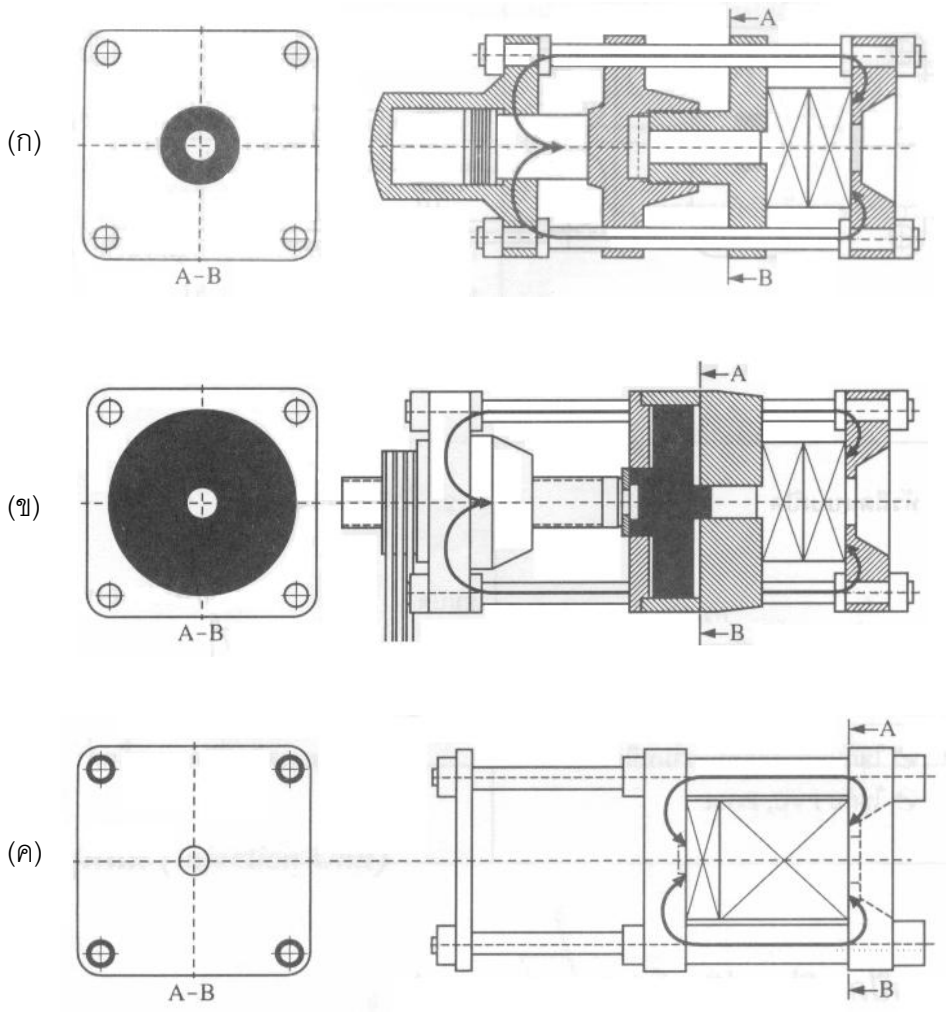
3.4 **ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์** (Clamping Unit)

ชุดเปิด-ปิด แม่พิมพ์ ทำหน้าที่ ควบคุมจังหวะการเปิดและปิดแม่พิมพ์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปิด-ปิด มี 2 ประเภท คือ ไฮดรอลิกส์และมอเตอร์ไฟฟ้า ชุดเปิด-ปิด แม่พิมพ์ มีโครงสร้าง 2 แบบ คือ

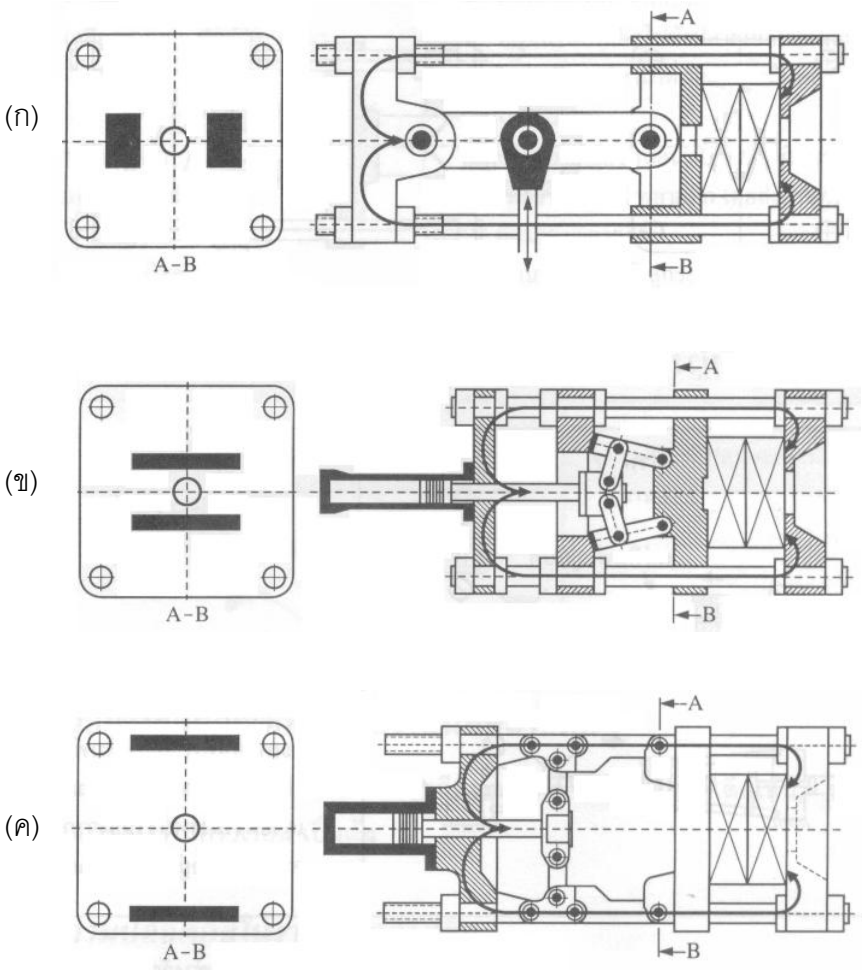
1. แบบใช้แรง (Actuated by Force) โดยใช้แรงจากลูกสูบไฮดรอลิกส์หรือจากมอเตอร์ในการ เปิด-ปิด และล็อค ให้แม่พิมพ์กดกันแน่น โดยแรงกดอัดต้องมากกว่าแรงดัน

ของพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์ขณะฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ วิธีการทำงานมี 3 วิธี ตามแสดงในภาพที่ 9

2. ระบบกลไกล็อค (Interlocking) ใช้การเคลื่อนที่ของลูกสูบไฮดรอลิกส์ หรือมอเตอร์ ในการขับเคลื่อนกลไกข้อต่อ (Linkages) ให้อยู่ในตำแหน่งปิดล็อคแม่พิมพ์ แล้วหยุดการทำงาน แรงที่เกิดขึ้นในขณะฉีดพลาสติกจะสมดุลผ่านข้อต่อที่ล็อคตายตัว ตัวอย่างระบบกลไกล็อค ได้แสดงในภาพที่ 10 โดยระบบไฮดรอลิกส์ในภาพสามารถใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนแทนได้



<u>ภาพที่ 9</u> วิธีการทำงานของระบบ เปิด-ปิด แม่พิมพ์แบบใช้แรง โดย (ก) ใช้ไฮดรอลิกส์ส่งกำลังอัดปิดแม่พิมพ์ (ข) ใช้มอเตอร์ขับเข้าออกและใช้ไฮดรอลิกส์ปิดแม่พิมพ์ และ (ค) ใช้ไฮดรอลิกส์ดันเข้าและใช้ไฮดรอลิกส์ปิดแม่พิมพ์



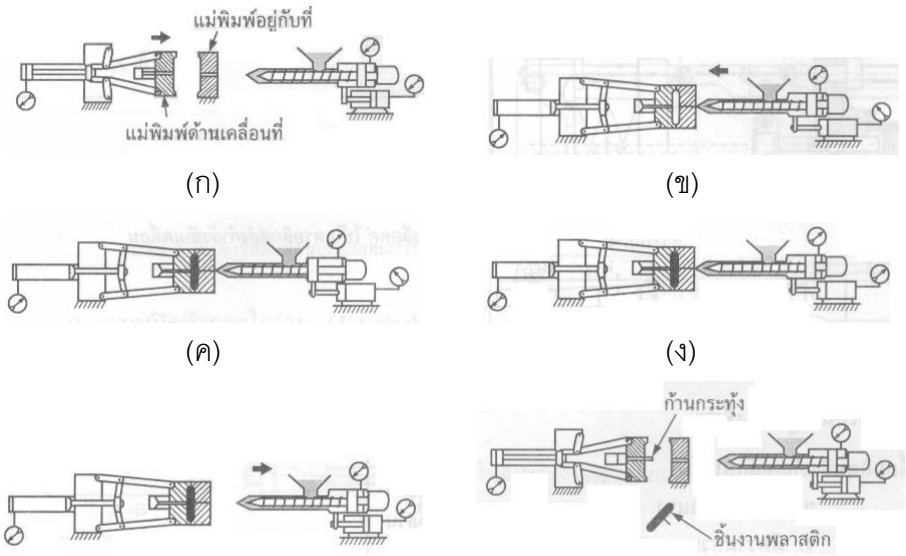
ภาพที่ 10 การ เปิด-ปิด แม่พิมพ์โดยใช้ระบบกลไกล็อค โดยแบบ (ก) ระบบคานล็อคอย่างง่าย ใช้ไฮดรอลิกส์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนกลไก แบบ (ข) ระบบกระเดื่องล็อค ใช้ไฮดรอลิกส์ขับเคลื่อนกลไก และแบบ (ค) ระบบกระเดื่องล็อคคู่ ใช้ไฮดรอลิกส์ขับเคลื่อนกลไก

3.5 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

ลำดับการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกมีทั้งหมด 6 ขั้นตอน ตามลำดับต่อไปนี้

1. แม่พิมพ์เลื่อนเข้าในตำแหน่งปิด (ภาพที่ 11 ก)
2. หลังจากปิดล็อคแม่พิมพ์แน่นแล้ว หัวฉีดจะเคลื่อนที่ไปชนแม่พิมพ์ โดยมีพลาสติกหลอมพร้อมที่จะฉีดอยู่ในกระบอกฉีด (ภาพที่ 11 ข)
3. ทำการฉีดและอัดแรงดันฉีด เกลียวหนอนทำหน้าที่เป็นลูกสูบดันพลาสติกเหลวให้ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ แล้วอัดแรงดันค้างไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้เนื้อพลาสติกในแม่พิมพ์มีความหนาแน่นเพียงพอ (ภาพที่ 11 ค)

4. ที่ชุดฉีด ทำการหลอมเหลวและลำเลียงพลาสติกไปหน้าปลายเกลียวหนอนโดยการหมุนของเกลียวหนอน (ภาพที่ 11 ง)
5. หัวฉีดหรือชุดฉีดถอยออก แต่แม่พิมพ์ยังปิดอยู่ (ภาพที่ 11 จ)
6. แม่พิมพ์เปิดแล้วทำการกระทุ้งเพื่อปลดชิ้นงานออก (ภาพที่ 11 ฉ)



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

4. วัสดุที่ใช้ในการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ

วัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแว่นตาว่ายน้ำ เป็นโพลีเมอร์หลายชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตามลักษณะหน้าที่และการใช้งานของชิ้นส่วนนั้น ๆ วัสดุสำคัญที่ใช้ในการผลิตแว่นตาว่ายน้ำมีดังต่อไปนี้

4.1 โพลีคาร์บอเนต

โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) หรือ PC ใช้ผลิตถ้วยแก้วหรือเลนส์ของแว่นตาว่ายน้ำ ลักษณะก่อนฉีด เป็นเม็ด โปร่งใส ไม่มีสี สามารถย้อมสีได้ นิยมใช้ทำฝาครอบโคมไฟยานยนต์ เลนส์ ขวดนมเด็ก ภาชนะบรรจุน้ำดื่ม หมวกนิรภัย ชิ้นส่วนไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ตู้สวิทช์บอร์ด แผ่นปิดเครื่องมือวัด กล้องถ่ายรูป เครื่องกีฬา และอุปกรณ์เกี่ยวกับความปลอดภัย [3]

PC มีความแข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก และมีความทนทานดีมาก ไม่เสื่อมคุณภาพง่าย ดูดซึมน้ำน้อย ทนความร้อนได้ดี อุณหภูมิสูงที่สามารถใช้งานเป็นระยะเวลานาน ๆ อยู่ในช่วง

110°C ถึง 135°C ที่อุณหภูมิสูงยังคงความแข็งแรง เหนียวและคงขนาด ทนต่อกรดอ่อน แอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่องและไขมัน ติดไฟยาก มีควัน ไฟดับได้เอง มีอุณหภูมิหลอมเหลว 280°C ถึง 320°C ค่าการหดตัวในทุกทิศทาง 0.7% ถึง 0.8% ความหนาแน่น 1.2 g/cm^3 [4]

4.2 PVC (Polyvinyl Chloride)

PVC แยกตามเป็น 2 ประเภท คือ แบบแข็ง (PVC-hard หรือ PVC_h) และแบบอ่อน (PVC-soft และ PVC_s) PVC ที่นำมาใช้ผลิต ชิ้นจมูก แผ่นปะเก็นกันน้ำ และสายยางรัดศรษะ ของชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำเป็น PVC แบบอ่อน

PVC อ่อนที่ใช้ทำชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำเป็นเม็ดสีใสขุ่น ย้อมสีได้ เหมาะสำหรับการฉีดชิ้นงานที่ใส สามารถฉีดชิ้นงานที่มีรูปร่างโค้งหรือพับงอได้ มีความคงทนต่อแรงกระแทกได้สูง และคงสภาพอยู่ได้นานภายใต้ สภาพอากาศและแสง เม็ดโปร่งแสงสามารถย้อมสีทึบได้ทุกสี ติดไฟยาก เมื่อติดไฟ มีควัน ไฟดับได้เอง ทนต่อกรดและด่าง แอลกอฮอล์ เบนซิน น้ำมันเครื่องและไขมัน [2]อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานได้สูงถึง 60 °C ถึง 70°C มีอุณหภูมิหลอมเหลว 170°C ถึง 200°C ค่าการหดตัวเฉลี่ย 0.4% ถึง 0.5%

4.3 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ABS ใช้ผลิตหัวรัดสายยางของแว่นตาว่ายน้ำ ลักษณะก่อนฉีด เป็นเม็ด ทึบแสง มีสีเหลืองนวลออกน้ำตาลอ่อน นิยมใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ภาชนะในครัวเรือน ชิ้นส่วนโคมไฟยานยนต์ สามารถเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องเตรียมผิว

ABS มีความเหนียว ทนต่อการกระแทก และความร้อนได้ดี มีความแข็งแรงสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ไม่เสื่อมสภาพ ไม่มีสารเป็นพิษตกค้าง ทนต่อด่าง กรดอ่อน ไขมัน และ ทนต่อสารไฮโดรคาร์บอน (เช่น เบนซิน น้ำมันเครื่อง) มีอุณหภูมิหลอมเหลว 200°C ถึง 280°C ค่าการหดตัว 0.4% ถึง 0.6 % ความหนาแน่น 1.05 g/cm^3

4.4 **ซิลิโคน** (Silicone)

ซิลิโคน (มีอักษรย่อ SI) ใช้ผลิตแผ่นปะเก็นกันน้ำของแว่นตาว่ายน้ำ เป็นพลาสติกที่ต่างจากพลาสติกชนิดประเภทอื่น โดยมีส่วนประกอบหลัก คือ ซิลิคอน ที่ได้จากการรีดักชั่นด้วยทรายและออกซิเจนในเตาไฟฟ้า (พลาสติกประเภทอื่น มีคาร์บอนเป็นธาตุหลักตามแต่ส่วนประกอบทางเคมี) แล้วกลายเป็นน้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) ซิลิโคนเรซิน (Silicone Resin) หรือยางซิลิโคน

ซิลิโคนทุกชนิดมีคุณสมบัติ คือ น้ำไม่จับผิว ไม่ติดกาวได้ มีสถานะเป็นกลางทางเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าและทนความร้อนได้

น้ำมันซิลิโคนเป็นของเหลวใสเหมือนน้ำ ไม่มีกลิ่น มีอุณหภูมิตั้งแต่ – 60° C ถึง 250° C ค่าความหนืดจะไม่เปลี่ยนแปลง น้ำมันซิลิโคนใช้ฉีดเป็นผิวชั้นบางเคลือบในการอัด (Compression Mold) สำหรับชิ้นงานพลาสติกหรือชิ้นส่วนยางเพื่อทำให้ชิ้นงานที่อัดอยู่ในแบบหลุดออกได้ง่าย

4.5 <u>ยางธรรมชาติ</u>

ยางใช้ผลิตสายรัดศรีษะของแว่นตาว่ายน้ำโดยกรรมวิธีการอัดร้อน ยางธรรมชาติเป็นวัสดุประเภทไฮโพลีเมอร์ (High Polymer) เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงของวัสดุธรรมชาติ วัสดุนี้เป็นน้ำยาง (สีเหมือนน้ำนม) ได้จากต้นยางพารา นำมารมควันหรือเติมกรดอะซิติก (Acetic Acid) กลายเป็นยางดิบที่เป็นชั้นหนา ยางดิบเมื่อถูกความร้อนจะเหนียวเหมือนกาวจึงต้องทำการวัลเคไนเซชั่นให้ปฏิกิริยานี้หายไป ก่อนการวัลเคไนเซชั่นจะมีการย่อยยางดิบให้เล็กลงแล้วนำไปผสมกับกำมะถัน เติมสารสีลงไป แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูป สารที่เติมให้เป็นสีดำคือคาร์บอนในรูปก๊าซ ทำให้มีความเค้น ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความฝืด สูงขึ้น สำหรับยางผสมสีขาวจะกระทำโดยใช้กรดซิซิลิก (SiO) หรืออะลูมิเนียมซิลิเกตเข้าทำปฏิกิริยาแล้วใส่สีขาวผสมเข้าไป การวัลเคไนเซชั่น (Vulcanization) คือ การทำให้ยางแข็งด้วยการใช้กำมะถันดิบยึดติดกันแน่นโดยกระทำที่อุณหภูมิ 142°C ด้วยความดัน 5 บรรยากาศ ให้เป็นรูปชิ้นส่วนซึ่งสามารถใช้โลหะผสมเพื่อให้ยึดเหนี่ยวกันแข็งแรงขึ้น เช่น ยางรถยนต์ สายยางน้ำ

ยางธรรมชาติเมื่อถูกน้ำมันแร่ เช่น เบนซิน เบนโซล น้ำมัน จะเกิดการบวมและทำให้คุณสมบัติทางกลสูญหายในที่สุด ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศให้ยางแข็ง ชิ้นส่วนยางที่สำคัญควรเก็บรักษาด้วยการทาแป้งพอกผิวกันเอาไว้ ความร้อน แสงแดด หรือความเย็นจัด เป็นตัวเร่งให้ยางแข็ง เปราะ หรืออ่อนเหลว ทำให้ความยืดหยุ่นหายไปในที่สุด

5. <u>การทดสอบคุณสมบัติทางกลของพลาสติก</u>

เนื่องด้วยการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ได้ขนาด น้ำหนัก และความแข็งแรง ให้ตรงตามความต้องการ คุณสมบัติทางกลของพลาสติกที่ถูกต้อง จึงช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น คุณสมบัติทางกลของพลาสติกสามารถทำการทดสอบได้ โดยการทดสอบการดึงของพลาสติก (Tensile Testing of Plastic) ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM D638 [5] การ

ทดสอบนี้สามารถหาค่า Tensile strength, Tensile modulus, Tensile elongation และ Poisson's ratio ชิ้นพลาสติกที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นแบบ Sheet หรือ Plate และจากการฉีดขึ้นรูปให้มีขนาดตามมาตรฐาน (Molded Plastics) ขนาดของชิ้นงานทดสอบแยกออกเป็น 2 กลุ่ม ตามความแข็งของพลาสติกได้ดังนี้

ก. Rigid and semirigid plastics ขนาดชิ้นทดสอบสำหรับพลาสติกที่แข็งและค่อนข้างแข็งมี 4 แบบ แยกตามความหนาของแผ่นวัสดุโดย

แบบที่ 1 (Type 1) สำหรับชิ้นทดสอบที่มีความหนา 7 มม. หรือ น้อยกว่า

แบบที่ 2 (Type 2) สำหรับวัสดุที่รอยขาดไม่อยู่บริเวณช่วงแคบของชิ้นงาน

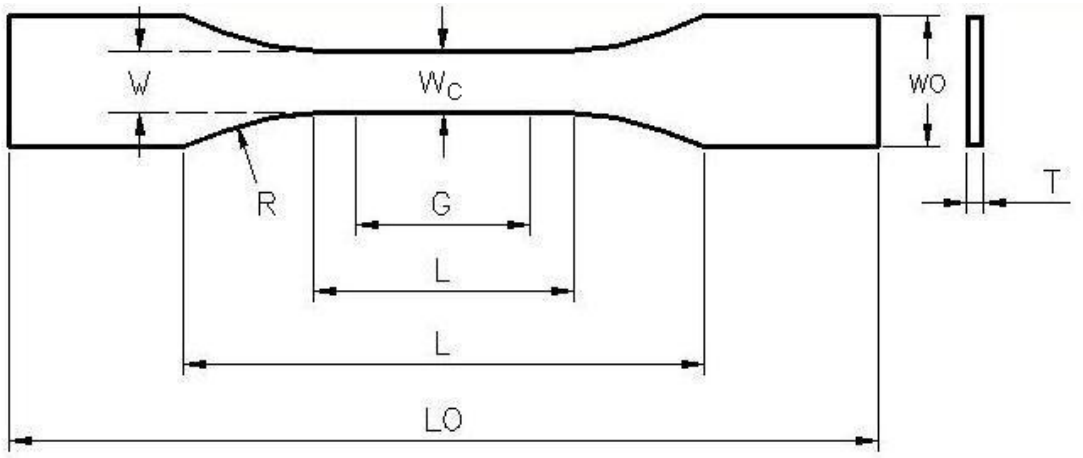
แบบที่ 3 (Type 3) สำหรับวัสดุ ที่มีความหนามากกว่า 7 มม. แต่ไม่เกิน 14 มม.

แบบที่ 5 (Type 5) สำหรับชิ้นทดสอบที่มีความหนา 4 มม. หรือ น้อยกว่า

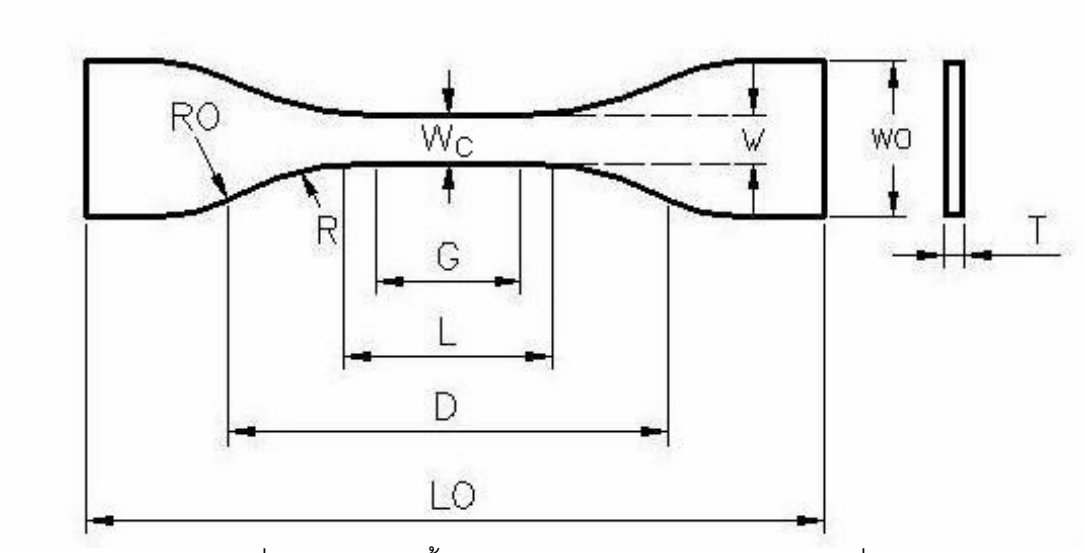
สำหรับรายละเอียดของขนาดต่างๆ ของชิ้นทดสอบทั้ง 4 แบบนี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 12 และ ตารางที่ 1

ข. Nonrigid plastics ขนาดชิ้นทดสอบสำหรับพลาสติกที่มีความอ่อนตัว มี 2 แบบ แยกตามความหนาของแผ่นพลาสติก คือ แบบที่ 3 (Type 3) และแบบที่ 4 (Type 4) โดยแบบที่ 3 ใช้ได้ทั้งพลาสติกที่แข็งและอ่อน

แบบที่ 4 จะใช้กับชิ้นทดสอบที่มีความหนา 4 มม. หรือ น้อยกว่า ภาพวาดของขนาดของแบบที่ 4 ได้แสดงในภาพที่ 13 และขนาดในตารางที่ 1



ภาพที่ 12 ภาพวาดชิ้นทดสอบแสดงขนาดต่างๆ ของชิ้นทดสอบแบบ 1, 2, 3 และ 5



ภาพที่ 13 ภาพวาดชิ้นทดสอบแสดงขนาดต่างๆ ของแบบที่ 4

ตารางที่ 1 แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D638

Dimension (mm)		Under 7 mm. thick		7 to 14 mm. thick	under 4 mm. thick		Tolerances (mm)
		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	
W	Width of narrow section	13	6	19	6	3.18	± 0.5
L	Length of narrow section	57	57	57	33	9.53	± 0.5
WO	Width overall, min	19	19	29	19	…	+6.4
WO	Width overall, min	…	…	…	…	9.53	+3.18
LO	Length of overall, min	165	183	246	115	63.5	No max
G	Gage length	50	50	50		7.62	± 0.25
G	Gage length	…	…	…	25	…	± 0.13
D	Distance between grips	115	135	115	65	25.4	± 0.5
R	Radius of fillet	76	76	76	14	12.7	± 1
RO	Outer radius (Type 5)	…	…	…	25	…	± 1

ขั้นตอนการทดสอบ เริ่มจากการนำชิ้นทดสอบประกอบเข้ากับหัวจับของเครื่องทดสอบ โดยปรับให้ระยะจับได้ตามมาตรฐาน ASTM D638 เริ่มทดสอบโดยการดึงให้ชิ้นทดสอบยืดออกจนขาด สำหรับความเร็วในการดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D882 และมาตรฐาน ISO 527 ได้แนะนำให้ใช้ความเร็ว 5 ถึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับการวัดค่า ความเค้น (Stress, σ) และ การยืดตัว (Elongation, Δ) และ 1 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่า Modulus of Elasticity (E)

6. มาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ

ก่อนที่จะนำแว่นตาว่ายน้ำออกจำหน่ายต่อผู้บริโภค แว่นตาว่ายน้ำทุกรุ่นจะต้องผ่านมาตรฐานทดสอบความแข็งแรง เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ มาตรฐานทดสอบที่ใช้ คือ มาตรฐานของ สหราชอาณาจักร (British Standard หรือ BS) BS5883: 1996 โดยเป็นมาตรฐานด้านความปลอดภัยของผู้สวมใส่ ในมาตรฐานนี้นอกเหนือจากการทดสอบการรั่วซึมของน้ำเข้าภายในแว่นตาว่ายน้ำแล้ว ชิ้นส่วนต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำต้องไม่เป็นโลหะ และยังต้องผ่านการทดสอบทางกล 3 การทดสอบ คือ

6.1 การทดสอบการดึง (Tensile Test)

การทดสอบการดึงใช้ทดสอบเฉพาะชิ้นจมูก ชิ้นงานของชิ้นจมูกต้องปรับให้ตำแหน่งใช้งานที่ยาวที่สุด ทำการดึงตามแนวความยาวด้วยแรง 10 นิวตัน $\pm$ 0.5 นิวตัน แล้วบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น วิธีการนี้ ตามมาตรฐาน BS5883:1996 สามารถทดสอบความต้านทานการลื่นไถลของชิ้นจมูก ควบคู่ไปได้ด้วยกันโดยการทำให้ชิ้นจมูกและห่วงยึดชิ้นจมูกและถ้วยตาเปียกด้วยน้ำก่อนทำการทดสอบ

6.2 การทดสอบการอัด (Compressive Test)

การทดสอบการอัด ใช้ทดสอบความแข็งแรงเฉพาะถ้วยตา ชิ้นถ้วยตาที่ทดสอบต้องวางบนฐานรองที่เหมาะสม แล้วกดบนถ้วยตาด้วยแรงขนาด 588 นิวตัน $\pm$ 2 นิวตัน ผ่านแผ่นโลหะเป็นเวลา 1 นาที $\pm$ 5 วินาที ดำเนินการซ้ำที่ขอบของถ้วยตา การทดสอบนี้ต้องดำเนินการกับถ้วยตาทั้งสองข้าง รายงานผลทดสอบ ประกอบด้วย การเกิดการแตกแยก และรอยร้าว

6.3 การทดสอบการกระแทก (Impact Test)

การทดสอบการกระแทก เป็นการทดสอบความทนทานต่อการเกิดการกระแทกบนเลนส์ของถ้วยตา การทดสอบกระทำโดยการสวมแว่นตาว่ายน้ำบนศีรษะจำลอง โดยตำแหน่งของแว่นตาต้องปรับให้อยู่ตามลักษณะการสวมใช้งาน ปรับศีรษะจำลองให้ระนาบของผิวเลนส์อยู่ในแนวนอน ใช้ลูกบอลโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร หนัก 44 กรัม ปล่อยลงท่อรางให้ตกกระแทกที่จุดกึ่งกลางของเลนส์จากความสูง 1.3 เมตร (หรือควบคุมภายในช่วงความสูง 127 เซนติเมตร ถึง 130 เซนติเมตร) ตรวจสอบสภาพหลังการทดสอบต้องไม่มีรอยร้าวและแตก

7. คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบและคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม

CAD (Computer-Aided Design) คือ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ ซอฟต์แวร์นี้ ช่วยให้ผู้ใช้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ 3 มิติ ที่เป็นลักษณะรูปโครงลวด (wire frame model) รูปแผ่นผิว (surface model) และรูปวัตถุแข็ง (solid model) โดยเทคโนโลยีล่าสุดของซอฟต์แวร์ CAD เป็นการออกแบบวัตถุแข็ง [6] หรือเรียกทับศัพท์ตามภาษาอังกฤษว่า “โซลิดโมเดล” โซลิดโมเดลเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยี ที่สร้างเป็นรูปทรง 3 มิติขึ้นมาก่อนแล้วจึงนำไปกำหนดเป็นภาพวาดแบบ 2 มิติพร้อมขนาด ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาโดยใช้ โซลิดโมเดล จะมีข้อได้เปรียบในการใช้ไฟล์ข้อมูล (CAD file) ของแบบผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ไปใช้งานต่อในซอฟต์แวร์ CAM (Computer - Aided Manufacturing) และ CAE (Computer-Aided Engineering) ได้โดยไม่ต้องสร้างแบบขึ้นมาใหม่

CAE คือ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม หรือ ช่วยคำนวณทางวิศวกรรม เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์การทำงาน หรือจำลอง (Simulation) การใช้งานในสภาวะต่างๆ ที่ต้องการได้ โดยทั่วไปแล้ว ศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ คือ ศาสตร์ทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) หรือ FEA ซอฟต์แวร์ CAE สามารถแยกตามสายงานหรือกลุ่มงานได้ 2 กลุ่ม [7] คือ

1. การวิเคราะห์เพื่อช่วยการออกแบบ
2. การวิเคราะห์เพื่อช่วยกระบวนการผลิต

7.1 การวิเคราะห์เพื่อช่วยการออกแบบ

ซอฟต์แวร์ CAE ประเภทนี้ สามารถใช้ช่วยในการกำหนดขนาดของชิ้นงาน เช่น ความหนาของผนัง ให้เหมาะสมต่อสภาพหรือเงื่อนไขการนำไปใช้งาน โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดน้ำหนัก และขนาดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างของการวิเคราะห์ ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าความเค้นในวัสดุ และการยืดหรือยุบตัวของวัสดุ

7.2 <u>การวิเคราะห์เพื่อช่วยกระบวนการผลิต</u>

ซอฟต์แวร์ CAE ประเภทนี้ ใช้ในการจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตที่จะทำให้ชิ้นงานเสียหาย หรือ ชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ หรือ ประสิทธิภาพของผลผลิตต่ำ การวิเคราะห์ประเภทนี้จะรวมถึงการศึกษาการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรและคนในสายการประกอบสินค้า ซอฟต์แวร์เหล่านี้จึงเน้นการปรับปรุงเพื่อเพิ่มผลผลิตในกระบวนการผลิตต่าง ๆ แต่ไม่ครอบคลุมซอฟต์แวร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องจักรกล CNC (Computer Numerical Control) เนื่องจากได้จัดอยู่ในกลุ่มของซอฟต์แวร์ CAM ซึ่งไม่ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมและทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การนำ CAD/CAE มาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ได้มีการดำเนินการมาอย่างกว้างขวางและแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหรรมการบินและอวกาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ ฯลฯ ผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ามีจำนวนน้อยมาก ยิ่งเป็นผลงานวิจัยภายในประเทศไทยด้วยแล้วไม่มีการทำการวิจัย งานวิจัยที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ต่อไปนี้จึงมีประโยชน์ในการเพิ่มศักยภาพในการออกแบบและทดสอบแว่นตาว่ายน้ำภายในประเทศ โดยใช้เทคโนโลยี CAD และ CAE สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ ซึ่งจะทำให้ประหยัดเวลาและพลังงานในการออกแบบและทดสอบแว่นตาว่ายน้ำก่อนการผลิตจริง

อุปกรณ์

1. **<u>อุปกรณ์และชิ้นงานสำหรับพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ</u>**
    1. แว่นตาว่ายน้ำรุ่นต่างๆ จำนวน 31 รุ่น ซึ่งผลิตที่ บริษัท Optech Co.,Ltd. ที่อยู่ 134 หมู่ 7 ถนนสวนหลวงร่มใจ ตำบลสวนหลวง อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร 74110 เพื่อรวบรวมเป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ เพื่อแบ่งกลุ่มตามลักษณะรูปทรงต่างๆ
    2. เวอร์เนียวัดขนาดชนิดแสดงตัวเลข (ภาพที่ 14) ความละเอียด $\pm$0.05 มิลลิเมตร
    3. คอมพิวเตอร์ Workstation ผลิตโดยบริษัท Silicon Graphics รุ่น O_2 หน่วยประมวลผลแบบ RISC มีหน่วยความจำ 128 MB
2. **<u>ชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางกลตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ</u>**
    1. ชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น J-1 (ภาพที่ 15 ก) จำนวน 5 ชิ้น
    2. ชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น J-10 (ภาพที่ 15 ข) จำนวน 5 ชิ้น
    3. ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น JR-1006 (ภาพที่ 16 ก) จำนวน 20 ชิ้น
    4. ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น 2006 (ภาพที่ 16 ข) จำนวน 20 ชิ้น
    5. ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น 981 (ภาพที่ 16 ค) จำนวน 20 ชิ้น
3. **<u>ชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ</u>**

ชิ้นงานวัสดุ PC และ PVC สำหรับทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ FEA โดยมีขนาดดังได้กล่าวมาแล้วในภาพที่ 12 และ 13

<u>ภาพที่ 14</u> เวอร์เนียชนิดแสดงตัวเลข

(ก) ชิ้นจมูก รุ่น J-1 (ข) ชิ้นจมูก รุ่น J-10

<u>ภาพที่ 15</u> ชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น J-1 (ก) และ รุ่น J-10 (ข)

(ก) ถ้วยตา รุ่น JR-1006

(ข) ถ้วยตา รุ่น 2006 (ค) ถ้วยตา รุ่น 981

ภาพที่ 16 ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น JR-1006 (ก), 2006 (ข) และรุ่น 981 (ค)

4. **อุปกรณ์ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ**

   1. ชุดทดสอบการดึงและการอัด ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H50KS (ภาพที่ 17) ทำงานด้วยระบบ Ball screw พร้อมคอมพิวเตอร์สำหรับจัดเก็บและประมวลผล และเครื่องพิมพ์เลเซอร์ สำหรับพิมพ์ผลทดสอบ คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องได้แสดงในภาคผนวกที่ 1
   2. อุปกรณ์สำหรับจับยึด (Fixture) ชิ้นจมูก (ภาพที่ 18) สำหรับใช้กับเครื่องทดสอบการดึงและการอัด

ภาพที่ 17 เครื่องทดสอบการดึงและการกด (Tensile and Compress Tester)

ภาพที่ 18 อุปกรณ์สำหรับจับยึด (Fixture) ชิ้นจมูก

3. เวอร์เนียวัดขนาดชิ้นงานทดสอบ ความละเอียด ± 0.05 มิลลิเมตร (ภาพที่ 19 ก)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด ±0.01 กรัม (ภาพที่ 19 ข)

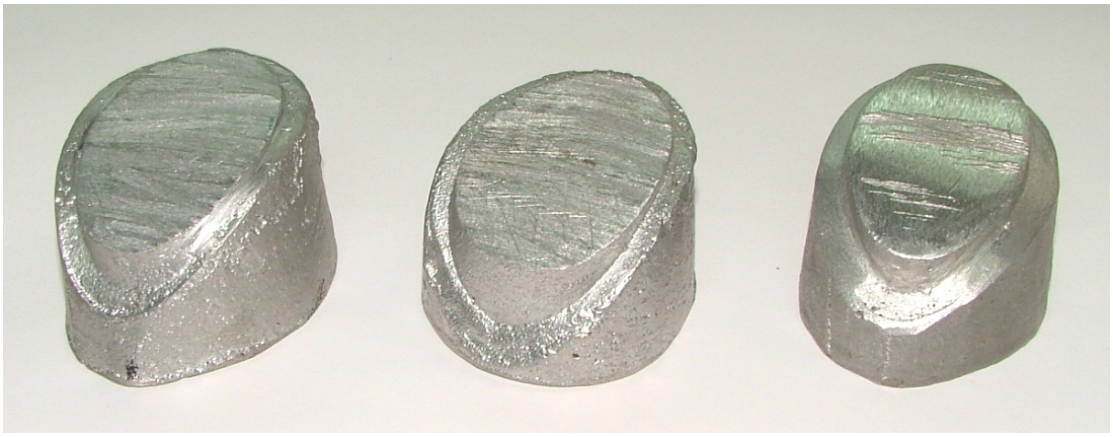
(ก) เวอร์เนียวัดขนาด

(ข) เครื่องชั่งน้ำหนัก

ภาพที่ 19 เครื่องชั่งน้ำหนัก และ เวอร์เนียวัดขนาด

5. แผ่นโลหะ (Steel plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. หนา 15 มม. ทำจากเหล็ก (ภาพที่ 20) สำหรับทดสอบการอัด
6. ฐานรองถ้วยตา (Support) สำหรับทดสอบการอัดของถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น JR-1006 (ภาพที่ 21 ก) ทำจากอลูมิเนียม
7. ฐานรองถ้วยตา สำหรับทดสอบการอัดของถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น 2006 (ภาพที่ 21 ข) ทำจากอลูมิเนียม
8. ฐานรองถ้วยตา สำหรับทดสอบการอัดของถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น 981 (ภาพที่ 21 ค) ทำจากอลูมิเนียม

ภาพที่ 20 แผ่นโลหะทดสอบการอัด



(ก) ฐานรองถ้วยตา รุ่น JR-1006 (ข) ฐานรองถ้วยตา รุ่น 2006 (ค) ฐานรองถ้วยตา รุ่น 981

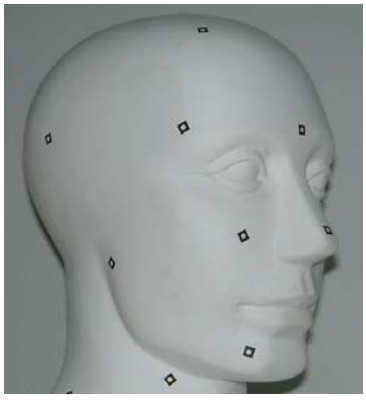
ภาพที่ 21 ฐานรองถ้วยตา (Support) สำหรับทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น JR-1006 (ก) รุ่น 2006 (ข) และรุ่น 981 (ค)

9. ชุดทดสอบการกระแทก (ภาพที่ 22 ก) ประกอบด้วยโครงอลูมิเนียม และ ท่อราง หรือ guide เป็น พลาสติกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความยาวท่อ 125 เซนติเมตร สามารถปรับระดับความสูงการปล่อยตกของลูกบอลโลหะได้
10. ลูกบอลโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม. น้ำหนัก 44 กรัม (ภาพที่ 22 ข)
11. ศีรษะจำลองสำหรับการทดสอบการกระแทก (ภาพที่ 23 ก) เป็นรูปปั้นจากปูนขาว และ เบ้ารองศีรษะจำลองสำหรับปรับระดับศีรษะ (ภาพที่ 23 ข)

การทดสอบทางกลของชิ้นจมูกและเลนส์ ได้ดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบ ติดตั้งอยู่ที่ แผนกช่างยนต์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

(ก) ชุดทดสอบการกระแทก (ข) ลูกบอลโลหะ

ภาพที่ 22 ชุดทดสอบการกระแทก (ก) และ ลูกบอลโลหะ (ข)

(ก)  (ข)

ภาพที่ 23 (ก) รูปปั้นศีรษะจำลองสำหรับทดสอบการกระแทก (ข) เบ้ารองศีรษะจำลอง

5. **อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้** CAD/CAE

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Pentium IV 2.0 GHz หน่วยความจำ DRAM PC 266 ขนาด 128 MB การ์ดแสดงผลหน่วยความจำวีดีโอ 64 MB, จอสีขนาด 17 นิ้ว
2. เครื่อง Optical 3-D Scanner ยี่ห้อ gom รุ่น ATOS II ของบริษัท GOM ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เมนเทล จำกัด ตั้งอยู่ เลขที่ 448 อาคาร พี. กะรัต ชั้น 11 ถ. รัชดาภิเษก ห้วยขวาง กทม. 10320.
3. เครื่องพิมพ์ชนิด Inkjet
4. ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER ของ บริษัท Parametric Technology Corporation (PTC), USA.
5. ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.NASTRAN for Windows ของ บริษัท MSC Software Corporation, USA.
6. ซอฟต์แวร์ MATLAB ของบริษัท Mathworks สำหรับประมวลผลทางสถิติและพล็อตกราฟเส้น

การดำเนินการการวิเคราะห์นี้ใช้สถานที่และอุปกรณ์ของ หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ภาพที่ 24 เครื่อง Optical 3-D Scanner

วิธีการ

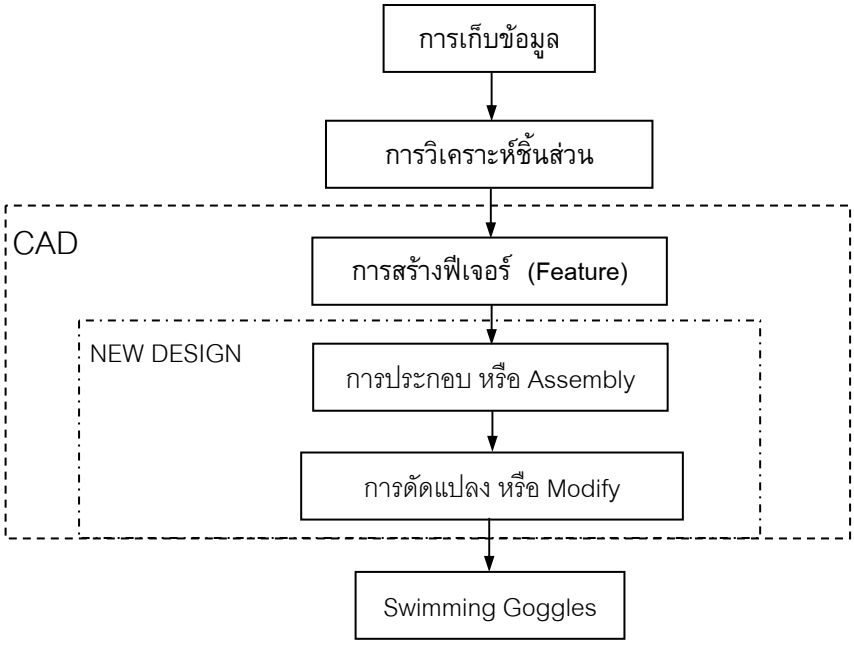
1. **<u>วิธีการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบ</u>**

การพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (CAD) ในการพัฒนารูปทรงเฉพาะแบบ หรือ ฟีเจอร์ (feature) ต่างๆ ของชิ้นส่วนของแว่นตาน้ำ เพื่อให้สะดวก รวดเร็วและง่ายต่อการออกแบบ การวิจัยนี้ ดำเนินการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำเป็นโซลิตโมเดล โดยใช้ซอฟต์แวร์ Pro/ENGINEER ในการออกแบบ ขั้นตอนการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่าย สามารถสรุปเป็นแผนภูมิ ได้ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยมีรายละเอียดดังนี้

<u>ก. การเก็บข้อมูล</u> การเก็บข้อมูลเป็นการรวบรวมชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำรุ่นต่างๆ ที่ทางบริษัท Optec ได้เคยผลิตและที่กำลังผลิตอยู่

<u>ข. การวิเคราะห์ชิ้นส่วน</u> การวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำ เป็นการจัดกลุ่มแบ่งลักษณะรูปทรงของส่วนต่างๆ ของชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ แล้วจำแนกเป็นกลุ่มของรูปทรงเฉพาะแบบ

<u>ค. การสร้างฟีเจอร์</u> รูปทรงเฉพาะแบบหรือฟีเจอร์ ของแต่ละกลุ่มตามที่ได้วิเคราะห์ ได้นำมาใช้สร้างเป็นโซลิตโมเดลของรูปทรงนั้นๆ ที่สามารถแก้ไขขนาดได้ รูปทรงเฉพาะแบบที่รวบรวมและสร้างมานี้ จัดรวมเป็นห้องสมุด (Library) เพื่อนำมาใช้กับแว่นตารุ่นต่างๆ ได้ภายหลัง การสร้างฟีเจอร์ดำเนินการโดยใช้ CAD



<u>ภาพที่ 25</u> แผนภูมิแสดงขั้นตอนการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ

ง. การประกอบ การประกอบเป็นการนำฟีเจอร์ที่เป็นเป็นโซลิตโมเดล ที่ได้รวบรวมอยู่ใน Library มาประกอบรวมเป็นเป็นโซลิตโมเดลของแว่นตาว่ายน้ำ การประกอบฟีเจอร์ดำเนินการโดยใช้ CAD

จ. การดัดแปลง การดัดแปลงเป็นการแก้ไขขนาดซึ่งสามารถทำได้โดยแก้ไขที่ ตัวฟีเจอร์แล้วมาประกอบกัน หรือทำการประกอบรวมกันแล้ว และทำการแก้ไขเพื่อให้ได้เป็นรูปทรงของแว่นตาว่ายน้ำตามต้องการ

ในรายงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบ เฉพาะชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำที่มีรูปทรงที่ซับซ้อน คือ ถ้วยตา เนื่องจากถ้วยตาที่ นอกจากมีรูปทรงที่ซับซ้อนแล้ว ยังมีจำนวนรูปแบบที่หลากหลาย

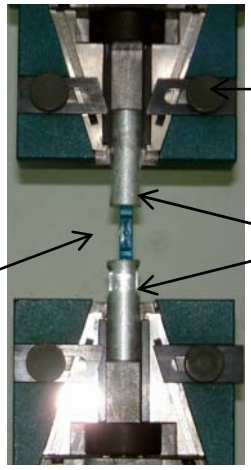
2. วิธีการทดสอบทางกลของแว่นตาว่ายน้ำ

การทดสอบทางกลของแว่นตาว่ายน้ำ ประกอบด้วย การทดสอบแรงดึงของชิ้นจมูก การทดสอบการอัดของถ้วยตาของตัวถ้วยตา และ การทดสอบการกระแทกบนเลนส์ของถ้วยตา เพื่อความปลอดภัย ความแข็งแรงให้ได้คุณภาพตรงตามความต้องการของผู้ใช้ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบของสถาบัน มาตรฐานสหราชอณาจักร (British Standard Institute หรือ BSI) มาตร-ฐาน BS5883:1996 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่บริษัท Optech Co,Ltd. ใช้อ้างอิงเป็นมาตรฐานการผลิตแว่นตาว่ายน้ำ ชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ ซึ่งได้แก่ ชิ้นจมูกและเลนส์ จำนวนไม่น้อยกว่า 2 รุ่น ได้นำมาใช้ทดสอบทางกลต่างๆ เพื่อนำผลทดสอบมาใช้อ้างอิงและเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ CAE โดยวิธีการและเงื่อนไขการทดสอบทางกลมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วิธีการทดสอบการดึงของชิ้นจมูก

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความทนทานของชิ้นจมูกต่อแรงดึง ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบการดึงและการกด (ภาพที่ 17) โดยการนำ Fixture มายึดปลายของชิ้นจมูก แล้วนำไปติดตั้งที่หัวจับของเครื่องทดสอบแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 26 กำหนดเงื่อนไขการดึงและทำการดึงชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำโดยเริ่มแรงดึง จาก 0 นิวตัน แล้วเพิ่มแรงขึ้นด้วยการควบคุมระยะยืดด้วยอัตรา 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนชิ้นจมูกขาดหรือสูงสุดที่แรงดึง 60 N (หรือ 6 เท่าของค่ามาตรฐาน BS5883:1996) ข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบบันทึก ได้แก่ ค่าความเค้น ความเครียด และค่าแรงดึงเทียบกับระยะยืดตัวของชิ้นจมูก

(ก)



(ข)

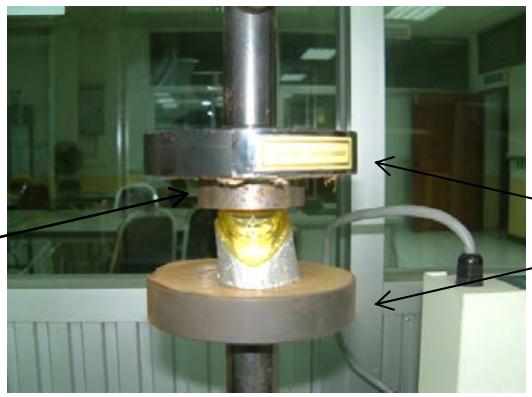
ภาพที่ 26 ก) การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับอุปกรณ์จับยึด และ ข) การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดบนเครื่องทดสอบ

2.2 วิธีการทดสอบการอัดของถ้วยตา

การทดสอบแรงอัด เป็นการทดสอบความคงทนของถ้วยตา ต่อแรงอัดในแนวนอนและแนวตั้ง โดยมีลำดับการทดสอบดังต่อไปนี้

1. นำถ้วยตาวางบนฐานรองถ้วยตาในแนวที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 27
2. นำถ้วยตาและฐานรองวางระหว่างหัวกด ของเครื่องทดสอบการดึงและการกด (ภาพที่ 28) โดยใช้ แผ่นโลหะ (Steel plate) วางบนถ้วยตา ปรับให้ได้ระดับ แล้วเลื่อนหัวกดลงมาให้สัมผัสกับแผ่นโลหะ

ภาพที่ 27 การติดตั้งถ้วยตาลงบนฐานรองถ้วยตา



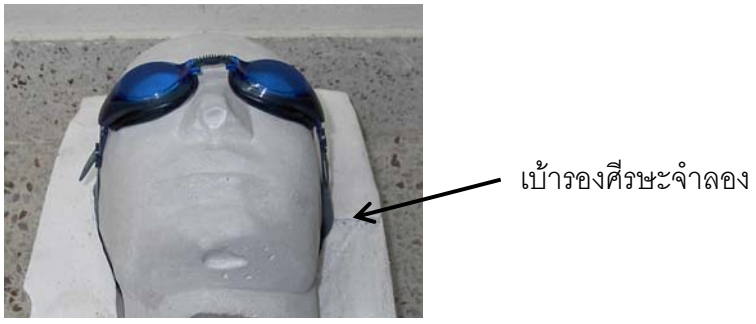
ภาพที่ 28 ชิ้นงานและอุปกรณ์ ในการทดสอบการกด

3. ปรับโหลดของเครื่องทดสอบ โดยเพิ่มค่าแรงอัดด้วยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ด้วยอัตรา 5 มิลลิเมตรต่อนาที ไปจนถึง 1000 N (หรือ 1.7 เท่าของค่าแรงอัดตามมาตรฐานทดสอบ BS5883:1996) บันทึกค่าแรงอัดและระยะยุบตัวของแผ่นโลหะทุกๆ 100 N
4. ดำเนินลำดับการทดสอบตาม 1 ถึง 3 ซ้ำ โดยนำถ้วยตาชิ้นใหม่วางบนฐานรอง ดังแสดงในภาพที่ 28

2.3 วิธีการทดสอบการกระแทกของเลนส์ถ้วยตา

การทดสอบการกระแทกบนผิวเลนส์ของถ้วยตา เป็นการทดสอบความทนทานของส่วนที่เป็นเลนส์ของชิ้นส่วนถ้วยตา อุปกรณ์ที่ใช้ให้เกิดการกระแทกเป็นลูกบอลโลหะ เส้นผ่าศูนย์กลาง 22 มม. หนัก 44 กรัม ลำดับขั้นตอนการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. สวมแว่นตาว่ายน้ำเข้ากับศีรษะจำลอง แล้วนำศีรษะจำลองวางลงในเบ้ารองรับ (ภาพที่ 29)

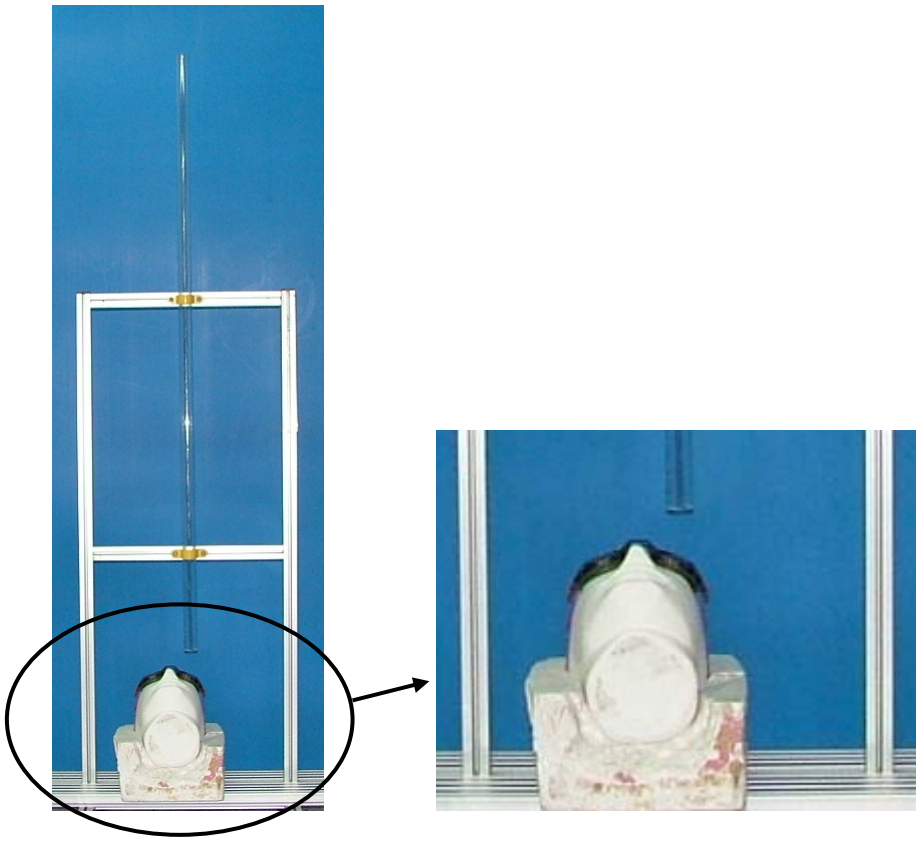


ภาพที่ 29 การสวมแว่นตาว่ายน้ำเข้ากับศีรษะจำลองเพื่อทดสอบการกระแทก

2. วางศีรษะจำลองลงบนเบ้ารองศีรษะ ปรับศีรษะจำลองให้ผิวเลนส์อยู่ในแนวนอน โดยให้จุดกึ่งกลางของเลนส์อยู่ใต้แนวดิ่งของท่อ guide ของชุดทดสอบการกระแทก (ภาพที่ 30)

3. ปรับระดับความสูงของท่อ โดยให้ปลายด้านล่างของท่ออยู่สูงจากผิวเลนส์ของแว่นตาว่ายน้ำ 5 เซนติเมตร (ตามมาตรฐาน BS5883:1996 กำหนดให้อยู่ในช่วง 5 ซม. $\pm$1 ซม.)

4. ปล่อยลูกบอลโลหะลงมาตามท่อให้กระแทกกับผิวหน้าของเลนส์ของแว่นตาว่ายน้ำที่ความสูง 1.3 เมตร



ภาพที่ 30 การวางเบ้ารองศีรษะจำลองเข้ากับชุดทดสอบการกระแทก

3. วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติ ทางกลของวัสดุ ที่ใช้ทำชิ้นจมูก และถ้วยตา มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำเม็ดพลาสติก PVC ไปอัดให้เป็นแผ่นหนา 3 มม. ด้วยความร้อน 180 ^{O}C
2. นำแผ่นพลาสติกตามข้อ 1 ไปตัดให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 (ภาพที่ 12)

3. นำชิ้นทดสอบที่ได้ไปดึงด้วยเครื่องทดสอบการดึง (ภาพที่ 17) โดยกำหนดความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที เริ่มต้นจากแรงดึงเท่ากับศูนย์นิวตัน ไปจนชิ้นทดสอบขาด บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัว และ ความเค้นกับความเครียด
4. ทำตามขั้นตอนที่ 3 จนครบจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ
5. นำผลการทดสอบที่ได้ ตามข้อ 3 และ 4 มาคำนวณค่าเฉลี่ยของกราฟ ความเค้น - ความเครียด
6. คำนวณค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E) จากค่าเฉลี่ยในข้อ 5

4. <u>วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ CAE</u>

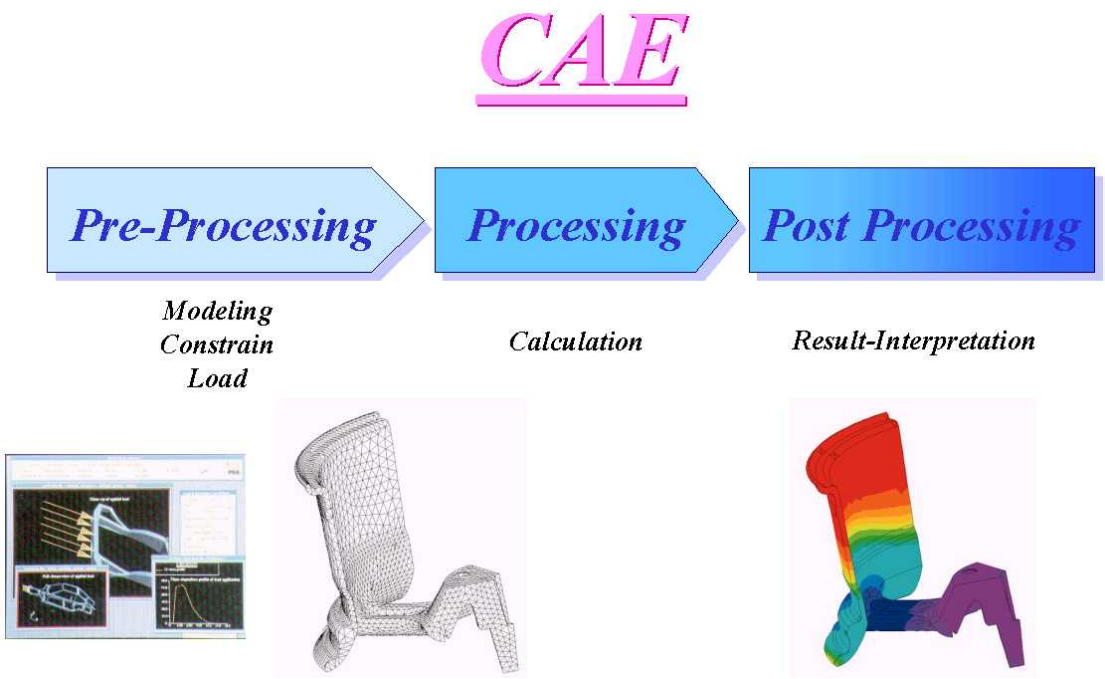
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER ในการสร้างแบบโซลิตโมเดล เพื่อใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำ โดยได้สร้างแบบจำลองชิ้นจมูก จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น J-1 และ J-10 และ สร้างแบบจำลองถ้วยตา จำนวน 3 รุ่น คือ รุ่น JR-1006, รุ่น 2006 และ รุ่น 981 ตามขนาดของผลิตภัณฑ์จริง จากนั้นทำการ Export model เป็น ไฟล์ข้อมูลชนิด STEP เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ ในโปรแกรม Nastran ต่อไป

การวิเคราะห์ CAE ใช้ซอฟต์แวร์ ชื่อ MSC/NASTRAN for Windows เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้าน FEA สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นจมูกและถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ ภายใต้สภาวะของแรงที่มากระทำ ที่สอดคล้องตามกระบวนการทดสอบจริง การวิเคราะห์โดยวิธี FEA สามารถแบ่งเป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ประกอบด้วย Pre-Processing, Processing และ Post Processing โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการปฏิบัติการดังภาพที่ 31[8] โดยเริ่มต้นจาก

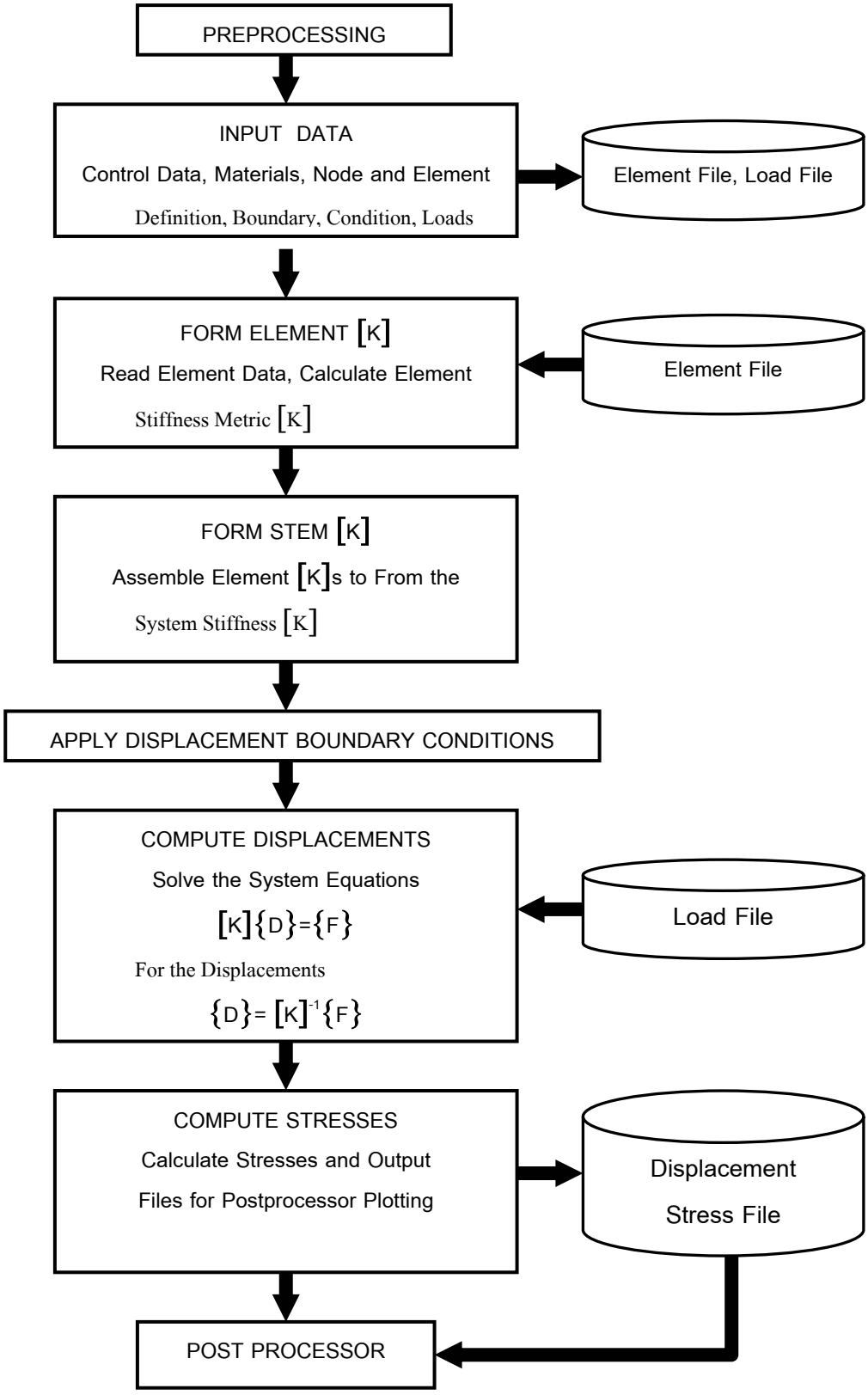
<u>ช่วงการเตรียมการ (Pre-Processing)</u> หรือช่วงการให้ข้อมูลเพื่อการประมวลผล เป็นการสร้างแบบจำลอง FEM (Finite Element Model) โดยนำข้อมูล CAD ของชิ้นจมูกหรือถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำที่สร้างจากโปรแกรม Pro/ENGINEER มาสร้างเป็นโหนด (Node) เพื่อใช้สร้างชิ้นประกอบ (Element) ที่เหมาะสม แล้วกำหนดลักษณะของชิ้นประกอบ พร้อมกับการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยวัสดุที่ใช้คือ PVC และ PC หลังจากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และแรง (Load) ที่กระทำ ต่อแบบจำลอง FEM ให้ตรงตามสภาวะการทดสอบจริงคือ Tensile Test, Compressive Test และ Impact Test

ช่วงการประมวลผล (Processing) ใช้คำสั่งการวิเคราะห์ FEA จากโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows เพื่อประมวลผลจากแบบจำลอง FEM โดยโปรแกรมจะสร้าง Stiffness Matrix ของแต่ละชิ้นประกอบ รวบรวมจนกลายเป็น Stiffness Matrix ของทั้งแบบจำลอง แล้วทำการคำนวณผลลัพธ์ที่ได้

ช่วงหลังการประมวลผล (Post processing) เป็นการนำผลที่ได้แสดงเป็นภาพกราฟฟิกของการเปลี่ยนรูปทรง (Deformation) ค่าระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง (Transformation) และความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง เป็นระดับชั้นสี (Contour) โดยรายละเอียดของการดำเนินการวิเคราะห์ได้แสดงเป็นแผนภูมิ ในภาพที่ 32 [9]



ภาพที่ 31 ขั้นตอนการปฏิบัติงานการวิเคราะห์โดยใช้ CAE



ภาพที่ 32 แผนผังขั้นตอนการใช้ FEA ในโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows

ผลการวิจัยและทดลอง

1. ผลการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ

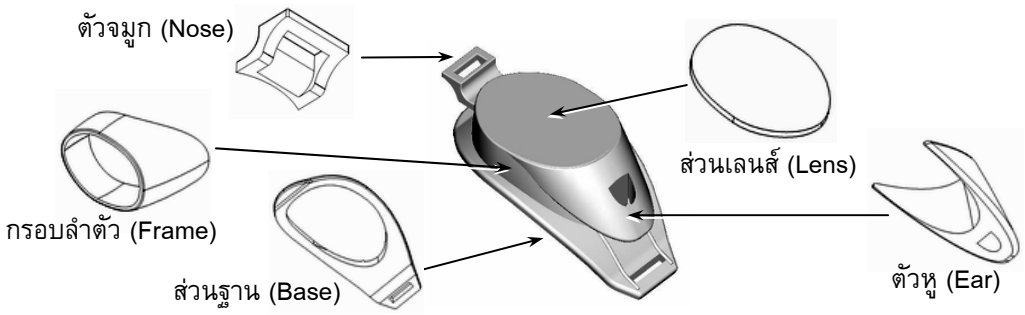
ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ เป็นชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนในการออกแบบ สำหรับแผ่นปะเก็นกันน้ำ ชิ้นจมูก ยางรัดศีรษะ และตัวหัวรัดสายยาง เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปทรงไม่ยุ่งยากซับซ้อน ผลการวิจัยนี้จึงได้เน้นกรรมวิธีการออกแบบถ้วยตา เพื่อให้ง่ายและสดวกต่อการออกแบบ ผลการวิจัยการพัฒนากรรมวิธีการออกแบบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ

ส่วนประกอบพื้นฐานของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำทุกรุ่น สามารถแยกได้เป็น 6 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 33 แต่ละส่วนประกอบเหล่านี้ จัดเป็นรูปทรงเฉพาะแบบ หรือ ฟีเจอร์ ได้เป็น

1. ส่วนฐาน หรือ Base - เป็นส่วนฐานของถ้วยตา มีหน้าที่เชื่อมให้แผ่นปะเก็นกันน้ำยึดติดกับตัวถ้วยตา
2. กรอบลำตัว หรือ Frame - เป็นลำตัวของถ้วยตา
3. ส่วนเลนส์ (Lens) - เป็นแผ่นเลนส์เพื่อการมอง เป็นฟีเจอร์ที่ไม่ซับซ้อน
4. ตัวหู (Ear) - เป็นส่วนปลายของถ้วยตา สำหรับเชื่อมต่อกับยางรัดศรีษะ แว่นตาว่ายน้ำบางรุ่นอาจเชื่อมตัวจมูกติดกับถ้วยตา และบางรุ่นอาจแยกต่างหากได้
5. ตัวจมูก (Nose) - เป็นส่วนปลายอีกด้านของถ้วยตา สำหรับใช้ต่อชิ้นจมูก แว่นตาว่ายน้ำบางรุ่นอาจเชื่อมตัวจมูกติดกับกระบอกตา และบางรุ่นอาจต่างหากก็ได้
6. อื่น ๆ (ได้แก่ ตัวกึ่งกลาง หรือ Middle)

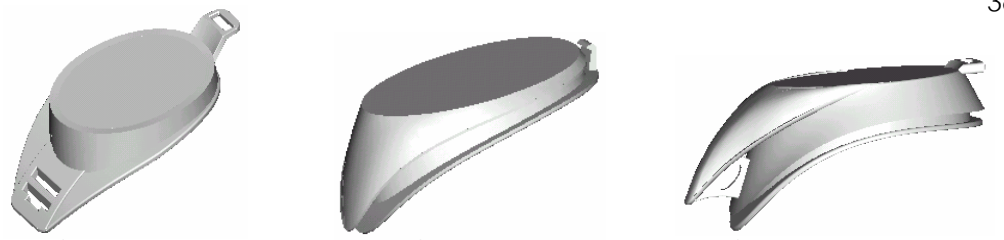
ถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำแต่ละรุ่น มีส่วนประกอบรวมกันได้ตั้งแต่ 2 ถึง 5 ส่วน ตารางที่ 2 สรุปส่วนประกอบต่างๆ ของแว่นตาแต่ละรุ่น ตารางที่ 2 นี้ ยังได้แบ่งแบบของถ้วยตา ได้เป็น 3 แบบ ตามลักษณะของรูปทรงของถ้วยตา (ภาพที่ 34) รายละเอียดของแต่ละแบบมีดังนี้



ภาพที่ 33 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ

ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำของแต่ละรุ่น

แบบที่	รุ่น	Base	Frame	Lens	Ear	Nose	อื่นๆ
1	89 BL	-	y	y	-	-	-
	89 DL	y	y	y	-	y	-
	89 mini	-	y	y	-	-	-
	903	y	y	y	-	y	-
	905	y	y	y	y	y	-
	981, 982	y	y	y	-	y	-
	1009	y	y	y	-	y	-
	ABB-1, ABB-2	y	y	y	y	y	-
	F-1	y	y	y	-	-	-
	LJ-002, LJ-003	y	y	y	-	y	-
	LJ-005	y	y	y	-	y	-
2	931, 933	y	y	y	-	-	Middle
	2006	y	y	y	-	y	Middle
	3017, 3018, 3020	y	y	y	-	y	Middle
	F-3G	y	y	y	-	y	Middle
	YA-4700	y	y	y	-	y	Middle
3	951	y	y	-	-	y	Middle
	2005	y	y	y	-	y	Middle, Subbase
	2008	y	y	y	-	y	Middle
	3016	y	y	y	-	y	-
	3019	y	y	y	-	y	ที่คล้อง-Joint
	JR-1005, JR-1006	y	y	y	y	y	-
	JR-1009	y	y	y	-	y	-
	NS-405	y	y	y	-	-	Middle



แบบที่ 1 ถ้วยตาชั้นเดียว แบบที่ 2 ถ้วยตา 2 ชั้น แบบที่ 3 ถ้วยตารูปทรงซับซ้อน

ภาพที่ 34 การแบ่งแบบของรูปทรงของถ้วยตาได้เป็นสามแบบ

แบบที่ 1 ถ้วยตาชั้นเดียว (หรือ ถ้วยตาธรรมดา) มีส่วนประกอบ ประกอบด้วยกรอบลำตัวและแผ่นเลนส์ โดยมีลำตัวเป็นกรอบเป็นเนื้อเดียวกัน มีผนังเรียบและหนาสม่ำเสมอ เป็นถ้วยตาที่มีรูปทรงแบบง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

แบบที่ 2 ถ้วยตา 2 ชั้น เป็นถ้วยตาที่มีรูปทรงซับซ้อนมากกว่าแบบที่ 1 โดยมีลำตัวเป็นกรอบหนาไม่สม่ำเสมอ เสมือนมีกรอบ 2 ชั้น มีร่องไว้สำหรับใส่แผ่นปะเก็นกันน้ำ

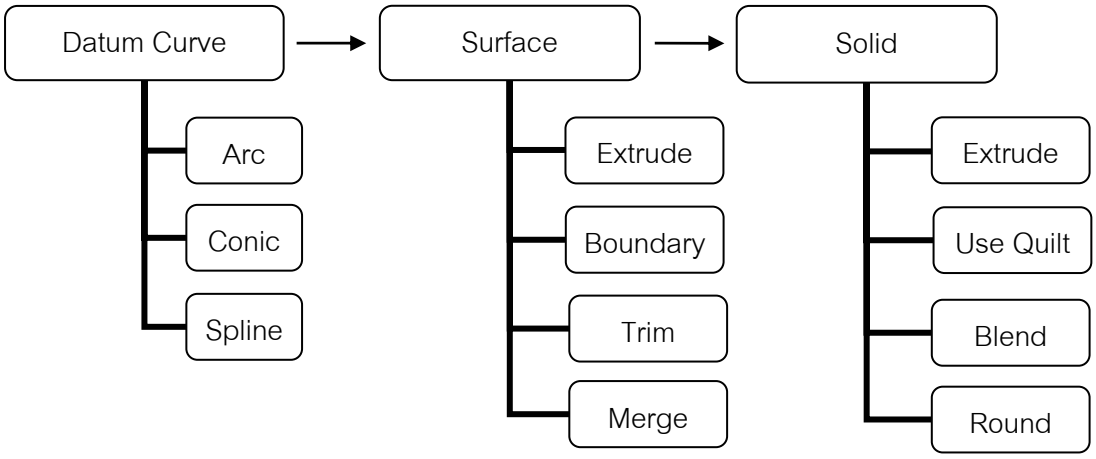
แบบที่ 3 ถ้วยตารูปทรงซับซ้อน เป็นถ้วยตาที่มีรูปทรงซับซ้อนสูง โดยเฉพาะที่กรอบลำตัว ความหนาของลำตัวไม่คงที่ อาจมีส่วนประกอบอื่นเพิ่ม เช่น มีครีบเสริมที่กรอบลำตัว เป็นต้น

1.2 ผลการออกแบบฟีเจอร์

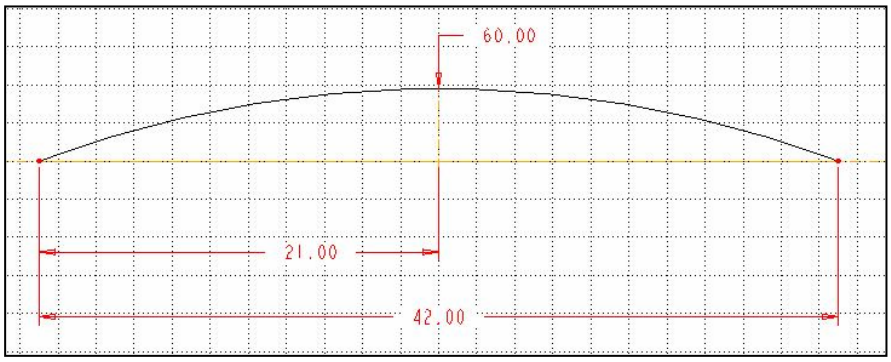
รูปทรงเฉพาะแบบ หรือ ฟีเจอร์ ต่างๆ ตามสรุปในหัวข้อ 1.1 (ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของถ้วยตา) ได้นำมาสร้างเป็น โซลิดโมเดล โดยมีรายละเอียดของลำดับการสร้าง (ภาพที่ 35) ดังต่อไปนี้

Datum Curve เป็น entity ของเส้นโค้งต่าง ๆ เช่น Arc, Conic และ Spline โดย

Arc คือ ส่วนโค้งของวงกลม ใช้สร้าง ส่วนฐาน กรอบลำตัว และเลนส์ ภาพที่ 36 แสดงการกำหนดขนาดต่างๆ ของ Arc.



ภาพที่ 35 ลำดับการสร้างโซลิดโมเดลของรูปทรงเฉพาะแบบของถ้วยตา



ภาพที่ 36 แสดงการกำหนดขนาดต่างๆ ของ Arc

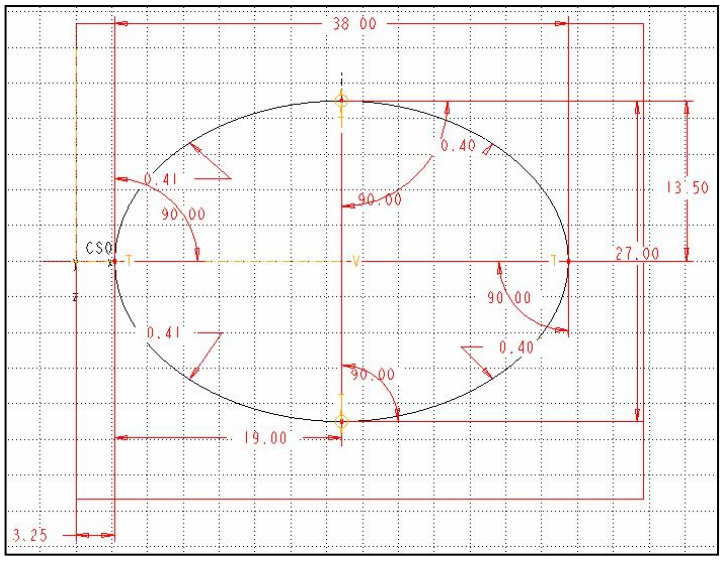
Conic คือ เส้นโค้งรูป Cone สามารถนำมาใช้สร้างเป็นรูปวงรี ได้โดยใช้เส้นโค้ง Conic นี้ 4 เส้น มาเชื่อต่อกันดังแสดงในภาพที่ 37 โดยมีขนาดต่างๆ ที่ต้องกำหนดตามแสดง ใช้สร้าง ส่วนฐาน กรอบลำตัว เลนส์ และ ตัวหู

Spline คือ เส้นงอโค้งอิสระ กำหนดโดยจุดหลายจุดที่เส้น Spline ลากผ่าน และมุม หรือ Tangency ที่ปลายทั้ง 2 ของเส้น ดังแสดงในภาพที่ 38 ใช้สร้าง ส่วนฐาน กรอบลำตัว และ ตัวหู

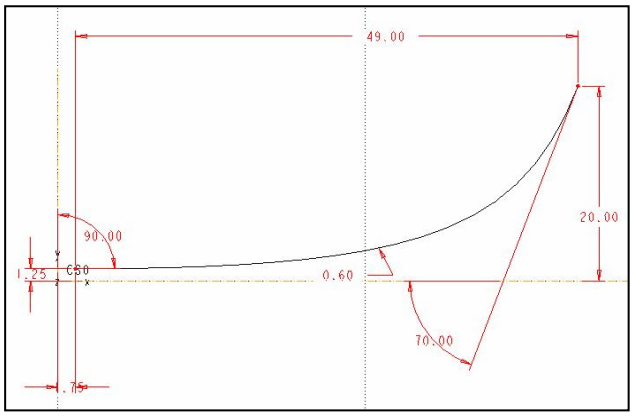
Surface เป็นรูปทรงเฉพาะแบบ แบบพื้นผิวไม่มีความหนา ใช้สำหรับการกำหนดเป็นผิวของโซลิตโมเดล สร้างได้จาก datum curve วิธีการสร้าง Surface ประกอบด้วยการ Extrude, Boundary, Trim และ Merge โดย

Extrude คือ การอัดรีดในแนวเส้นตรงความยาวคงที่ ในแนวตั้งฉากกับระนาบที่ใช้วาด datum curve ให้เป็นแผ่นพื้นผิว ดังแสดงเป็นตัวอย่างในภาพที่ 39ก

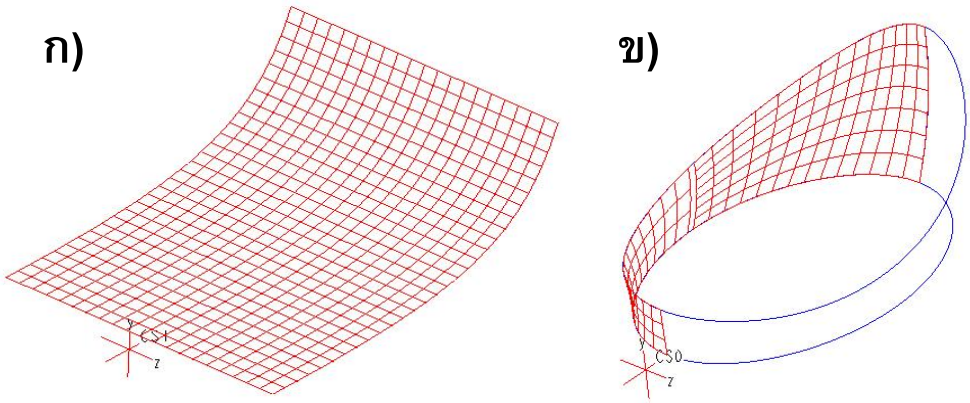
Boundary คือ การสร้างพื้นผิวโดยใช้ datum curve เป็นตัวกำหนดขอบเขตของพื้นผิว พื้นผิวที่ได้อยู่ภายใน หรืออยู่ระหว่าง datum curve ภาพที่ 39ข แสดงตัวอย่างพื้นผิวที่สร้างโดย การใช้ Boundary



ภาพที่ 37 แสดงการสร้างวงรีด้วย Conic



ภาพที่ 38 แสดงการสร้างเส้น Spline



ภาพที่ 39 การสร้าง Surface ด้วยการ Extrude (ภาพ ก) และโดยการให้ Boundary (ภาพ ข)

Trim คือ การตัด surface ให้มีขอบเขตตามต้องการ โดยใช้ datum curve หรือ surface เป็นตัวกำหนด ภาพที่ 40ก แสดงการ trim พื้นผิวของภาพที่ 40ก โดย ใช้ datum curve ที่วาดเป็นส่วนฐานของถ้วยตา

Merge คือ การรวมหลาย surface ให้เป็นผิวเดียวกัน (ภาพที่ 40ข)

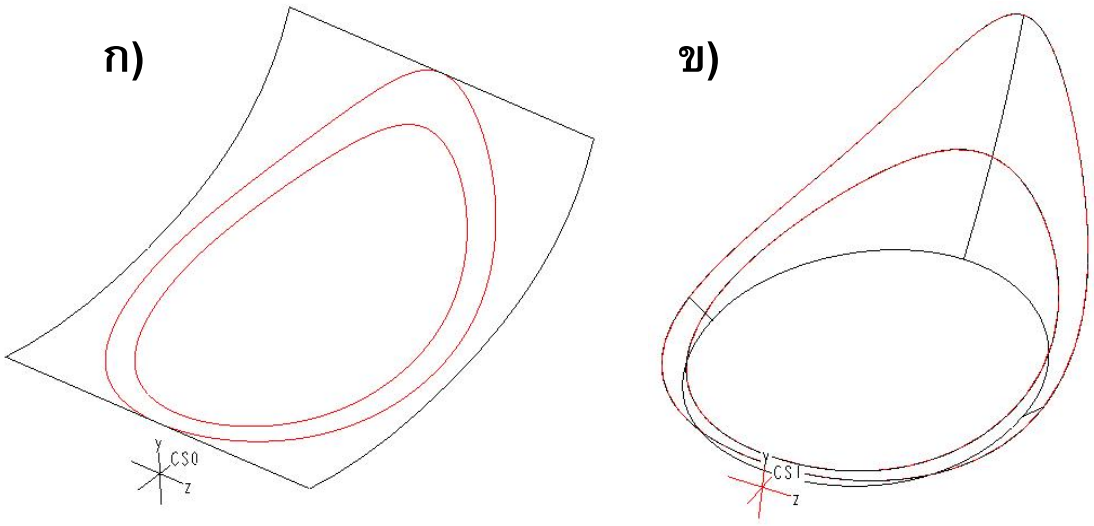
Solid เป็นรูปทรงเฉพาะแบบ แบบวัตถุตัน หรือ โซลิดโมเดล สามารถสร้างได้โดยใช้การ Extrude, Use Quilt, Blend และ Round. โดย

Extrude คือ การอัดรีดพื้นที่ปิด ในแนวเส้นตรงความยาวคงที่ ในแนวตั้งฉากกับระนาบที่ใช้วาดพื้นที่ปิด ได้เป็นวัตถุ 3 มิติ

Use Quilt คือ การสร้างวัตถุ 3 มิติ จาก พื้นผิว

Blend คือ การดันรีดผ่านพื้นที่ปิด 2 หรือมากกว่าพื้นที่ปิด ได้เป็นวัตถุ 3 มิติ

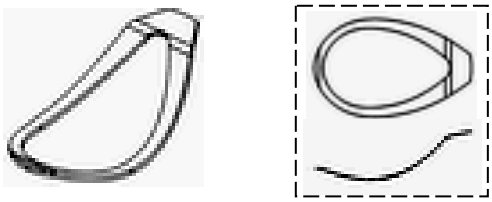
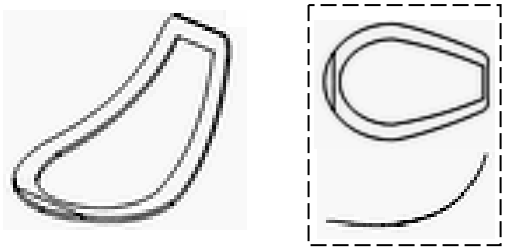
Round คือ การลบขอบและมุม ให้เป็นโค้งมล



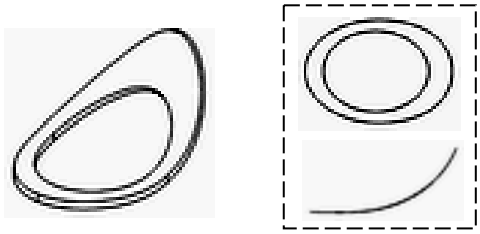
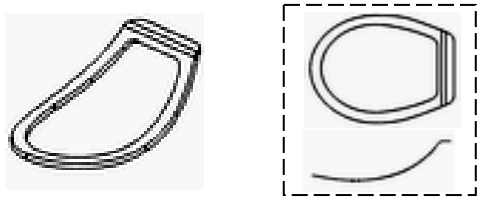
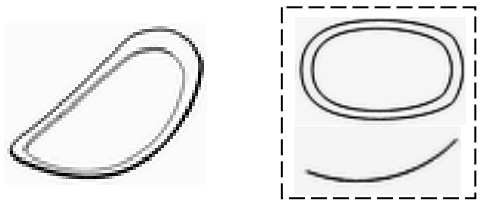
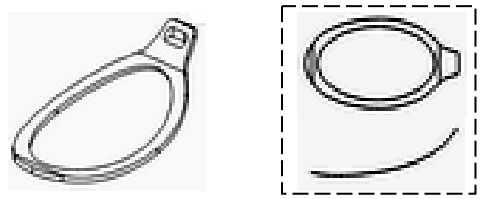
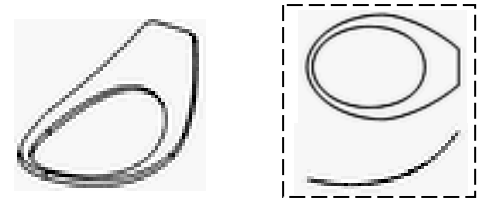
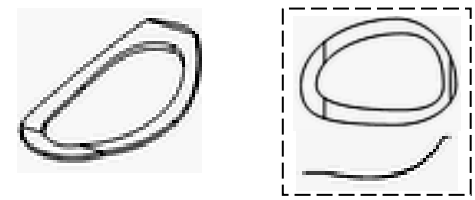
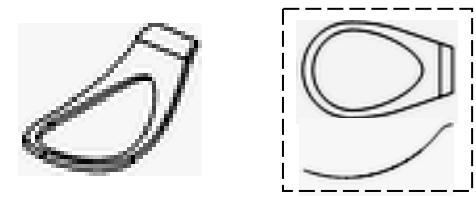
ภาพที่ 40 การสร้าง Surface ด้วยการ Trim (ภาพ ก) และโดยการ Merge (ภาพ ข)

จากลำดับการสร้างโซลิตโมเดลของรูปทรงเฉพาะแบบของถ้วยตา สามารถสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของถ้วยตา โดยตารางที่ 3 แสดงผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของ**ส่วนฐาน**ของถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำทุกรูปแบบ ตารางที่ 4 ของ**กรอบลำตัว** ตารางที่ 5 ของ**เลนส์** ตารางที่ 6 ของ**ชิ้นหู** ตารางที่ 7 ของ**ชิ้นจมูก** และ ตารางที่ 8 ของรูปทรงตัวกึ่งกลาง

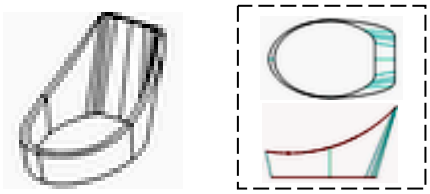
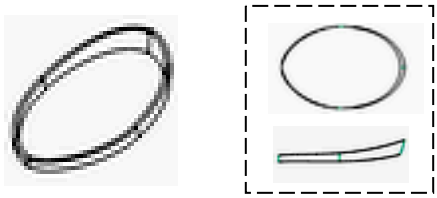
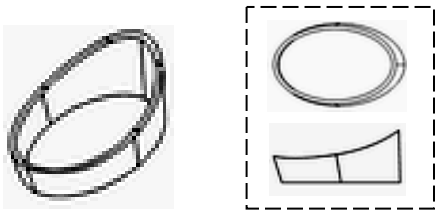
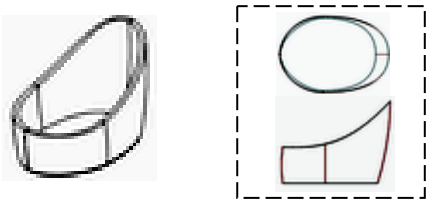
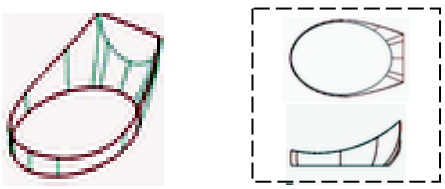
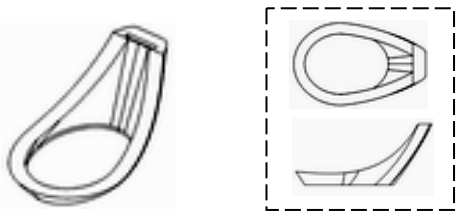
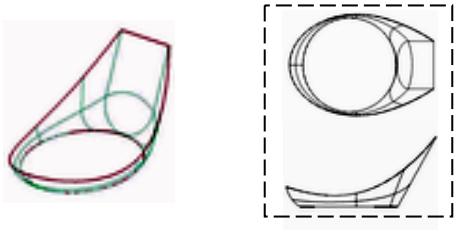
ตารางที่ 3 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของส่วนฐาน

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของส่วนฐาน
B1	89 DL LJ-005	
B2	903, 931, 933 1009 F-3G JR-1009 LJ-003 NS-405 YA-4700	

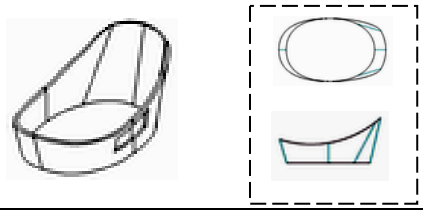
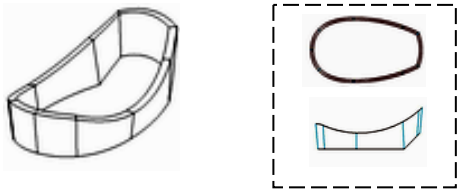
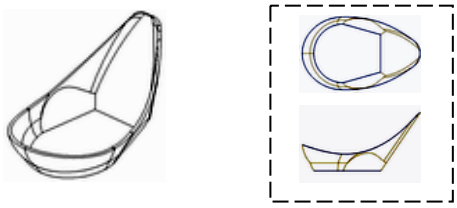
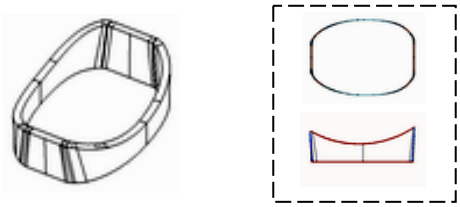
ตารางที่ 3 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของส่วนฐาน (ต่อ)

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของส่วนฐาน
B3	905 2005, 2006, 2008 3016, 3018 3019, 3020 JR-1005, JR-1006	
B4	ABB-1 ABB-2	
B5	951 F-1	
B6	981	
B7	982	
B8	3017	
B9	LJ-002	
B10	89 BL 89 mini	ไม่มี ส่วนฐาน

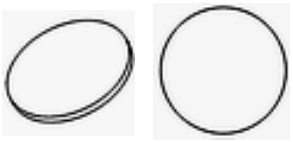
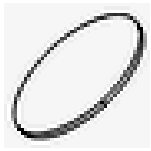
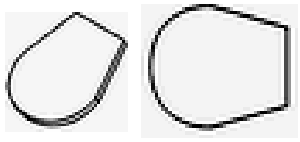
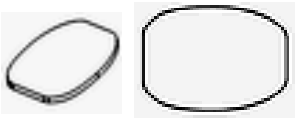
ตารางที่ 4 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของกรอบลำตัว

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของกรอบลำตัว
F1	ABB-1 ABB-2	
F2	2006 3017 3018 3020	
F3	905 981, 982 JR-1005, JR-1006 LJ-002	
F4	3016 3019	
F5	1009 JR-1009	
F6	89 BL 89 mini 931 933 YA-4700	
F7	903	

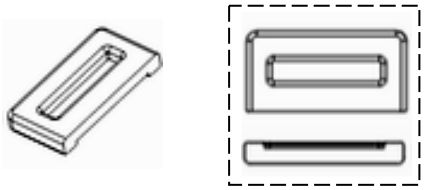
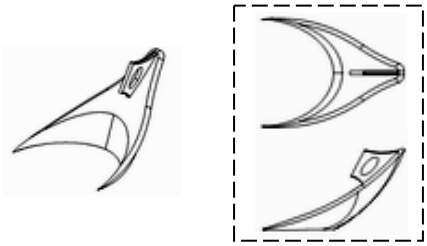
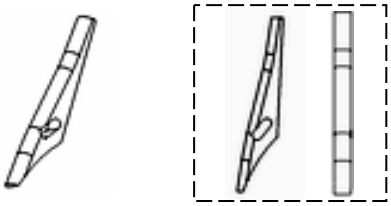
ตารางที่ 4 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของกรอบลำตัว (ต่อ)

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของกรอบลำตัว
F8	F-1	
F9	2005	เป็นรูปทรงเฉพาะแบบมีลักษณะซับซ้อนคือ ส่วนลำตัวเป็นลักษณะกึ่งสองชั้นเชื่อมติดกับ ชิ้นหู ซึ่งเรียงออกมาหลายชั้นหลายระดับ
F10	NS-405	เป็นรูปทรงเฉพาะแบบ มีลักษณะวงรีโค้งเรียวยาวแหลมด้านหนึ่ง ตอนปลายมีลักษณะเป็นสอง ชั้น และมีชิ้นส่วนเชื่อมระหว่างชั้นทั้งสอง อีกปลายมีชิ้นจมูก โค้งประสานเป็นส่วนเดียวกัน
F11	LJ-003	
F12	LJ-005	
F13	951	ส่วนลำตัวเชื่อมกับเลนส์และชิ้นหูโดยเลนส์ เป็นรูปหยดน้ำ ชิ้นหูเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูอีกชั้นยื่นออกจากส่วนลำตัว
F14	89 DL	
F15	2008	เป็นรูปทรงเฉพาะแบบมีลักษณะเชื่อมส่วน ลำตัว และชิ้นหู เข้าไว้ด้วยกัน โดยส่วนชิ้นหูจะยื่นเรียวออกมาเป็นลักษณะสองชั้น
F16	F-3G	เป็นรูปทรงของลำตัวแบบธรรมดาและมีเนื้อบางส่วนตัดหายไปเพื่อทำเป็นชิ้นหู

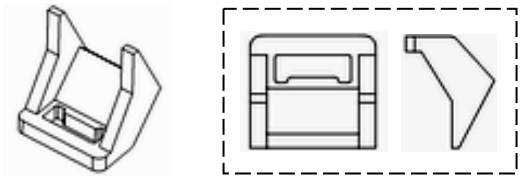
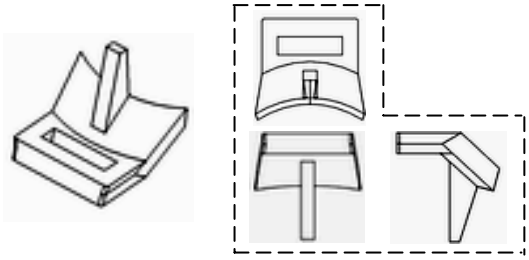
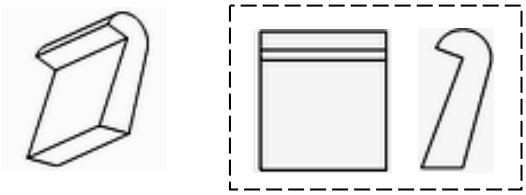
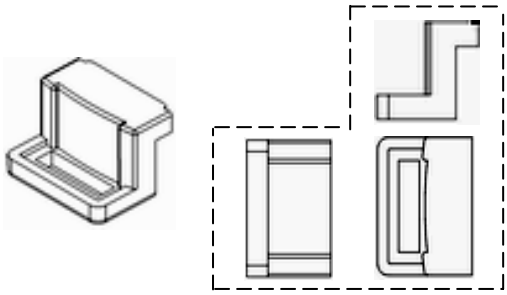
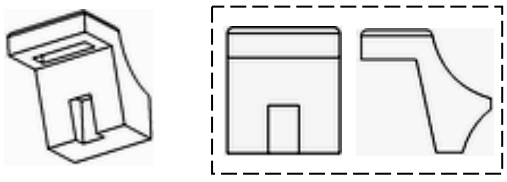
ตารางที่ 5 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของเลนส์

กลุ่ม	รุ่น	ลักษณะรูปทรง	ภาพแสดง
L1	903 LJ-002	วงกลม	
L2	F-1 2005 NS-405	วงรีนูน	
L3	89 mini, 89 BL 905, 931, 933 981, 982, 1009 2006, 2008 3016, 3017, 3018 3019, 3020 F-3G JR-1005, JR-1006 JR-1009 YA-4700	วงรีแบน	
L4	ABB-1 ABB-2 LJ-003	วงรีแบน ปลายด้านหนึ่งตัด	
L5	LJ-005	ด้านหนึ่งวงกลม ด้านหนึ่งสี่เหลี่ยมคางหมู	
L6	89 DL	วงรีแบน ปลายตัดทั้งสองข้าง	
L7	951	ไม่มี Lens	-

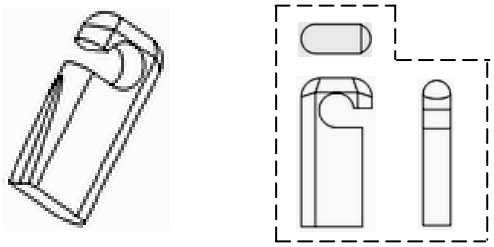
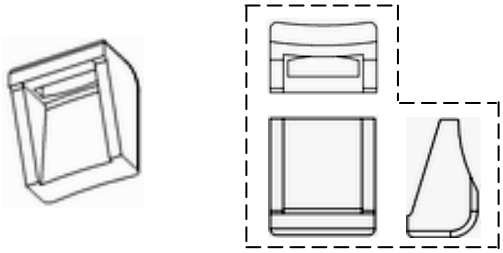
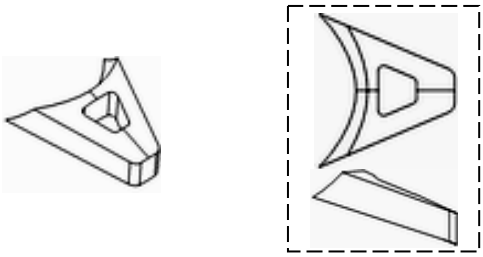
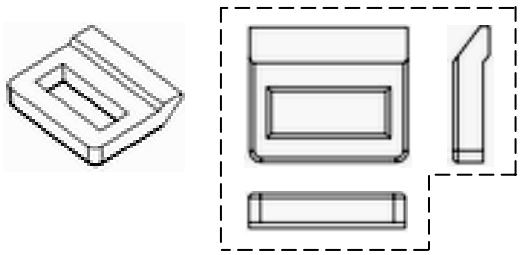
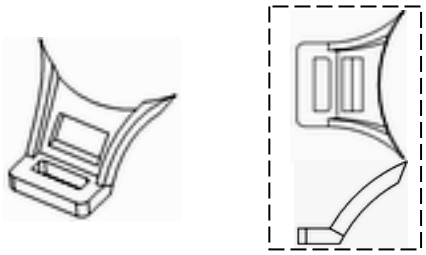
ตารางที่ 6 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของชิ้นหู

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของชิ้นหู
N1	ABB-1 ABB-2	
N2	JR-1005 JR-1006	
N3	905	
N4	89 BL, 89 DL, 89 mini 903, 981, 982 931, 933, 951 1009 2006, 2005, 2008 3016, 3017, 3018 3019, 3020 F-1 F-3G JR-1009 LJ-002, LJ-003, LJ-005 NS-405 YA-4700	ไม่มี

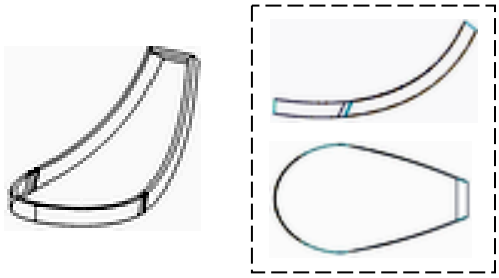
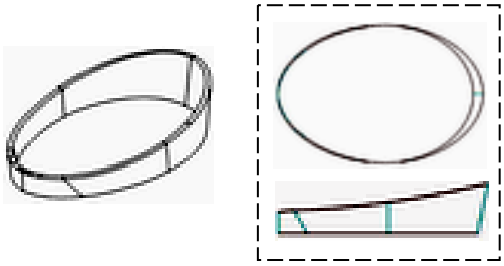
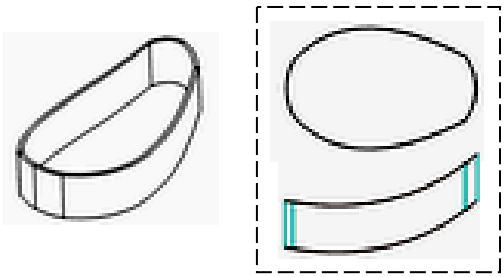
ตารางที่ 7 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของชิ้นจมูก

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของชิ้นจมูก
E1	LJ-002 LJ-005	
E2	981, 982 1009 3016 JR-1005, JR-1006 JR-1009	
E3	2006, 2008 3017, 3018 3020	
E4	2005 F-3G	ลักษณะเรียวรับกับลำตัว เอียงเป็นมุม 45 องศา ปลายมีขนาดเล็กลงและหักเป็นมุมฉาก ด้านบนบริเวณชิ้นหูเป็นรู
E5	ABB-1 ABB-2	
E6	903	

ตารางที่ 7 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของชิ้นจมูก (ต่อ)

กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงเฉพาะแบบของชิ้นจมูก
E7	905	
E8	951	
E9	3019	
E10	89 DL	
E11	LJ-003	
E12	89 BL, 89 mini 931, 933 YA-4700 F-1 NS-405	ไม่มี

ตารางที่ 8 ผลการสร้างและรวบรวมส่วนประกอบของตัวกึ่งกลาง (Middle)

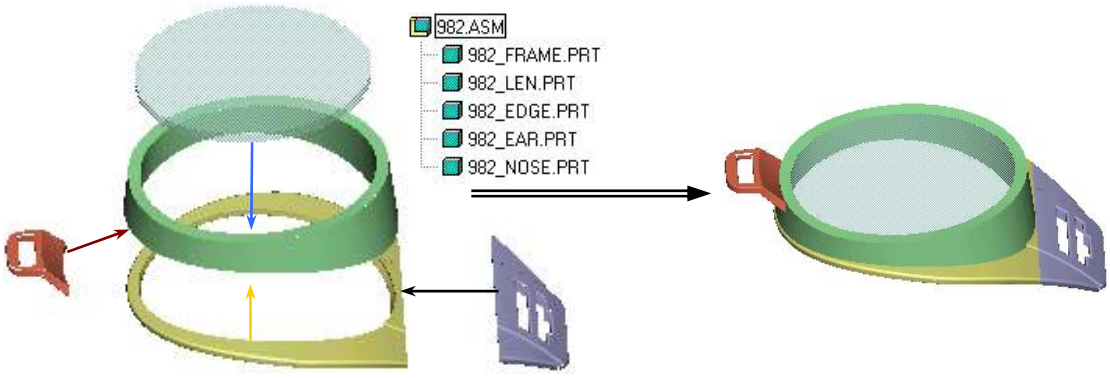
กลุ่ม	รุ่น	รูปทรงรูปทรงเฉพาะแบบของ
M1	931, 933 YA-4700 NS-405	
M2	2005, 2006, 2008 3017, 3018, 3020 F-3G	
M3	951	
M4	89BL, 89DL, 89mini 903, 905, 981, 982 1009 ABB-1, ABB-2 F-1 LJ-002, LJ-003 LJ-005 3016, 3019 JR-1005 JR-1006, JR-1009	ไม่มี

1.3 ผลการออกแบบถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ

ส่วนประกอบของถ้วยตา ได้ออกแบบเป็นโซลิตโมเดล เก็บอยู่ในรูปของ ไฟล์ชิ้นส่วน (Part File) ไฟล์ชิ้นส่วนเหล่านี้ สามารถนำมาประกอบรวมกันเป็นถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ ของรุ่นที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ การประกอบส่วยต่าง ๆ รวมกันเป็นถ้วยตาได้ทำใน โหมดการประกอบ (Assembly) ของซอฟท์แวร์โซลิตโมเดลที่ใช้ เนื่องจากไฟล์ชิ้นส่วนเหล่านี้ เป็นพาราเมตริก (Parametric) จึงทำให้สามารถดัดแปลงแก้ไขให้เหมาะสมกับการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำรุ่นใหม่ ๆ ให้ได้ขนาดและสัดส่วนตามต้องการได้ ตารางที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของกรอบลำตัวกับส่วนประกอบอื่น (ส่วนฐาน กรอบลำตัว เลนส์ ฯลฯ) ของถ้วยตารุ่นต่าง ๆ ที่มีรูปทรงใกล้เคียงกันที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ด้วยกันได้ เนื่องจากส่วนประกอบของถ้วยตา สร้างขึ้นโดยอาศัยขนาดการวัดขนาดจากชิ้นงานจริงด้วย Vernier (ภาพที่ 14) และเครื่องมือวัดพื้นฐาน ดังนั้น ขนาดต่าง ๆ ของชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนจึงมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดและการประมาณด้วยสายตา นอกจากนี้ ขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแว่นตาว่ายน้ำมีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 10 มม ของชิ้นจมูก และไม่เกิน 60 มม ของความยาวของถ้วยตา) ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนของขนาดของ ไฟล์ชิ้นส่วนของส่วนประกอบของถ้วยตาตามสรุปในตารางที่ 9 อยู่ในช่วง 1% ถึง 10%

1.3.1 ผลการประกอบเป็นถ้วยตา

ส่วนประกอบของถ้วยตา (หรือ ฟีเจอร์ของถ้วยตา) ที่เป็น ไฟล์ชิ้นส่วน ต่างๆ จากตารางที่ 9 ได้นำมาประกอบเป็นถ้วยตารุ่นต่างๆ ได้ ภาพที่ 41 เป็นตัวอย่างของผลการใช้ฟีเจอร์มาช่วยในการออกแบบถ้วยตาว่ายน้ำรุ่น 982 ในการประกอบถ้วยตารุ่น 982 นี้ เริ่มจากกรอบลำตัวเป็นฟีเจอร์เริ่มต้น แล้วนำฟีเจอร์ที่เหลือ ซึ่งได้แก่ ส่วนฐาน เลนส์ และชิ้นจมูก มาประกอบเข้ากับกรอบลำตัว ลำดับการประกอบของทั้ง 3 ฟีเจอร์เหล่านี้ สามารถใช้ฟีเจอร์ใดก่อนหลังได้ ลำดับการประกอบสุดท้ายได้แก่การนำ ชิ้นหูไปประกอบติดกับส่วนฐาน (หรือ EDGE)



ภาพที่ 41 ผลการใช้ ฟีเจอร์ มาช่วยในการออกแบบถ้วยตาว่ายน้ำรุ่น 982

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ของกรอบลำตัวกับส่วนประกอบอื่น

		กลุ่มกรอบลำตัว (Frame)															
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
กลุ่มฐาน Base	B1	-	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y	y	y
	B2	y	-	-	-	y	y	y	y	-	y	y	-	-	y	-	-
	B3	-	y	y	y	-	-	-	-	y	-	-	y	-	-	y	y
	B4	y	-	-	-	y	y	y	y	-	y	y	-	-	y	-	-
	B5	y	-	-	-	y	y	y	y	-	y	y	-	y	y	-	-
	B6	-	y	y	y	-	-	-	-	y	-	-	y	-	-	y	y
	B7	-	y	y	y	-	-	-	-	y	-	-	y	-	-	y	y
	B8	-	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B9	-	y	y	y	-	-	-	-	y	--	--	y	-	-	y	y
กลุ่มเลนส์ Lens	L1	-	-	y	-	-	-	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L2	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	y	y
	L3	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	y	y
	L4	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y	-	-	-	-
	L5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y	-	-	-	-
	L6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y	-	-
กลุ่มตัวจมูก Nose	N1	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N2	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N3	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N4	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N5	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N6	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N7	y	-	y	y	y	-	-	-	-	-	y	-	y	y	y	-
	N8	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N9	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N10	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
	N11	y	y	y	y	y	-	y	y	y	-	y	y	y	y	y	y
กลุ่ม Ear	E1	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y	-	-	-	-
	E2	-	y	y	-	-	-	-	y	y	-	-	-	-	-	-	-
	E3	-	-	y	-	-	-	y	-	-	-	-	y	-	y	-	-

สำหรับการอ้างอิงการประกอบรวมกันเป็นถ้วยตาที่สมบูรณ์ สามารถใช้ datum plane ต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ให้แล้วในแต่ละไฟล์ชิ้นส่วนของส่วนประกอบของถ้วย ซึ่งจะช่วยให้การประกอบทำได้ง่าย สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น คำสั่งที่ใช้ในการประกอบ ได้แก่ คำสั่ง mate, align, mate offset และ align offset.

1.3.2 ตัวอย่างของการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่

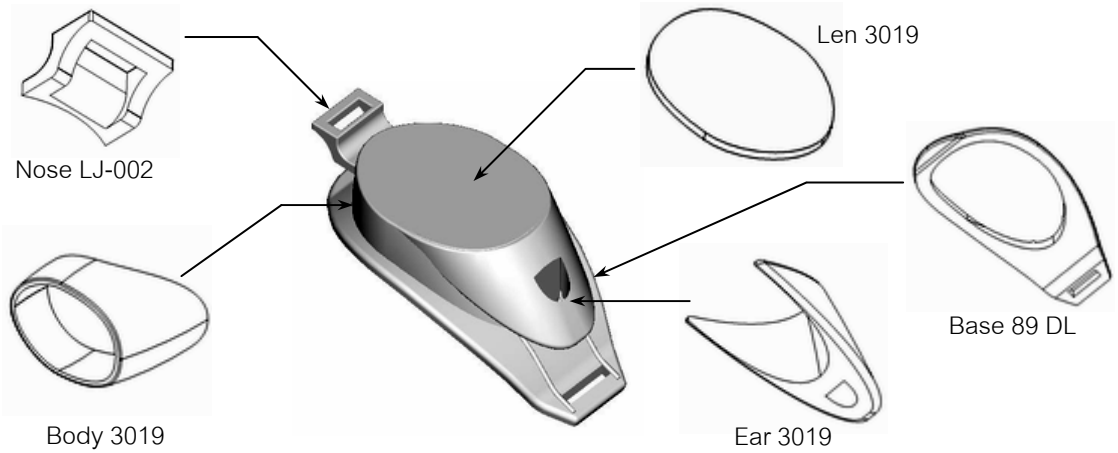
การประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำต่างรุ่นกัน มาประกอบเข้าด้วยกัน แล้วทำการปรับแต่งให้ได้ขนาดที่เหมาะสมพอดีกัน หลักการสร้างโมเดลใหม่ เริ่มจากการประกอบชิ้นส่วนของกรอบลำตัวและส่วนฐานก่อน ทำการปรับความโค้งและรูปทรงให้เข้ากันได้พอดีกัน แล้วนำชิ้นส่วนที่เหลือมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้ตารางที่ 9 (ความสัมพันธ์ของกรอบลำตัวกับส่วนประกอบอื่น) เป็นตารางช่วยในการเลือกชิ้นส่วนที่จะมาประกอบเข้าด้วยกันได้ ชิ้นส่วนทุกชิ้นสามารถปรับขนาดความโค้งและรูปทรงใหม่ให้เข้ากับชิ้นส่วนต่างๆ กันได้

ตัวอย่างผลการออกแบบถ้วยแว่นตารุ่นใหม่ ได้แสดงในภาพที่ 42 ของถ้วยแว่นตารุ่น New Model 01 ซึ่งออกแบบโดยใช้ชิ้นส่วนของแว่นตารุ่นต่างๆ โดยมี กรอบลำตัว เลนส์ และชิ้นหูจากรุ่น 3019 ส่วนฐานจากรุ่น 89 DL และชิ้นจมูกจากรุ่น LJ-002

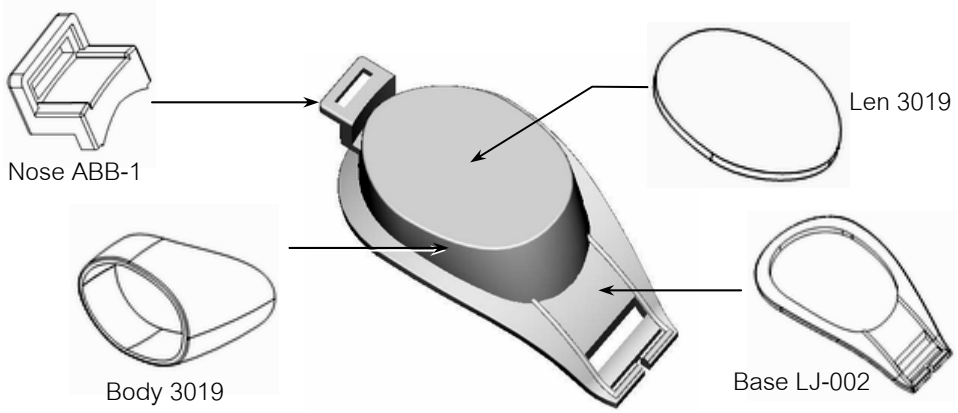
ภาพที่ 43 แสดงผลการออกแบบถ้วยแว่นตารุ่น New Model 02 ซึ่งออกแบบโดยใช้ชิ้นส่วนของกรอบลำตัวและเลนส์จากรุ่น 3019 ส่วนฐานจากรุ่น LJ-002 และชิ้นจมูกจากรุ่น ABB-1

ภาพที่ 44 แสดงผลการออกแบบถ้วยแว่นตารุ่น New Model 03 ที่ออกแบบโดยใช้ชิ้นส่วนฐานของรุ่นและเลนส์จากรุ่น 2006 ใช้ตัวกึ่งกลาง (Middle) ของรุ่น YA-4700 เป็นกรอบลำตัว และชิ้นจมูกจากรุ่น ABB-1

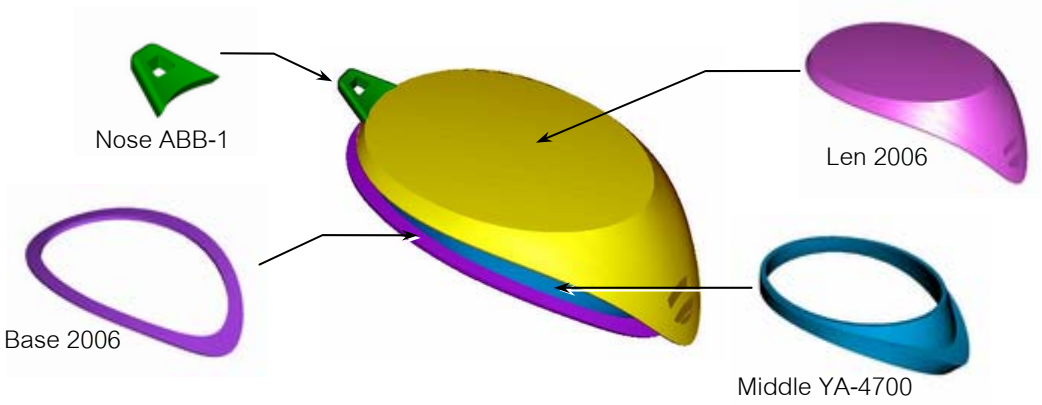
ภาพที่ 45 แสดงผลการออกแบบถ้วยแว่นตารุ่น New Model 04 ซึ่งออกแบบโดยใช้ชิ้นส่วนของกรอบลำตัว ฐาน ตัวกึ่งกลาง และชิ้นหูจากรุ่น JR-1006 เลนส์จากรุ่น F-1 และชิ้นจมูกจากรุ่น JR-1005



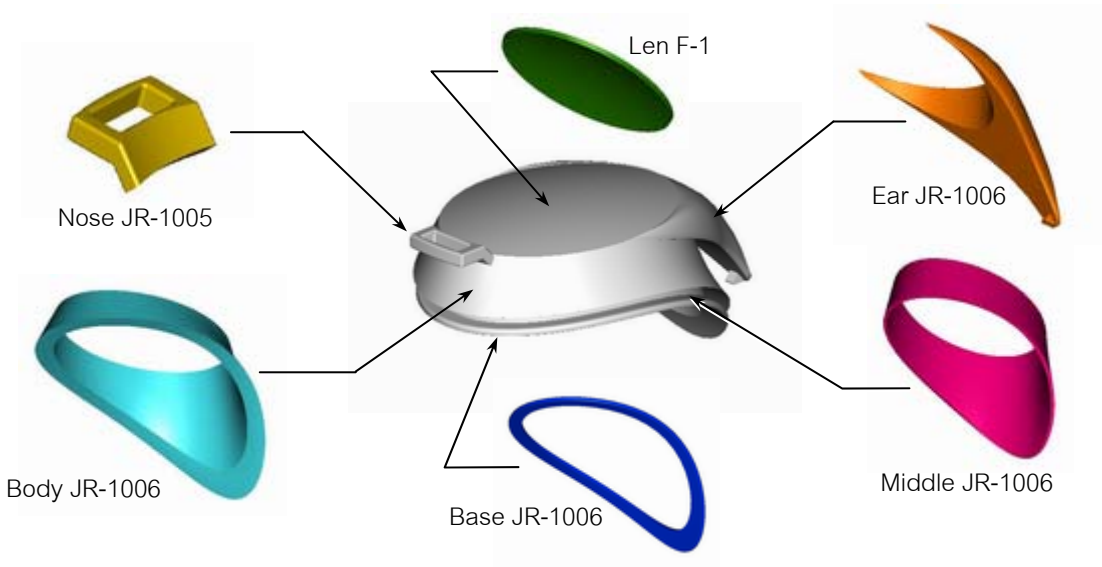
ภาพที่ 42 ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 01



ภาพที่ 43 ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 02



ภาพที่ 44 ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 03



ภาพที่ 45 ผลการออกแบบถ้วยตารุ่นใหม่ รุ่น New Model 04

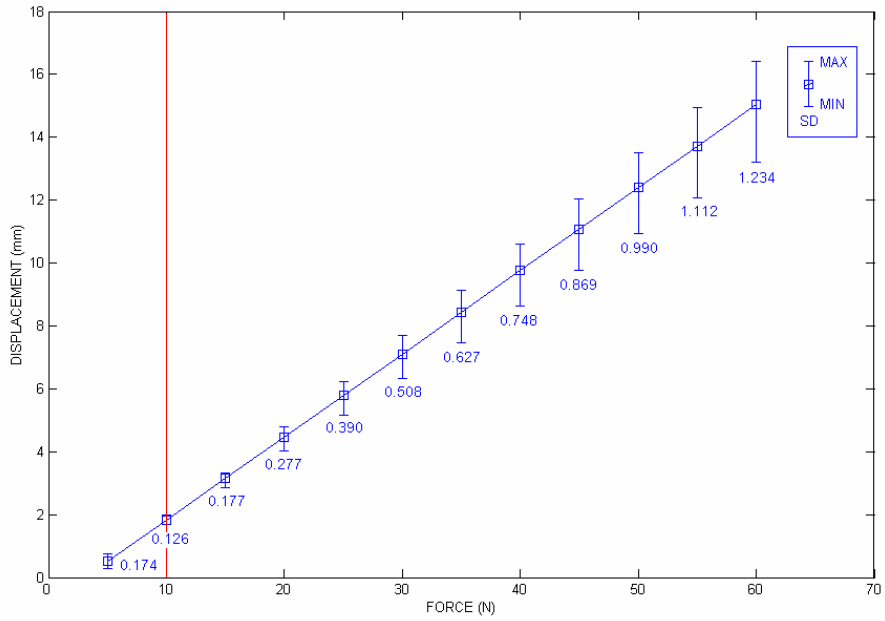
2. ผลการทดสอบทางกลตามมาตรฐานการทดสอบแว่นตาว่ายน้ำ

2.1 ผลการทดสอบทางกลของการดึงชิ้นจมูก

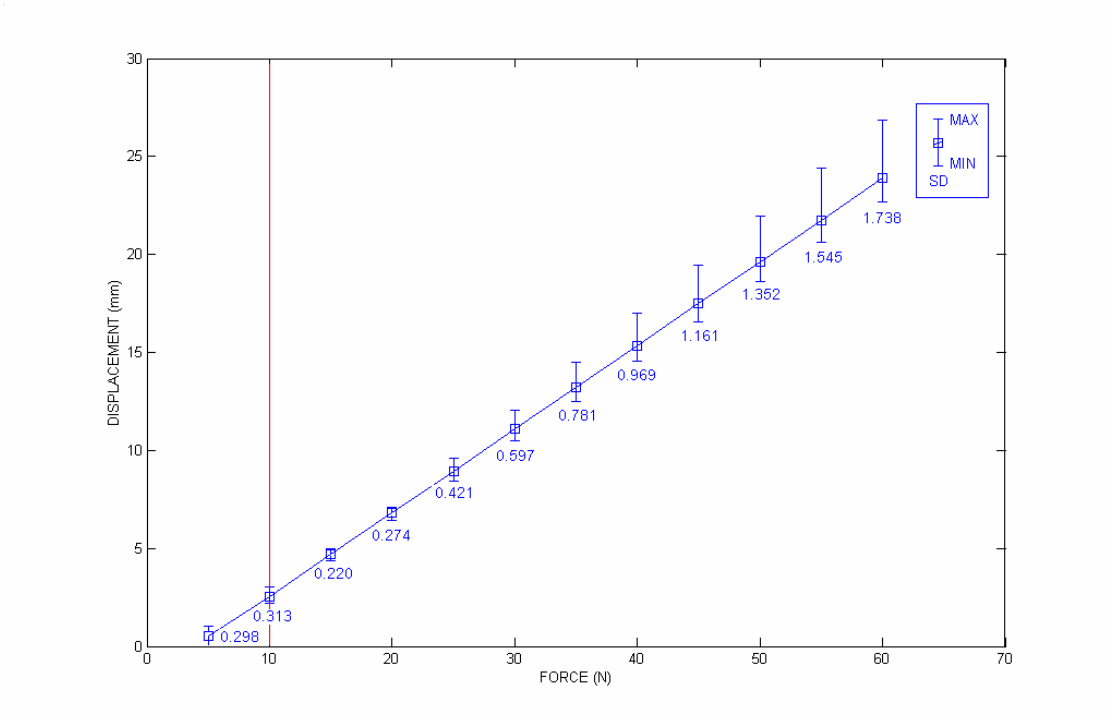
เนื่องด้วยการทดสอบการดึงของชิ้นจมูกตามมาตรฐาน BS5883:1996 กำหนดให้ใช้แรงทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 N±0.5 N เท่านั้น จึงไม่เหมาะสมในการนำผลทดสอบจากการดึงที่ได้มาเปรียบเทียบความแม่นยำของ FEA ในการวิจัยนี้ จึงได้ทดสอบที่แรงดึงตั้งแต่ 5 N ถึง 60 N แล้วบันทึกค่าแรงดึงและระยะยืดของชิ้นจมูกทุกๆ 5 N รูปแบบของชิ้นจมูกที่ได้ทดสอบมี 2 รุ่น คือ รุ่น J-1 และ J-10 จำนวนการทดสอบรุ่นละ 5 ชิ้น

ภาพที่ 46 และ 47 แสดงเส้นกราฟของค่าเฉลี่ย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation หรือ SD เป็นตัวเลขระบุใต้เส้นกราฟ) ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดจากการทดสอบ จำนวน 5 ครั้ง (1 ชิ้นต่อ 1 การทดสอบ) ของระยะยืด หรือ Displacement (แสดงค่าในแกนตั้ง) และแรงดึง หรือ Force (แสดงค่าตามแกนนอน) ของชิ้นจมูกรุ่น J-1 (ภาพที่ 46) และ J-10 (ภาพที่ 47) ค่า Offset ที่แรงดึงต่ำเป็นผลจากความเสียดทานของกลไกและอุปกรณ์วัดระยะของชุดทดสอบ

ผลการทดสอบจากภาพที่ 46 และ 47 แสดงความสัมพันธ์ของระยะยืดและแรงดึงเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในช่วงแรงดึงทดสอบจาก 5 N ถึง 60 N โดยมีค่าความเบี่ยงเบนน้อยของระยะยืดที่แรงดึงต่ำ และเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดึงเพิ่ม ที่แรงดึงทดสอบสูงสุด (60 N) ไม่พบการฉีกขาดของชิ้นจมูกทั้ง 10 ชิ้น ชิ้นจมูกรุ่น J1 จะเริ่มขาดที่แรงดึงเฉลี่ย 75 N และ รุ่น J10 ที่ 72 N



ภาพที่ 46 ระยะยืดจากการทดสอบทางกลของการดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-1

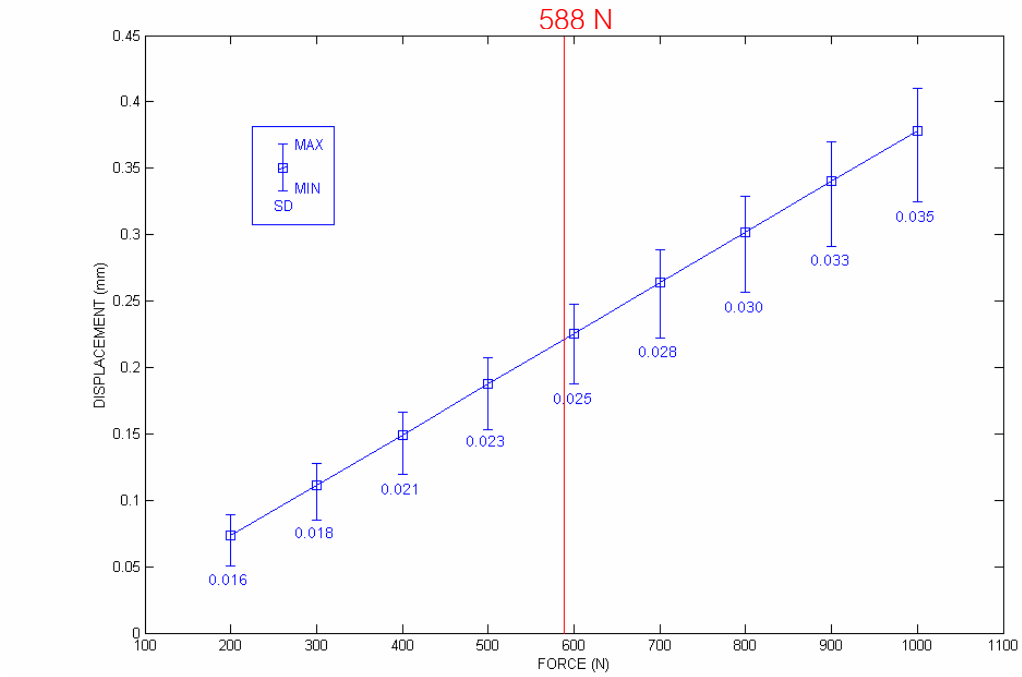


ภาพที่ 47 ระยะยืดจากการทดสอบทางกลของการดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-10

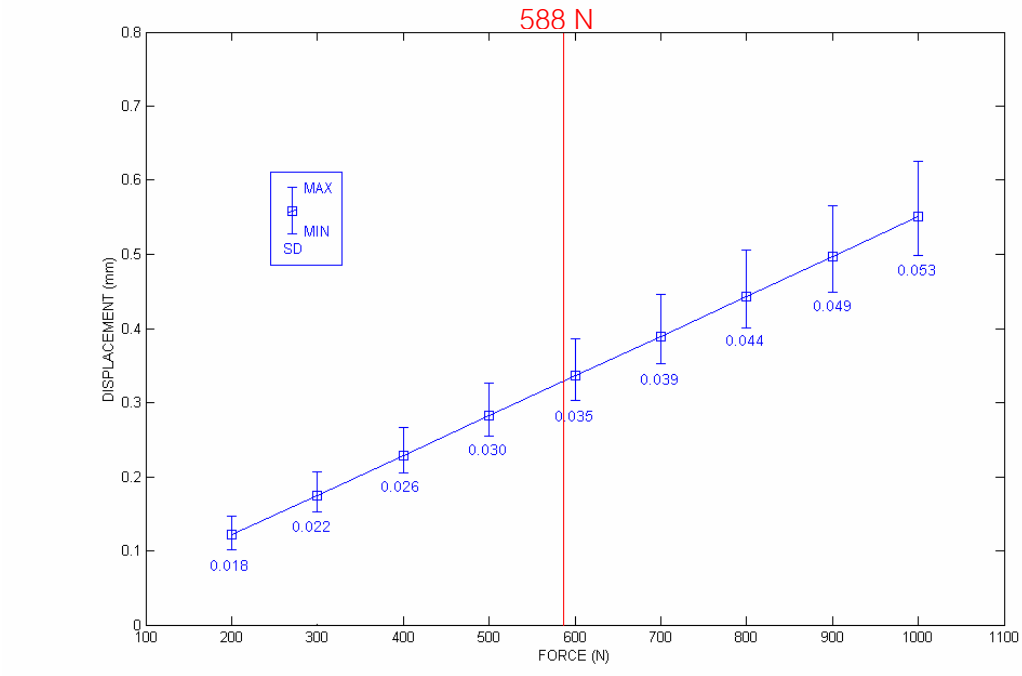
2.2 ผลการทดสอบทางกลของการอัดถ้วยตา

ในการทดสอบการอัดของถ้วยตาเพื่อตรวจสอบความเสียหายตามมาตรฐาน BS5883: -1996 กำหนดให้ใช้แรงอัดทดสอบที่ค่าเท่ากับ 588 N ± 2 N เพียงค่าเดียว จึงไม่เหมาะสมในการนำผลมาเปรียบเทียบกับผลของ FEA ได้ การทดสอบนี้จึงใช้แรงอัดตั้งแต่ 0 N ถึง 1000 N แล้วบันทึกค่าระยะยุบตัว (Displacement) และแรงอัด (Compressive Force) โดยเริ่มบันทึกที่ 200 N และเพิ่มขึ้นทุกๆ 100 N

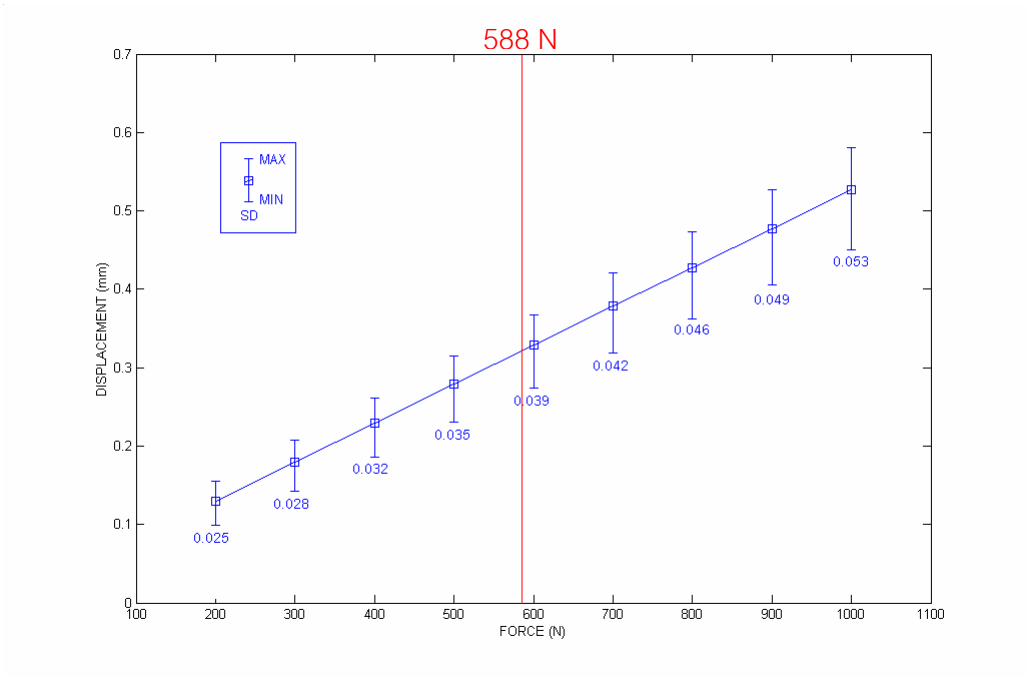
ภาพที่ 48 ถึง 50 แสดงกราฟของระยะยุบตัวและแรงอัด ของถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ จำนวนถ้วยตาที่ใช้ทดสอบของแต่ละรุ่น คือ 5 ชิ้นทดสอบ จากผลการทดลองพบว่าถ้วยตาทั้ง 15 ชิ้น ไม่เกิดการแตกหักที่แรงอัดทดสอบสูงสุดที่ 1000 N โดยความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวและแรงอัดจากผลการทดสอบนี้ ได้ผลเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงแรงอัดทดสอบจาก 200 N ถึง 1000 N ของแว่นตาทั้ง 3 รุ่น ในการทดสอบนี้ได้ทำการ Pre-load โดยให้ถ้วยตาแนบสนิทกับฐานรองถ้วยตาก่อนบันทึกค่าของระยะยุบตัวจึงเป็นผลให้ค่า Offset ของผลการทดสอบต่ำ



ภาพที่ 48 ระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น JR-1006 จากการทดสอบทางกลของการอัด



ภาพที่ 49 ระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 2006 จากการทดสอบทางกลของการอัด



ภาพที่ 50 ระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น 981 จากการทดสอบทางกลของการอัด

2.3 ผลการทดสอบทางกลของการกระแทกเลนส์ถ้วยตา

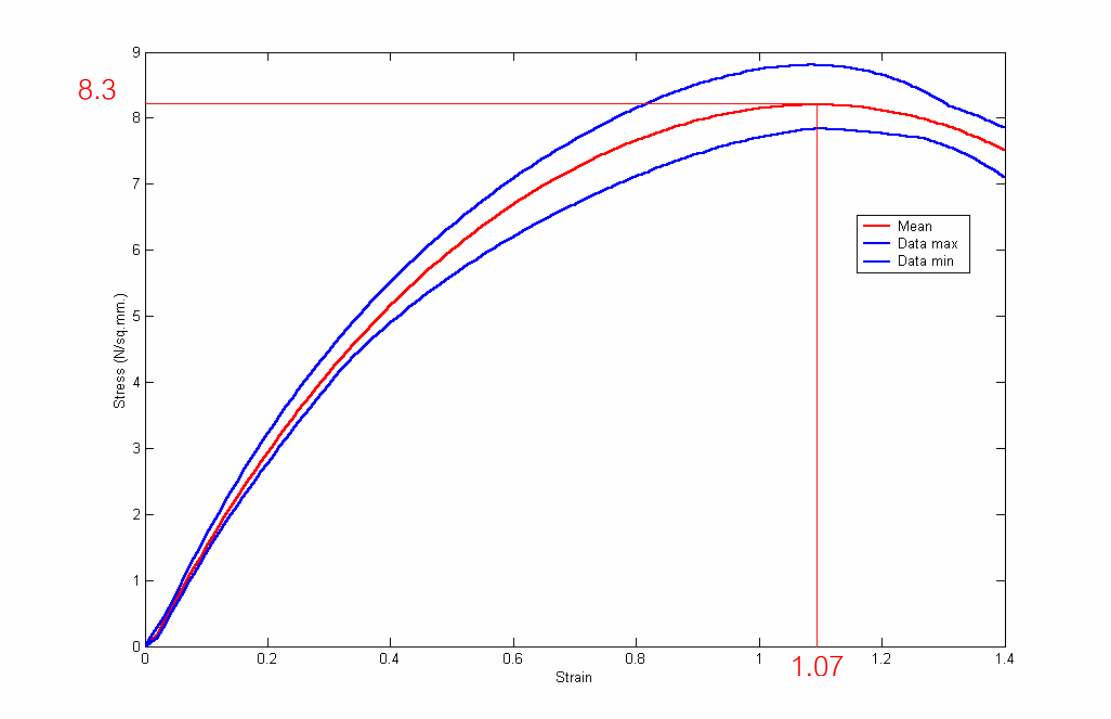
การทดสอบทางกลของการกระแทกบนผิวเลนส์ถ้วยตา ได้ทำตามมาตรฐาน BS5883: -1996 โดยทำการทดสอบจาก ถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น JR-1006, รุ่น 2006 และ รุ่น 981 จำนวนรุ่นละ 5 ชิ้น ผลการทดสอบนี้ ไม่ปรากฏความเสียหาย (แตกหรือรอยร้าว) หรือเกิดการบุบยุบบนผิวเลนส์ ที่ความสูงของการปล่อยลูกบอลโลหะตกที่ 0.7, 1, 1.3 และ 1.6 เมตร (มาตรฐาน BS5883:1996 กำหนดความสูงที่ 1.3 เมตร)

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

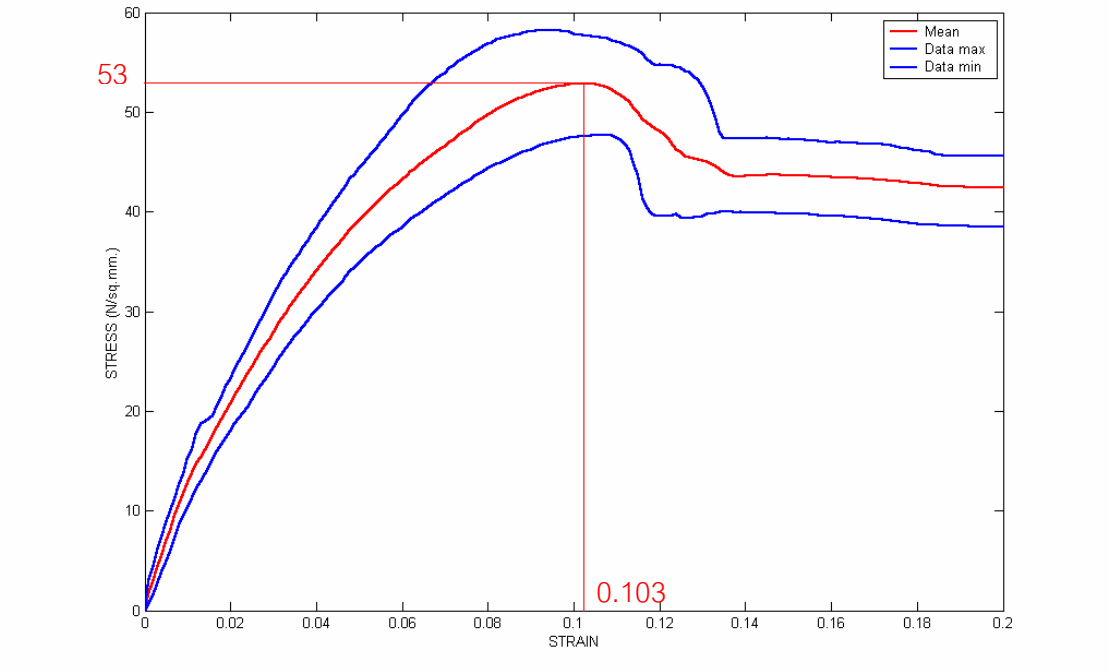
การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุ ใช้การทดสอบแบบการดึง (Tensile Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ ความเค้นและความเครียด (Stress – Strain diagram หรือ σ - ε diagram) ผลการทดสอบนี้ได้แสดงในภาพที่ 51 และ 52 โดยภาพที่ 51 เป็นผลการทดสอบของ PVC ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำชิ้นจมูก รุ่น J-1 และ J-10 และภาพที่ 52 เป็นผลการทดสอบของ PC ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำ ถ้วยตา รุ่น JR-1006, รุ่น 2006 และรุ่น 981

ตารางที่ 10 สรุปสมการของความสัมพันธ์ของความเค้น (σ) และความเครียด (ε) ของกราฟของค่าเฉลี่ยในภาพที่ 51 และ 52 ที่ช่วงค่าความเครียด 0 ถึง 0.2, 0 ถึง 0.5 และ 0 ถึง 1

สำหรับ PVC และช่วง 0 ถึง 0.02, 0 ถึง 0.05 และ 0 ถึง 0.1 สำหรับ PC สมการในตารางที่ 10 ทั้งสมการเส้นตรง (Linear) และสมการ Quadratic คำนวณโดยใช้วิธี Least-Square



ภาพที่ 51 ไดอะแกรมความสัมพันธ์ ระหว่าง σ - ε ของ PVC



ภาพที่ 52 ไดอะแกรมความสัมพันธ์ ระหว่าง σ - ε ของ PC

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ของ σ - ε จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของ PVC และ PC

PVC			PC		
ε	Linear	Quadratic	ε	Linear	Quadratic
0 –0.2	σ=15.256ε	σ= -5.709ε^2+16.398ε	0-0.02	σ=1019.4ε	σ=-24124ε^2+1501.9ε
0 – 0.5	σ=12.205ε	σ= -10.002ε^2+17.21ε	0-0.05	σ=744.26ε	σ=-7503.6ε^2+1119.4ε
0 - 1	σ=8.0422ε	σ=-7.95ε^2+15.992ε	0-0.1	σ=494.56ε	σ=-4692.2ε^2+963.78ε

4. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบแรงดึงชิ้นจมูก

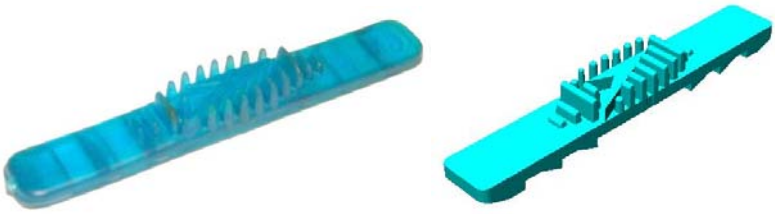
4.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM ของชิ้นจมูก

ผลการสร้างแบบจำลองโซลิตโมเดล โดยใช้ Pro/ENGINEER ของชิ้นจมูกของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น J-1 และ J-10 ได้แสดงเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริงในภาพที่ 53 และ 54 ตามลำดับ โซลิตโมเดลที่ได้เหล่านี้ได้นำไปใช้สร้างเป็นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือ Finite Element Model (FEM) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ FEA ต่อไป ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของชิ้นจมูกทั้งสองได้แสดงในภาพผนวกที่ 2 และ 3

เนื่องด้วยรูปทรงของตัวชิ้นจมูกมีความซับซ้อนมาก ไม่สามารถใช้ชิ้นประกอบ หรือเอลิเมนต์ (Element) แบบผนังบาง ได้ เอลิเมนต์ที่ใช้จึงกำหนดเป็นรูปทรงโซลิต 3 มิติ แบบ Tetrahedral ซึ่งกำหนดได้ในโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows ดังแสดงในภาพที่ 55ก และ 55ข ตามลำดับ โดย รุ่น J-1 ประกอบด้วย 13,915 โหนด (Node) และ 7,630 ชิ้นประกอบ และ รุ่น J-10 ประกอบด้วย 7,045 โหนด และ 3,851 ชิ้นประกอบ ภาพที่ 56 และ 57 แสดง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และทิศทางของแรงดึง หรือโหลด ของชิ้นจมูก รุ่น J-1 และ J-10 ตามลำดับ คุณสมบัติของวัสดุใช้คุณสมบัติของ PVC ตามผลทดสอบในตารางที่ 10 โดยใช้ค่า E ที่ได้โดยการเฉลี่ยค่า E จากสมการเส้นตรงของช่วง ε ระหว่าง 0 ถึง 0.2 และ 0 และ 0.5 โดยให้ค่าเท่ากับ 13.7 N/mm^2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ของชิ้นจมูกได้สรุปไว้ในภาคผนวกที่ 4

4.2 ผล FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูก

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูก ภายใต้การทดสอบการดึง ที่แรงดึง 10 N ได้แสดงในภาพที่ 58 และ 59 โดยในภาพที่ 58 แสดงลักษณะการยืดตัวของชิ้นจมูกเป็นระดับชั้นสีของระยะยืด ของชิ้นจมูกรุ่น J-1 และภาพที่ 59 ของชิ้นจมูกรุ่น J-10

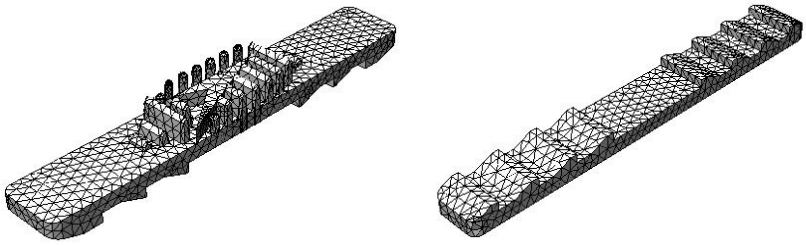


(ก) ชิ้นงานจริง (ข) โซลิตโมเดล

ภาพที่ 53 ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิตโมเดล (ภาพ ข) ของชิ้นจมูกรุ่น J-1

(ก) ชิ้นงานจริง (ข) โซลิตโมเดล

ภาพที่ 54 ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิตโมเดล (ภาพ ข) ของชิ้นจมูกรุ่น J-10



(ก) รุ่น J-1 (ข) รุ่น J-10

ภาพที่ 55 ลักษณะการแบ่งชิ้นประกอบของแบบจำลองชิ้นจมูก รุ่น J-1 และ รุ่น J-10

ผลการวิเคราะห์ FEA ของระยะยืดทุกๆ 5 N เริ่มจากแรงดึงเท่ากับ 5 N ถึง 60 N ของ รุ่น J-1 และ J-10 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล (ภาพที่ 46 และ 47) ได้แสดงเป็นกราฟใน ภาพที่ 60 และ 61 ของชิ้นจมูก รุ่น J-1 และ J-10 ตามลำดับ และตารางที่ 11 สรุปความคลาดเคลื่อนของผลจาก FEA เปรียบเทียบกับการทดสอบทางกลที่ทุกแรงดึงทดสอบของชิ้นจมูกทั้ง 2 รุ่น โดยค่าความคลาดเคลื่อนคำนวณจาก

$$e = \Delta_{EXP} - \Delta_{FEA} \quad (1)$$

โดย Δ_{EXP} คือ ค่าระยะยืดจากผลการทดสอบทางกล

Δ_{FEA} คือ ค่าระยะยืดจากผลการวิเคราะห์ FEA

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (e_P) คำนวณจาก

$$e_P = \frac{\Delta_{EXP} - \Delta_{FEA}}{\Delta_{EXP}} \cdot 100\% \quad (2)$$

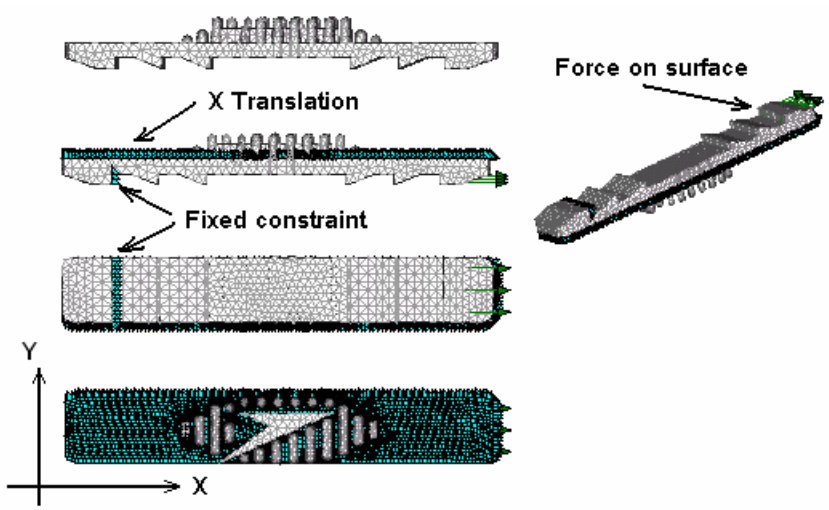
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน e_{AVG} คำนวณจากสมการ

$$e_{AVG} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} e \quad (3)$$

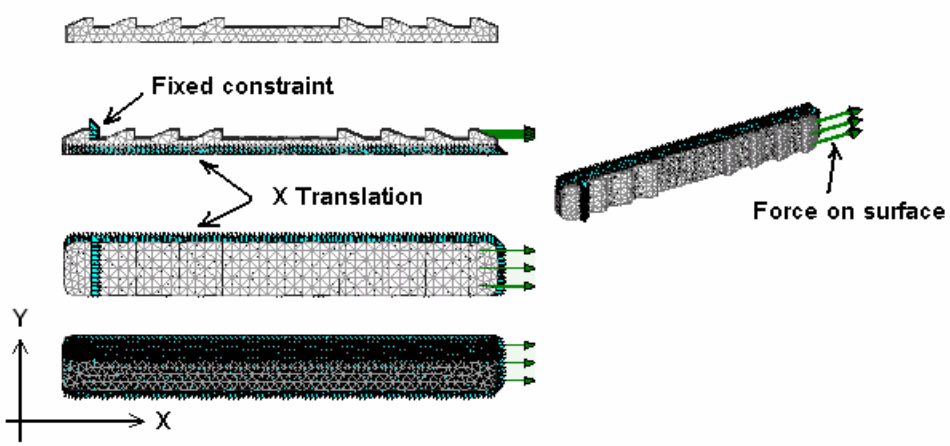
โดยค่า n คือจำนวนข้อมูล

ค่าสัมบูรณ์ (Absolute value) ของค่าเฉลี่ย $|e|_{AVG}$ คำนวณจากสมการ

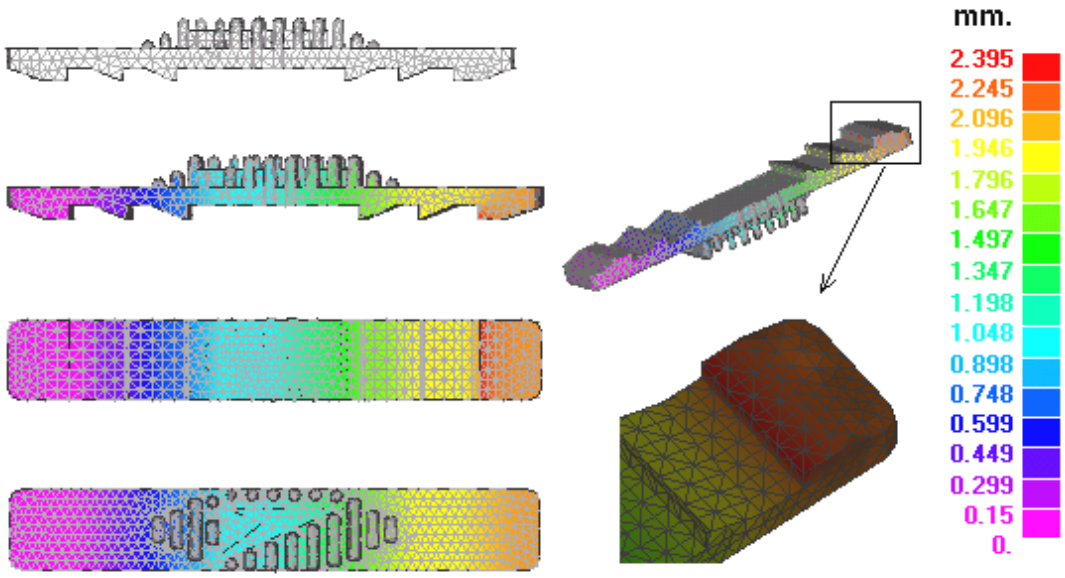
$$|e|_{AVG} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} |e| \quad (4)$$



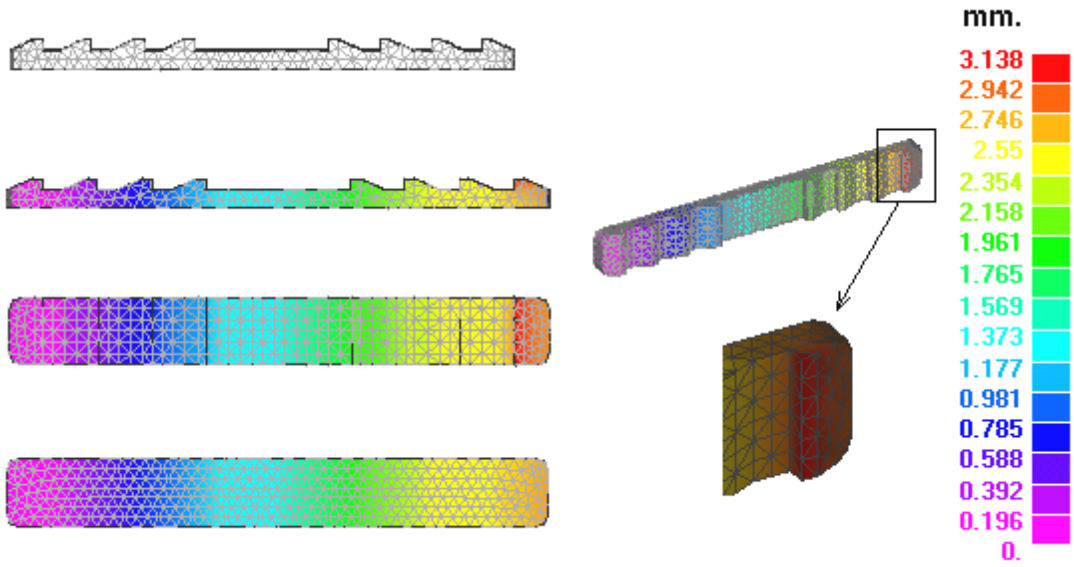
ภาพที่ 56 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-1



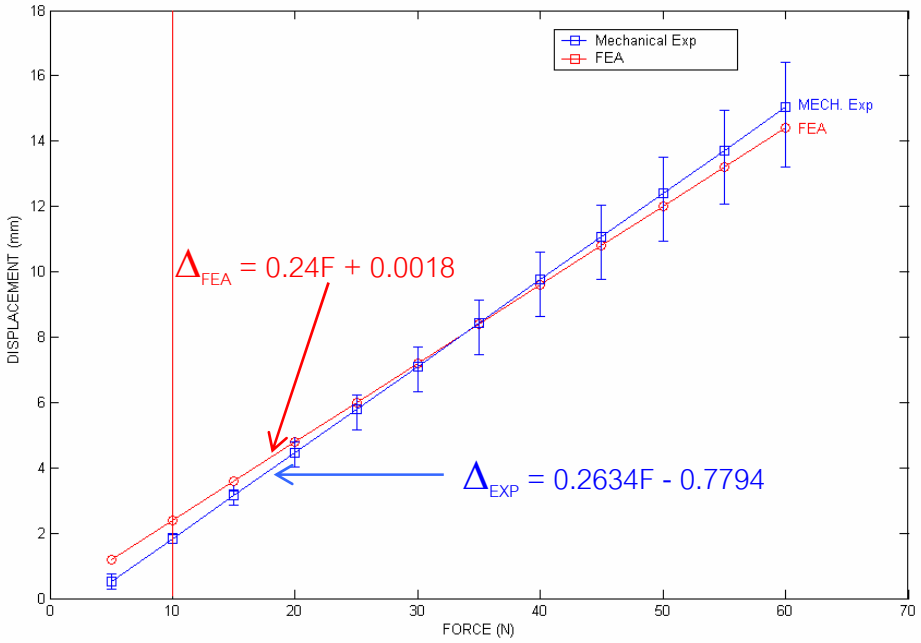
ภาพที่ 57 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงดึงของชิ้นจมูกรุ่น J-10



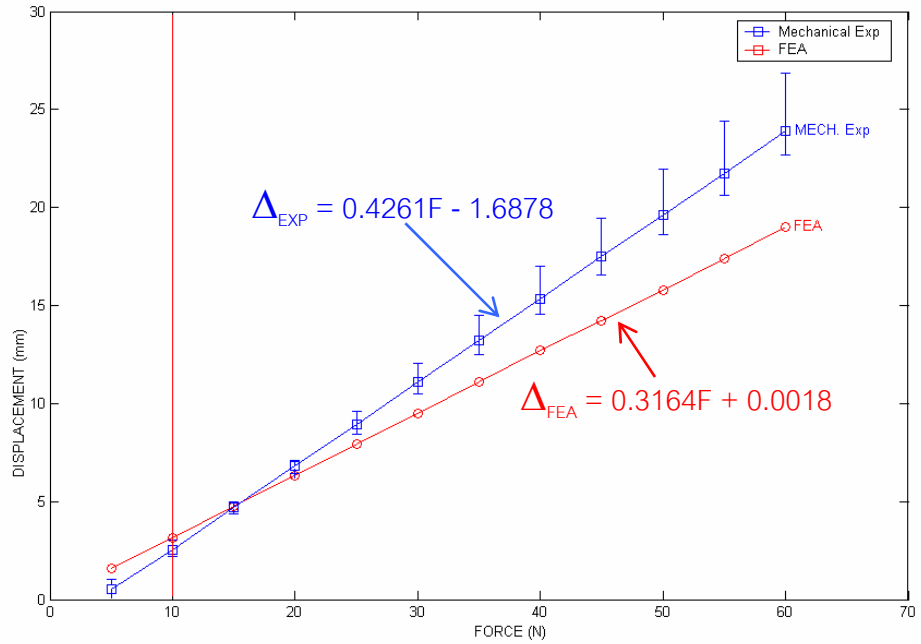
ภาพที่ 58 ผล FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูก รุ่น J-1 ภายใต้แรงดึง 10 N



ภาพที่ 59 ผล FEA ของการยืดตัวของชิ้นจมูกรุ่น J-10 ภายใต้แรงดึง 10 N



ภาพที่ 60 กราฟเปรียบเทียบระยะยืด (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของชิ้นจมูกรุ่น J-1 ภายใต้แรงดึง 5 N ถึง 60 N



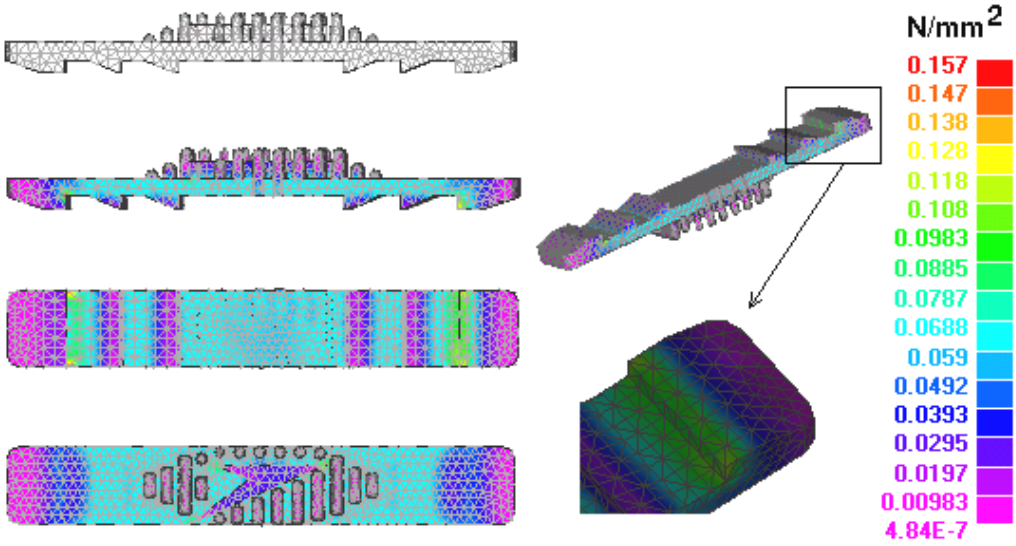
ภาพที่ 61 กราฟเปรียบเทียบระยะยืด (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของชิ้นจมูกรุ่น J-10 ภายใต้แรงดึง 5 N ถึง 60 N

ตารางที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของการยืดตัวของชิ้นจมูก ในการทดสอบการดึง

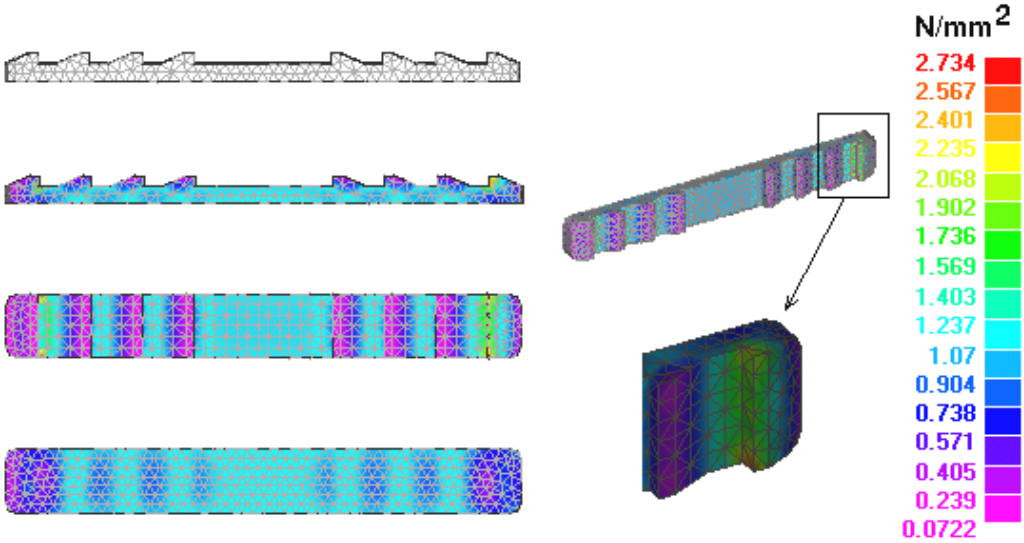
แรงดึง (Force) N	รุ่น J-1				รุ่น J-10			
	ระยะยืด (Δ) mm		ความคลาดเคลื่อน		ระยะยืด (Δ) mm		ความคลาดเคลื่อน	
	การทดสอบทางกล Δ_{EXP}	FEA Δ_{FEA}	e (mm)	e_p (%)	การทดสอบทางกล Δ_{EXP}	FEA Δ_{FEA}	e (mm)	e_p (%)
5	0.503	1.200	-0.697	-138.57	0.524	1.580	-1.056	-201.72
10	1.824	2.400	-0.576	-31.546	2.543	3.160	-0.617	-24.248
15	3.146	3.600	-0.454	-14.436	4.678	4.750	-0.072	-1.538
20	4.467	4.800	-0.333	-7.448	6.813	6.330	0.483	7.087
25	5.789	6.000	-0.211	-3.651	8.948	7.910	1.038	11.595
30	7.110	7.210	-0.100	-1.405	11.082	9.490	1.592	14.368
35	8.432	8.410	0.021	0.255	13.217	11.10	2.117	16.017
40	9.753	9.610	0.143	1.465	15.352	12.70	2.652	17.273
45	11.074	10.80	0.274	2.477	17.486	14.20	3.286	18.794
50	12.396	12.00	0.396	3.193	19.621	15.80	3.821	19.475
55	13.717	13.20	0.517	3.770	21.756	17.40	4.356	20.022
60	15.039	14.40	0.639	4.246	23.891	19.00	4.891	20.471
เฉลี่ย		e_{AVG}	-0.032	-15.137	เฉลี่ย	e_{AVG}	1.874	-6.867
		$\lvert e \rvert_{AVG}$	0.363	17.705		$\lvert e \rvert_{AVG}$	2.165	31.051

4.3 ผล FEA ของความเค้นของชิ้นจมูก

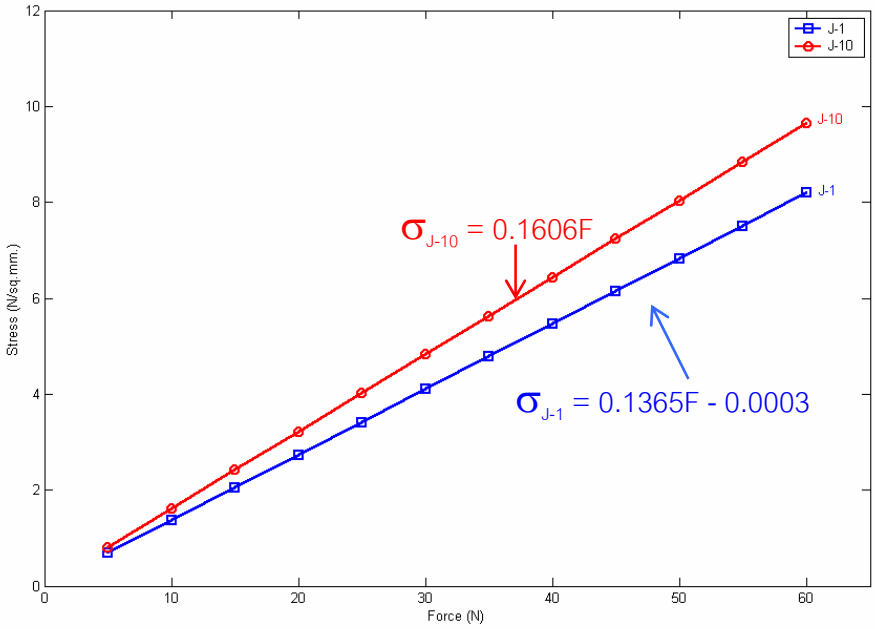
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้นจาก FEA ภายใต้การทดสอบการดึงของชิ้นจมูกโดยแสดงความเค้นเป็นระดับชั้นสีในชิ้นจมูก ที่แรงดึง 10 N ได้แสดง ในภาพที่ 62 และ 63 กราฟของความเค้นสูงสุดจากผลการทดสอบทาง FEA ที่แรงดึง 5 N ถึง 60 N ของชิ้นจมูก รุ่น J-1 และ J-10 ได้แสดงในภาพที่ 64 บริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดของชิ้นจมูกรุ่น J-1 และ J-10 จากภาพที่ 62 และ 63 พบที่บนผิว (Surface) ที่กำหนดโหลดบนชิ้นจมูก ดังนั้นการฉีกขาดจะเกิดขึ้น ณ บริเวณนี้ ซึ่งสอดคล้องกับการฉีกขาดที่เกิดขึ้นจริงในการทดสอบทางกล



ภาพที่ 62 ความเค้นจากผล FEA ที่บริเวณต่างๆ ภายใต้แรงดึง 10 N ของชิ้นจมูกรุ่น J-1



ภาพที่ 63 ความเค้นจากผล FEA ที่บริเวณต่างๆ ภายใต้แรงดึง 10 N ของชิ้นจมูกรุ่น J-10



ภาพที่ 64 กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการดึงของชิ้นจมูกภายใต้แรงดึง 5 N ถึง 60 N

5. ผลการวิเคราะห์การทดสอบการอัดถ้วยตาโดยใช้ FEA

5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM ของถ้วยตา

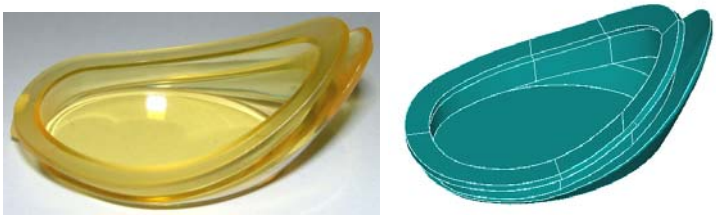
ผลการสร้างแบบจำลองโซลิตโมเดล โดยใช้ Pro/ENGINEER ของถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ได้แสดงเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง ในภาพที่ 65, 66 และ 67 ตามลำดับ ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตาทั้ง 3 แบบได้แสดงในภาพผนวกที่ 4 ถึง 6

โซลิตโมเดลที่ได้ นำมาสร้างเป็นแบบจำลอง FEM โดยกำหนดเอลิเมนต์ให้เป็นแบบ Tetrahedral ผลการสร้างแบบจำลอง FEM ของถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น JR-1006 ได้แสดงในภาพที่ 68ก ประกอบด้วย 12,667 โหนด และ 6,304 ชิ้นประกอบ รุ่น 2006 (ภาพที่ 68ข) ประกอบด้วย 12,302 โหนด และ 6,072 ชิ้นประกอบ และ รุ่น 981 (ภาพที่ 68ค) ประกอบด้วย 14,623 โหนด และ 7,110 ชิ้นประกอบ

ภาพที่ 69 แสดงแบบจำลอง FEM โดยไม่รวมส่วนที่เป็นเลนส์ โดยภาพที่ 69 ก แสดง FEM ของถ้วยตาที่ไม่มีเลนส์ของรุ่น JR-1006 ซึ่งประกอบด้วย 8644 โหนด และ 4329 ชิ้นประกอบ ภาพที่ 69 ข ของรุ่น 2006 ซึ่งประกอบด้วย 12314 โหนด และ 6590 ชิ้นประกอบ และภาพที่ 69 ค ของรุ่น 981 ซึ่งประกอบด้วย 11406 โหนด และ 5789 ชิ้นประกอบ ค่า E ของ PC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้ผลจากตารางที่ 10 โดยใช้ค่าเท่ากับ 1019 N/mm^2

(ก) ชิ้นงานจริง (ข) โซลิตโมเดล

ภาพที่ 65 ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิตโมเดล (ภาพ ข) ของเลนส์รุ่น JR-1006



(ก) ชิ้นงานจริง (ข) โซลิตโมเดล

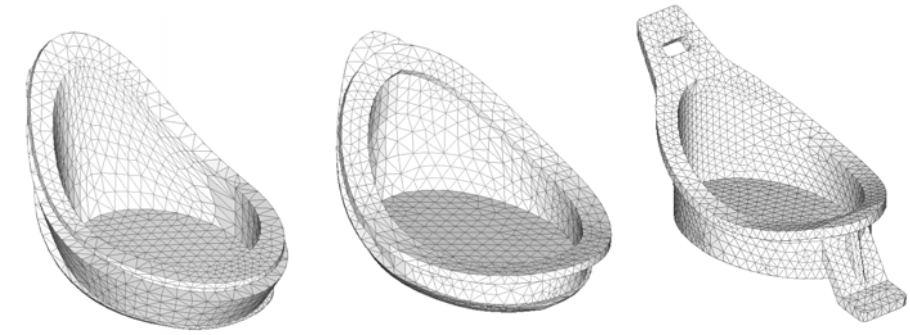
ภาพที่ 66 ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิตโมเดล (ภาพ ข) ของเลนส์รุ่น 2006

(ก) ชิ้นงานจริง (ข) โซลิตโมเดล

ภาพที่ 67 ชิ้นงานจริง (ภาพ ก) และโซลิตโมเดล (ภาพ ข) ของเลนส์รุ่น 981

5.1.1 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง FEM สำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก

ภาพที่ 70, 71 และ 72 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และทิศทางของแรงอัดแบบ ก ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ โดยแรงอัดที่ใช้กำหนดเป็นแรงกระจายที่ผิวของเลนส์ถึงขอบของกรอบลำตัว

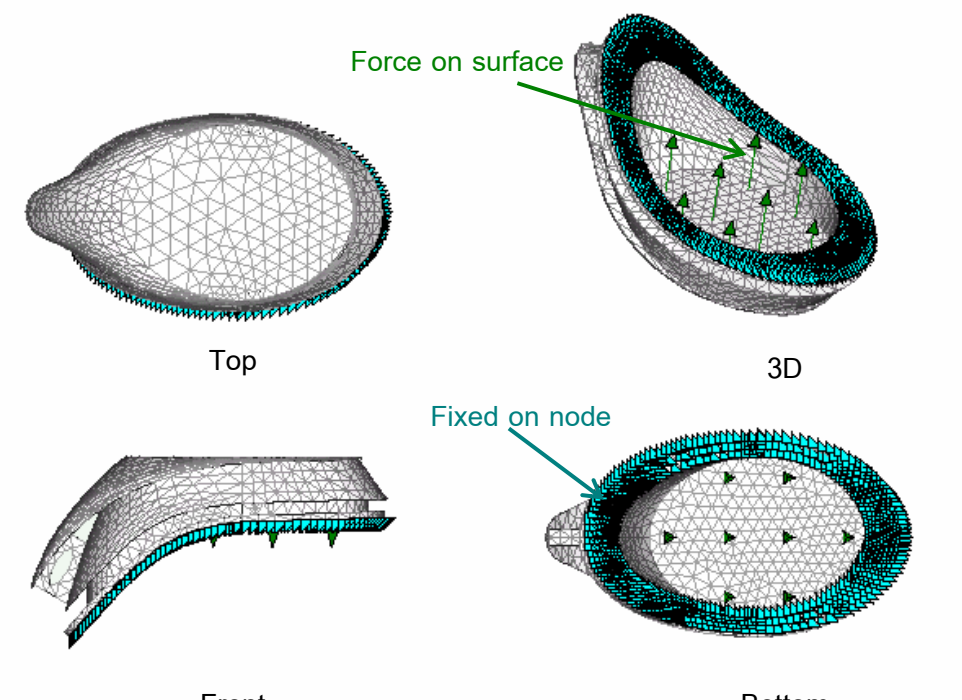


(ก) รุ่น JR-1006 (ข) รุ่น 2006 (ค) รุ่น 981

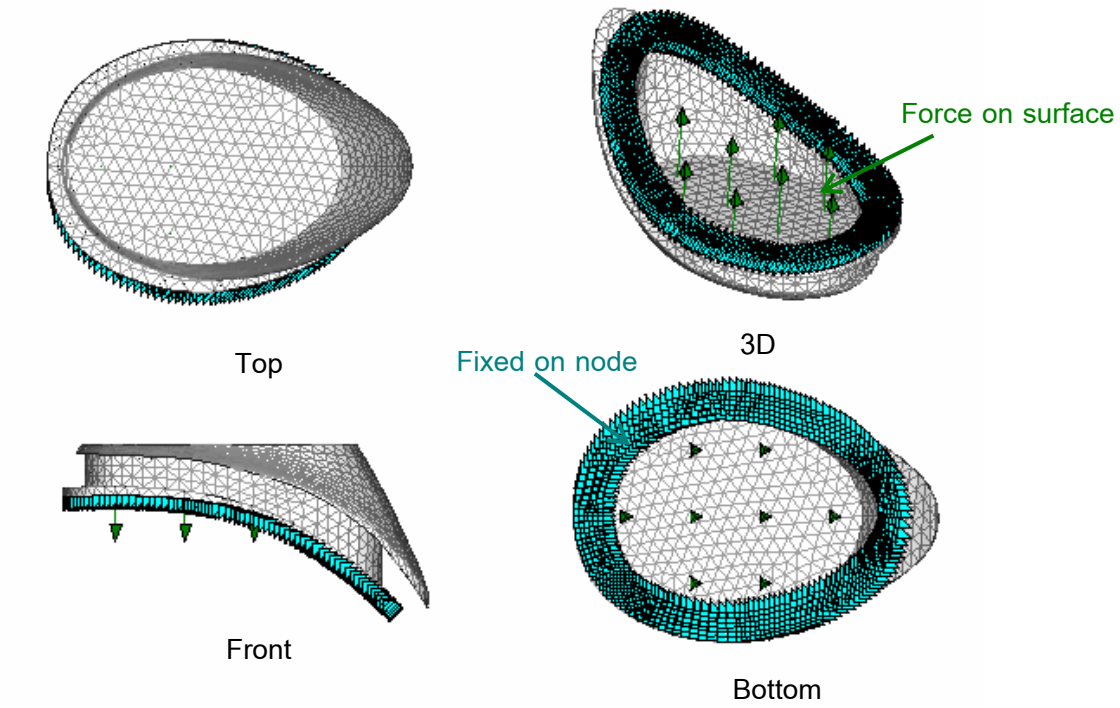
ภาพที่ 68 แบบจำลอง FEM ของถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981

(ก) รุ่น JR-1006 (ข) รุ่น 2006 (ค) รุ่น 981

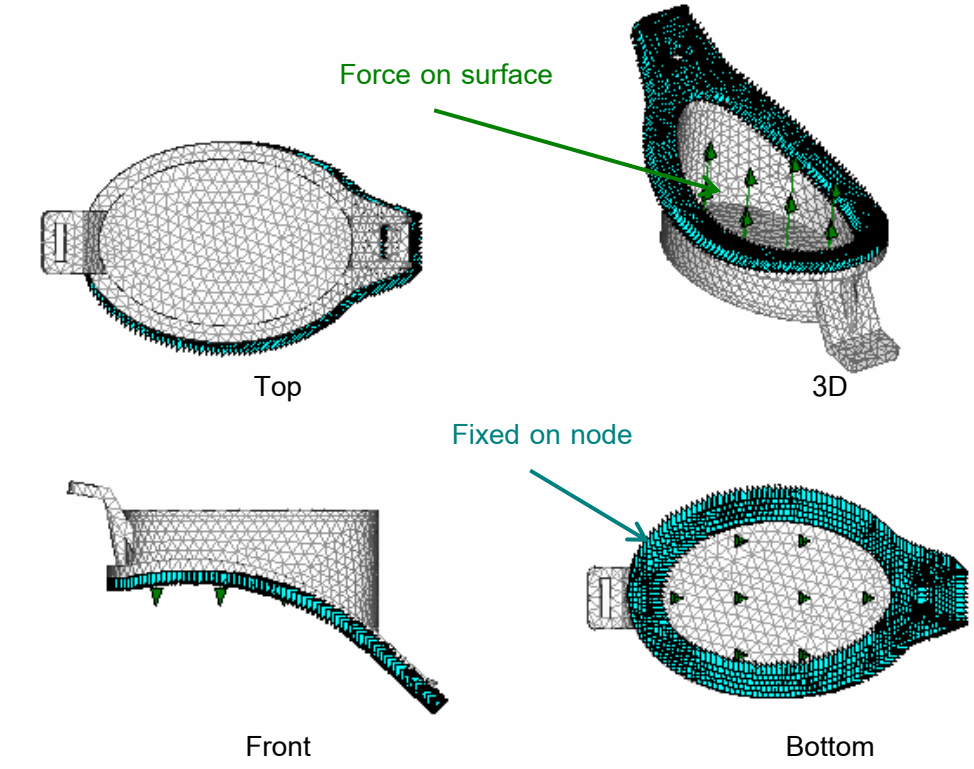
ภาพที่ 69 แบบจำลอง FEM แบบไม่มีเลนส์ของถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981



ภาพที่ 70 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก ของถ้วยตารุ่น JR-1006



ภาพที่ 71 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก ของถ้วยตารุ่น 2006



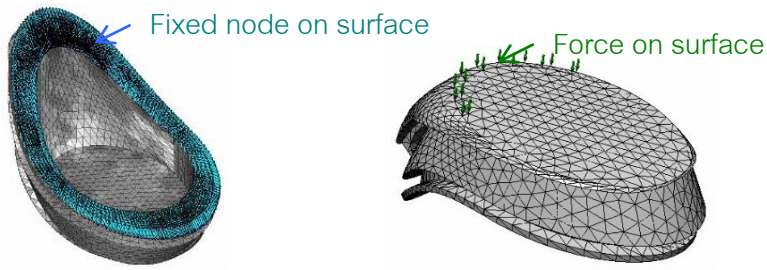
ภาพที่ 72 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ก ของถ้วยตารุ่น 981

5.1.2 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง FEM สำหรับการทดสอบการอัดแบบ ข

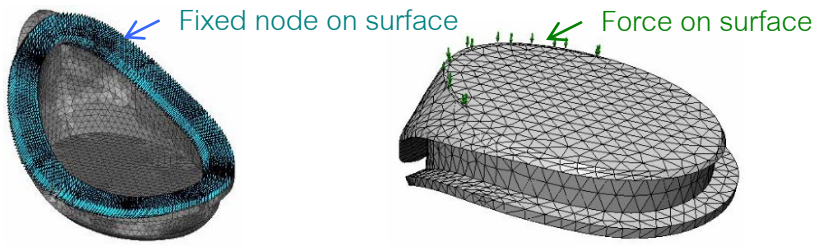
ภาพที่ 73 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ทิศทางและบริเวณพื้นผิวของแรงอัดที่กระทำบนถ้วยตาของการทดสอบแรงอัดแบบ ข ของถ้วยตา รุ่น JR-1006 (ภาพที่ 73 ก) รุ่น 2006 (ภาพที่ 73 ข) และรุ่น 981 (ภาพที่ 73 ค) โดยกำหนดให้พื้นผิวที่รับแรงอัดเฉพาะบริเวณขอบของกรอบลำตัวด้านฝั่งหู โดยมีแรงอัดกระทำเป็นพื้นที่ประมาณ 1/4 ของผิวเลนส์

5.1.3 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง FEM สำหรับการทดสอบการอัดแบบ ค

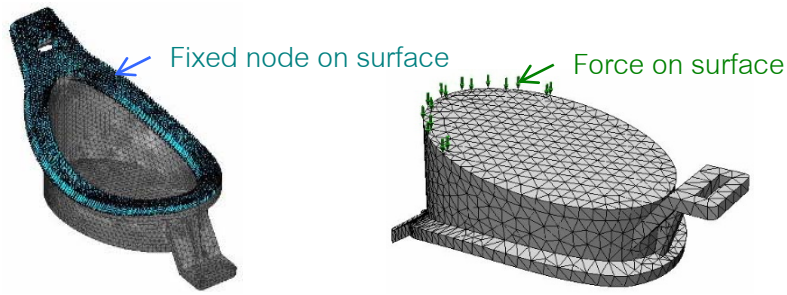
ภาพที่ 74 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ทิศทางและบริเวณพื้นผิวของแรงอัดที่กระทำบนถ้วยตาของการทดสอบแรงอัดแบบ ค โดยใช้แบบจำลอง FEM ที่ไม่รวมเลนส์ของถ้วยตา รุ่น JR-1006 (ภาพที่ 74 ก) รุ่น 2006 (ภาพที่ 74 ข) และรุ่น 981 (ภาพที่ 74 ค) โดยการกำหนดแรงอัดใช้เงื่อนไขเดียวกันกับของเงื่อนไขการทดสอบแรงอัดแบบ ข



(ก) ถ้วยตา รุ่น JR-1006

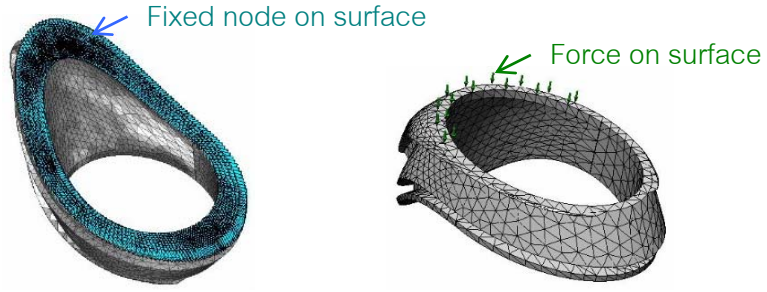


(ข) ถ้วยตา รุ่น 2006

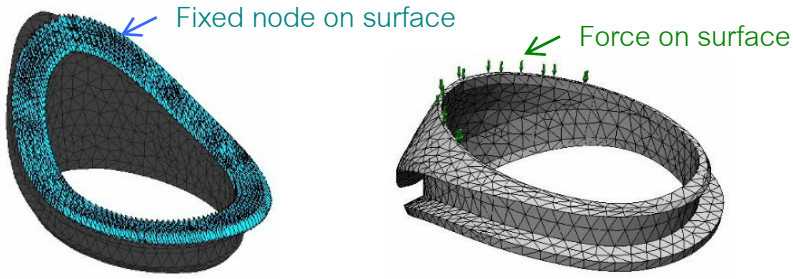


(ค) ถ้วยตา รุ่น 981

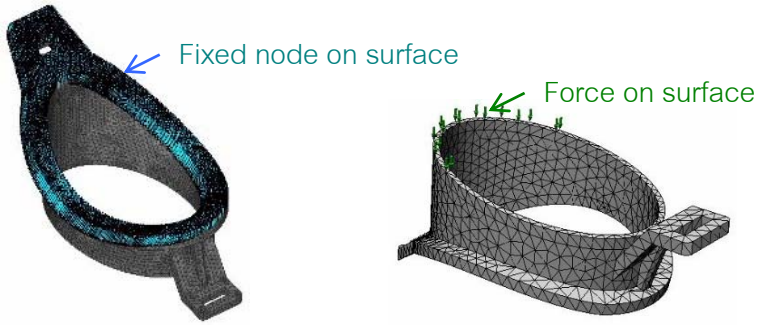
ภาพที่ 73 เงื่อนไขขอบเขตและทิศทางแรงอัดสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ข



(ก) ถ้วยตา รุ่น JR-1006



(ข) ถ้วยตา รุ่น 2006



(ค) ถ้วยตา รุ่น 981

ภาพที่ 74 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางสำหรับการทดสอบการอัดแบบ ค

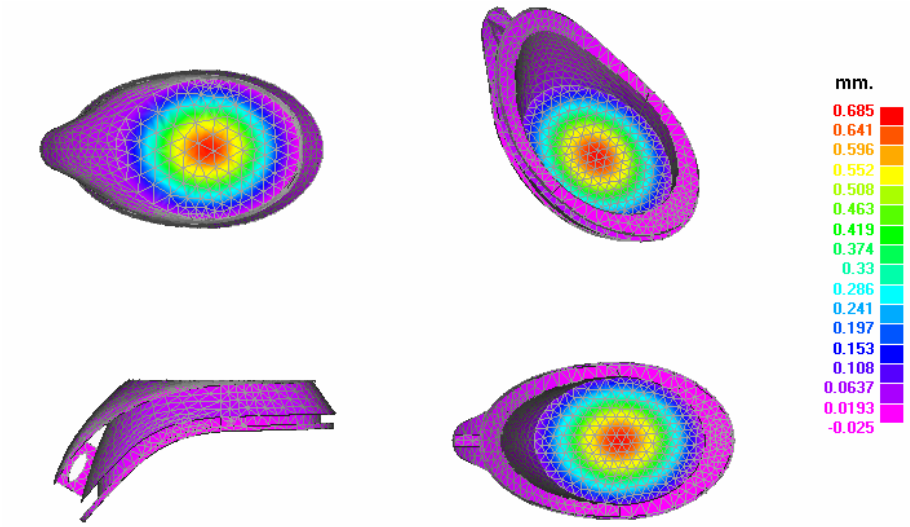
5.2 ผลการวิเคราะห์การยุบตัวของถ้วยตาโดยใช้ FEA

5.2.1 ผล FEA ของการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ก

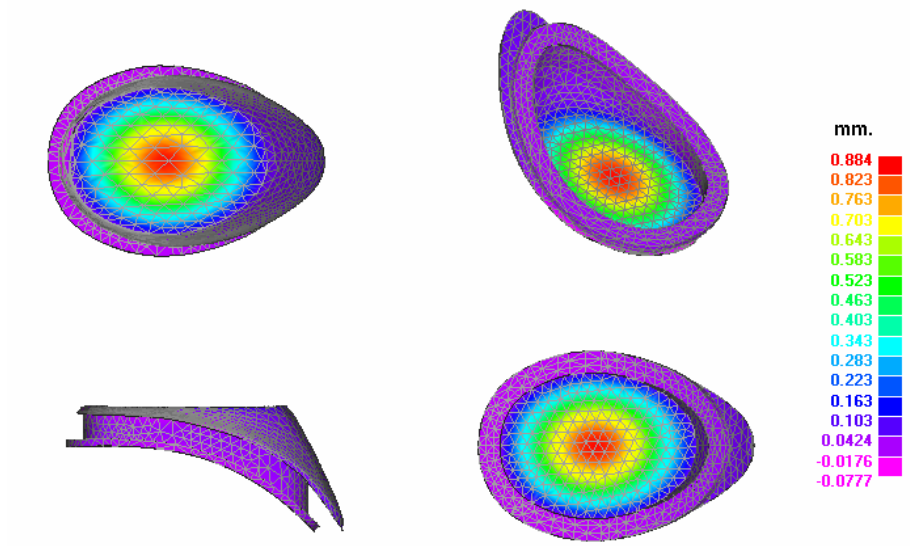
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ FEA ของการยุบตัว หรือการเปลี่ยนแปลงรูปทรง ของถ้วยตา แสดงเป็นระดับชั้นสี ที่เกิดจากแรงอัด 600 N ของการทดสอบการอัดแบบ ก ได้แสดงในภาพที่ 75, 76 และ 77 สำหรับถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ ขั้นตอนการวิเคราะห์ ได้สรุปไว้ในภาคผนวกที่ 5

ผลการวิเคราะห์ FEA ของการยุบตัว จากแรงอัดทุกๆ 100 N โดยเริ่มจากแรงอัดที่ 200 N ถึง 1000 N ได้ผลเช่นเดียวกับภาพที่ 75 ถึง 77 โดยแสดงการยุบตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของเลนส์ เนื่องจากระยะยุบตัวที่วัดได้ในการทดสอบทางกล เป็นการวัดที่ผิวบนของกรอบลำตัวของถ้วยตา ดังนั้นระยะยุบตัวที่นำมาเปรียบเทียบจึงใช้ค่าเฉลี่ยของ 25 จุด ระยะห่างเท่าๆ กัน

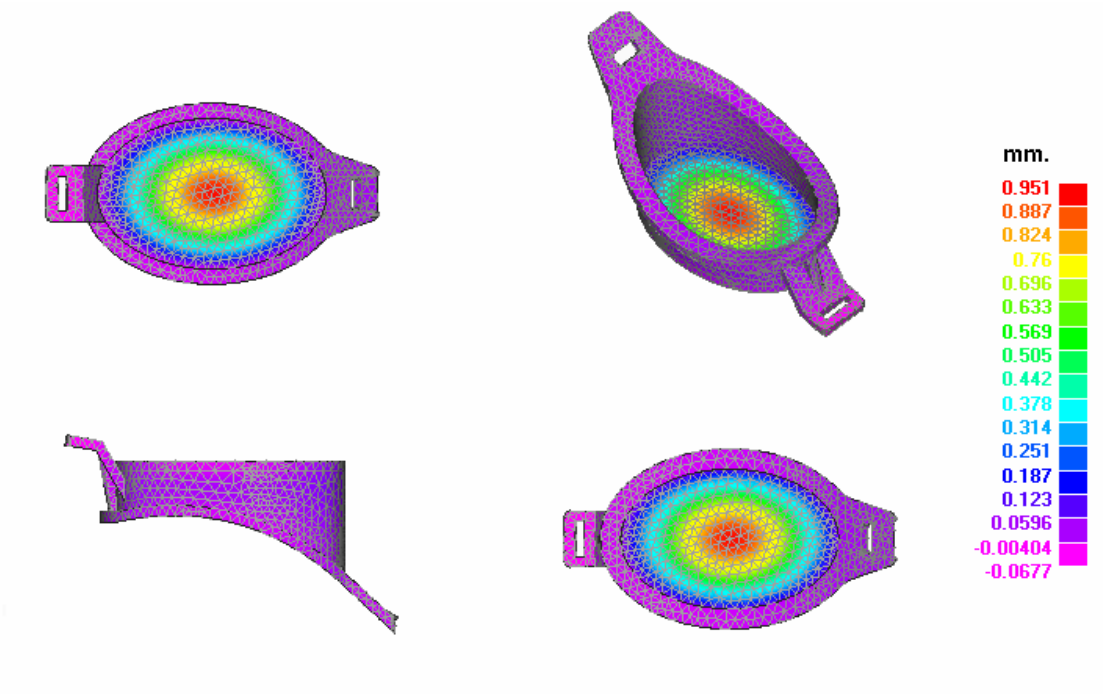
ตามขอบนอกของกรอบลำตัวและผิวเลนส์ กราฟในภาพที่ 78, 79 และ 80 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของถ้วยตา ระหว่าง ผลการทดสอบทางกลและผลจาก FEA ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ โดย $\Delta_{FEA\text{-}MAX}$ เป็นระยะยุบตัวสูงสุดที่กลางเลนส์ และ $\Delta_{FEA\text{-}EDGE}$ เป็นค่าเฉลี่ยของระยะยุบตัวตามขอบและผิวเลนส์ (25 จุด)



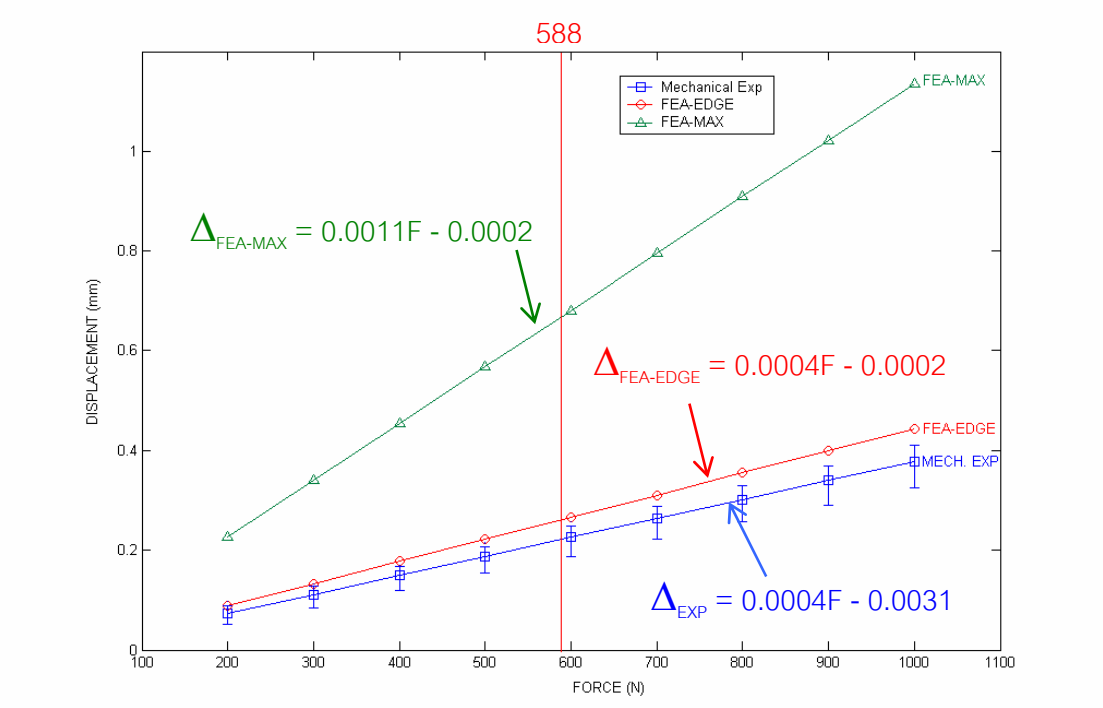
ภาพที่ 75 ผล FEA แบบ ก ของระยะยุบตัวของถ้วยตารุ่น JR-1006 ที่แรงอัด 600 N



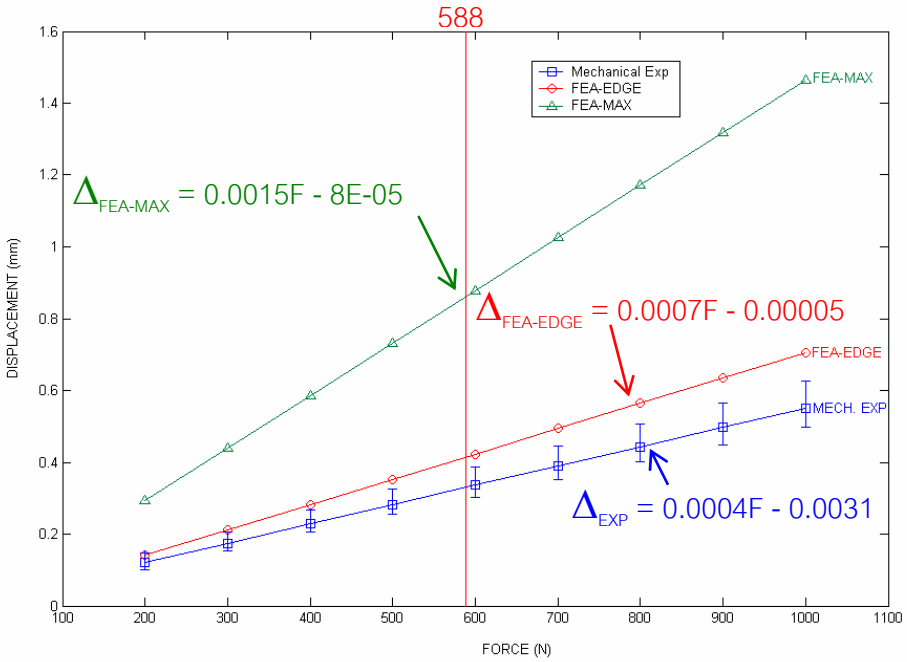
ภาพที่ 76 ผล FEA แบบ ก ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น 2006 ที่แรงอัด 600 N



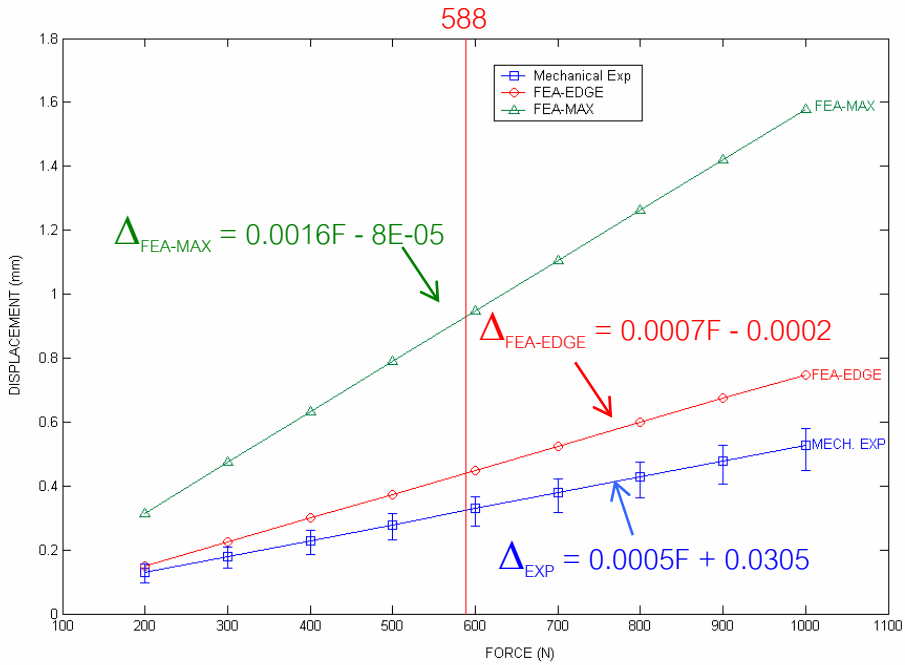
ภาพที่ 77 ผล FEA แบบ ก ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น 981 ที่แรงอัด 600 N



ภาพที่ 78 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006



ภาพที่ 79 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 2006

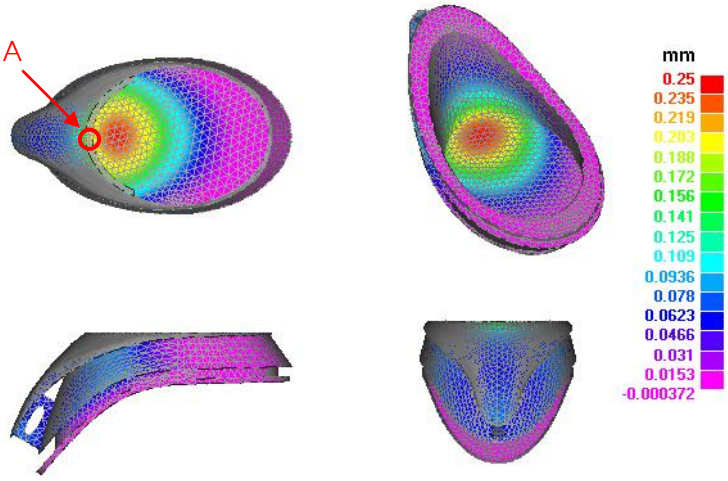


ภาพที่ 80 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 981

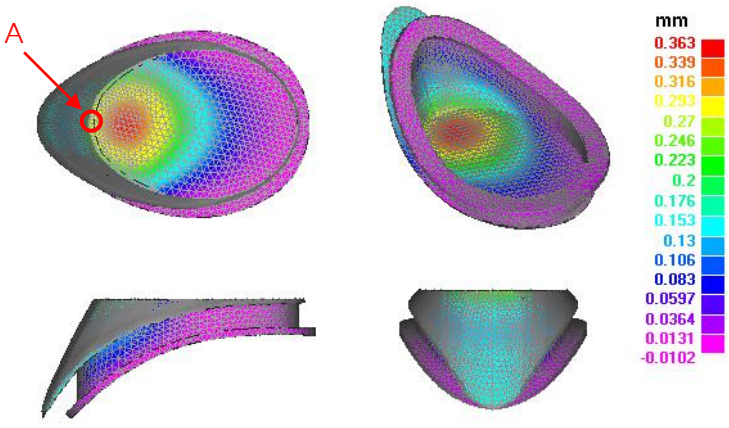
5.2.2 ผล FEA ของการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ข

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ FEA ของการยุบตัวของถ้วยตาแสดงเป็นระดับชั้นสีที่เกิดจากแรงอัด 600 N ของการทดสอบแรงอัดแบบ ข ได้แสดงในภาพที่ 81, 82 และ 83 สำหรับถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ

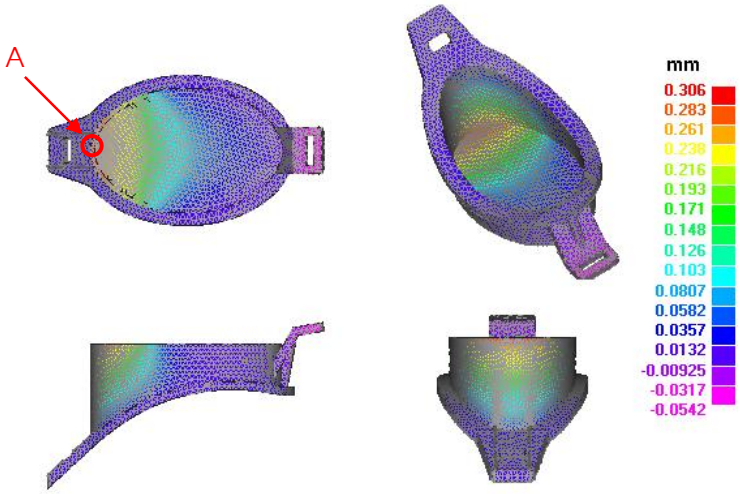
ผลการวิเคราะห์ FEA ของการยุบตัว จากแรงอัดที่ 200 N เพิ่มทุกๆ 100 N ถึง 1000 N แสดงระยะยุบสูงสุดบนเลนส์ฝั่งเดียวกับแรงกระทำ ระยะยุบสูงสุดนี้ไม่ได้เกิดบนขอบของกรอบลำตัว เช่นเดียวกับผลที่ได้โดยการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ก ดังนั้นระยะยุบตัวที่ใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล คือ ระยะยุบตัวที่จุด A ของภาพที่ 81 ถึง 83



ภาพที่ 81 ผล FEA แบบ ข ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น JR-1006 ที่แรงอัด 600 N



ภาพที่ 82 ผล FEA แบบ ข ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น 2006 ที่แรงอัด 600 N

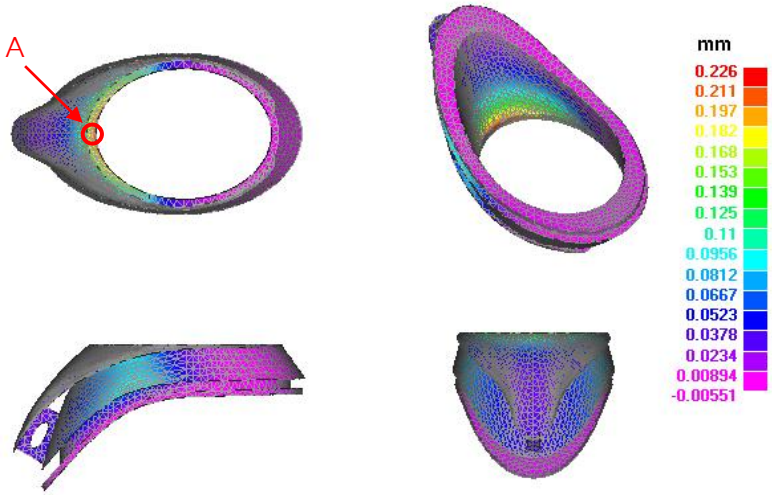


ภาพที่ 83 ผล FEA แบบ ข ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น 981 ที่แรงอัด 600 N

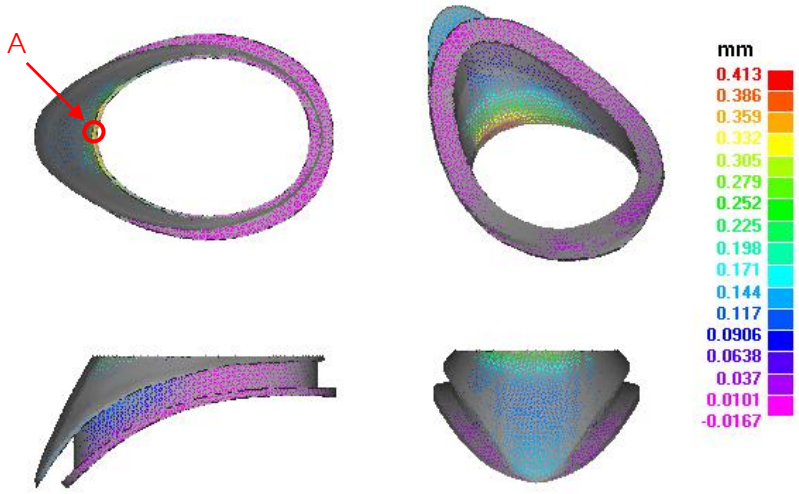
5.2.3 ผล FEA ของการจำลองการทดสอบการอัดแบบ ค

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ FEA ของการยุบตัวของถ้วยตาแสดงเป็นระดับชั้นสีที่เกิดจากแรงอัด 600 N ของการทดสอบแรงอัดแบบ ค ได้แสดงในภาพที่ 84, 85 และ 86 สำหรับถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ

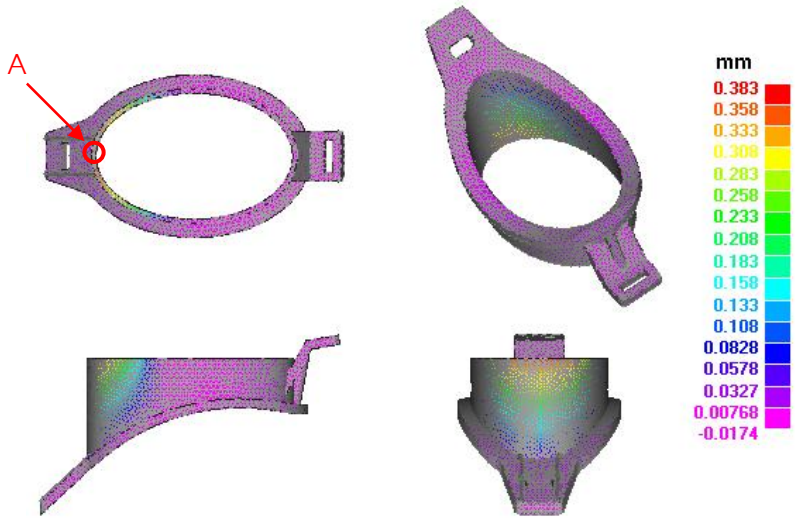
ผลการวิเคราะห์ FEA ของการยุบตัว จากแรงอัดที่ 200 N เพิ่มทุกๆ 100 N ถึง 1000 N แสดงตำแหน่งการยุบตัวสูงสุดที่ขอบบนของกรอบลำตัวด้านที่มีแรงมากระทำ (จุด A)



ภาพที่ 84 ผล FEA แบบ ค ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น JR-1006 ที่แรงอัด 600 N



ภาพที่ 85 ผล FEA แบบ ค ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น 2006 ที่แรงอัด 600 N



ภาพที่ 86 ผล FEA แบบ ค ของระยะยุบตัวของถ้วยตา รุ่น 981 ที่แรงอัด 600 N

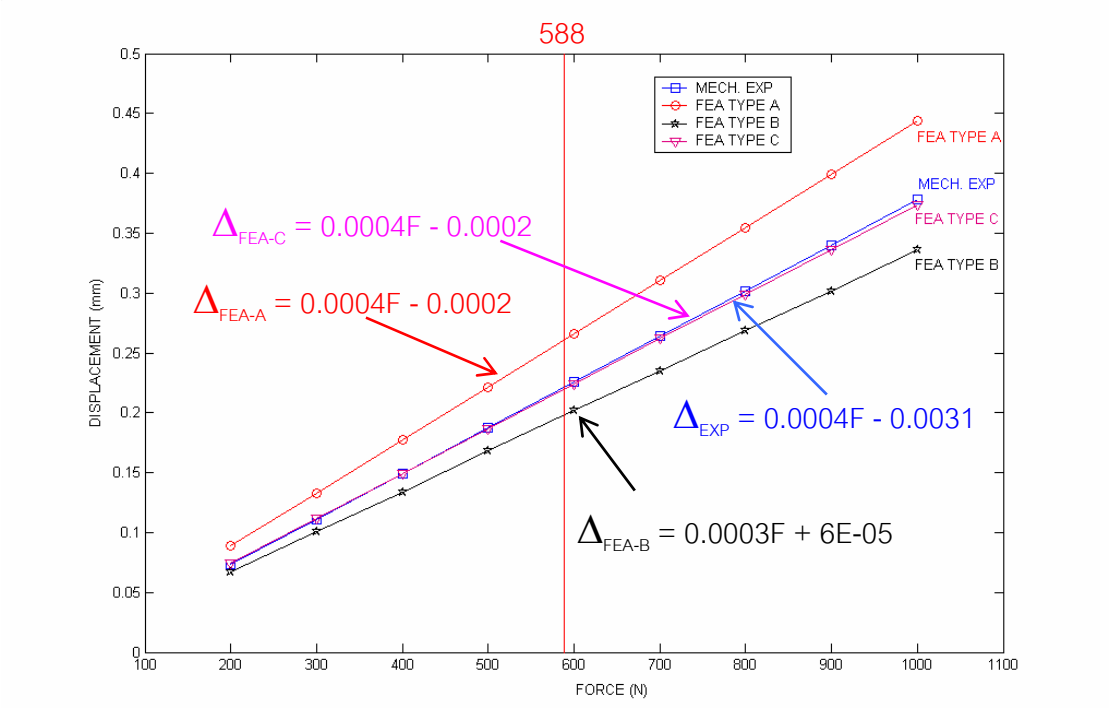
5.2.4 การเปรียบเทียบผล FEA ของแบบจำลองการทดสอบการอัด

กราฟแสดงระยะยุบตัวของการทดสอบการอัดเพิ่มจากแรงอัดที่ 200 N เพิ่มทุกๆ 100 N ถึง 1000 N เปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกล ของผล FEA จากการทดสอบแรงอัด แบบ ก (Δ_{FEA-A}) แบบ ข (Δ_{FEA-B}) และแบบ ค (Δ_{FEA-C}) โดยตำแหน่งของระยะยุบตัวที่ใช้เปรียบเทียบเป็น

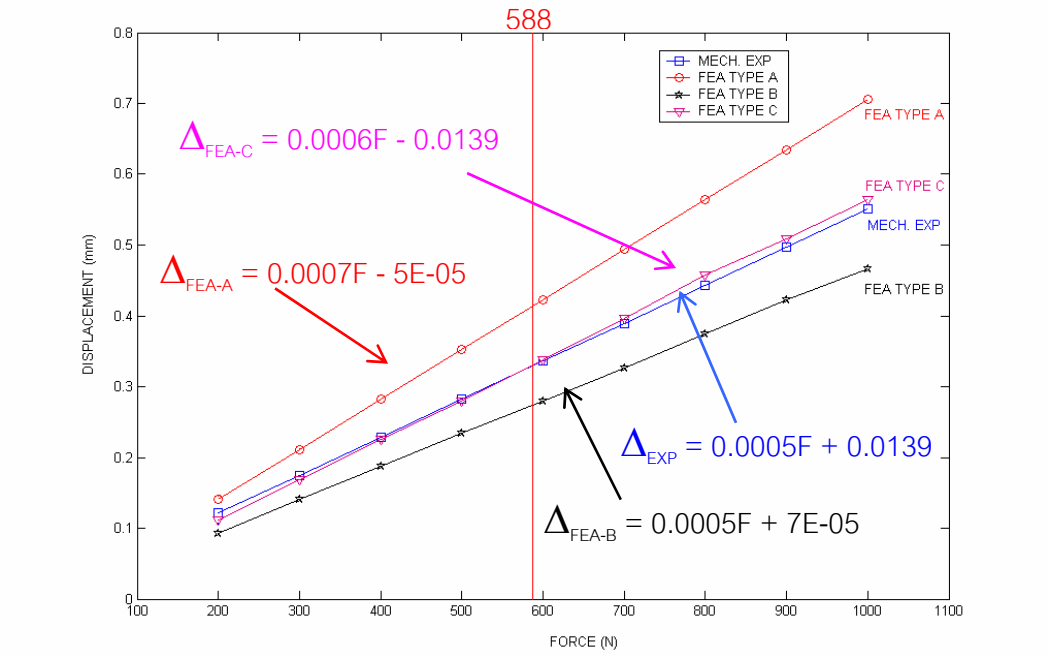
ตำแหน่งเดียวกันของทั้ง 3 แบบ คือ จุด A (ภาพที่ 84 ถึง 86) ซึ่งเป็นโหนดอยู่ตรงกลางที่ขอบบนของกรอบลำตัวของถ้วยตา (ด้านฝั่งหู)

ภาพที่ 87 แสดงผลเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Δ) ของถ้วยตารุ่น JR-1006 ภาพที่ 88 ของรุ่น 2006 และภาพที่ 89 ของรุ่น 981 ตารางที่ 12, 13 และ 14 สรุปความคลาดเคลื่อนของผล FEA เมื่อเทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว ของถ้วยตา รุ่น JR-1006 รุ่น 2006 และรุ่น 981 ตามลำดับ

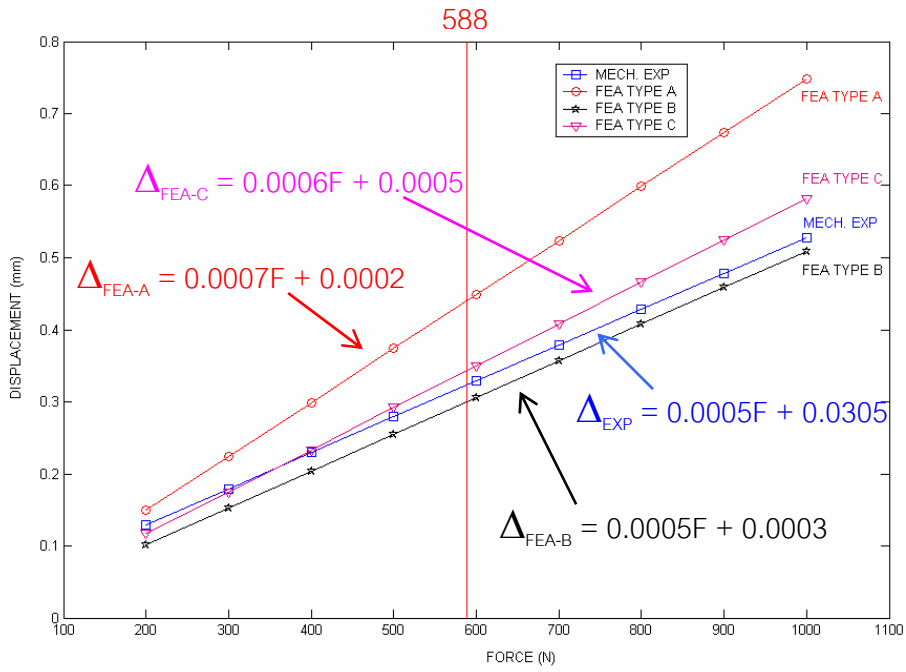
ผลจากกราฟและตารางดังกล่าว แสดงการจำลอง FEA ของการทดสอบแบบ ค ในถ้วยตารุ่น JR-1006 รุ่น 2006 และ 981 ให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบทางกล โดยรุ่น JR-1006 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย $|e|_{AVG}$ = 0.903 รุ่น 2006 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย $|e|_{AVG}$ = 2.613 และรุ่น 981 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย $|e|_{AVG}$ = 6.969



ภาพที่ 87 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006



ภาพที่ 88 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 2006



ภาพที่ 89 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัว (Displacement) จากผล FEA กับผลการทดสอบทางกล ของการทดสอบการอัดในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตารุ่น 981

ตารางที่ 12 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว (Δ) จากการทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น JR-1006

แรงอัด (Force) N	การทดสอบทางกล Δ_{EXP}	การทดสอบการอัดแบบ ก			การทดสอบการอัดแบบ ข			การทดสอบการอัดแบบ ค		
		Δ_{FEA-A}	e (mm)	e_P (%)	Δ_{FEA-B}	e (mm)	e_P (%)	Δ_{FEA-C}	e (mm)	e_P (%)
200	0.0731	0.089	-0.0155	-21.1375	0.067	0.006	8.121	0.0747	-0.002	-2.133
300	0.1113	0.133	-0.0217	-19.5183	0.101	0.010	9.238	0.112	-0.001	-0.647
400	0.1494	0.177	-0.0280	-18.7257	0.134	0.015	10.320	0.149	0.000	0.281
500	0.1876	0.222	-0.0341	-18.2022	0.168	0.020	10.429	0.187	0.001	0.299
600	0.2257	0.266	-0.0404	-17.8999	0.202	0.024	10.501	0.224	0.002	0.753
700	0.2638	0.311	-0.0467	-17.6850	0.235	0.029	10.931	0.262	0.002	0.697
800	0.3019	0.355	-0.0529	-17.5243	0.269	0.033	10.921	0.299	0.003	0.987
900	0.3401	0.399	-0.0592	-17.4066	0.302	0.038	11.203	0.336	0.004	1.206
1000	0.3783	0.444	-0.0654	-17.3003	0.336	0.042	11.172	0.374	0.004	1.126
เฉลี่ย		e_{AVG}	-0.0404	-18.3778		0.024	10.315		0.002	0.285
		$\lvert e \rvert_{AVG}$	0.0404	18.3778		0.0241	10.315		0.002	0.903

ตารางที่ 13 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว (Δ) จากการทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น 2006

แรงอัด (Force) N	การทดสอบทางกล Δ_{EXP}	การทดสอบการอัดแบบ ก			การทดสอบการอัดแบบ ข			การทดสอบการอัดแบบ ค		
		Δ_{FEA-A}	e (mm)	e_P (%)	Δ_{FEA-B}	e (mm)	e_P (%)	Δ_{FEA-C}	e (mm)	e_P (%)
200	0.1212	0.141	-0.0198	-16.3366	0.093	0.028	22.950	0.112	0.009	7.606
300	0.1749	0.212	-0.0366	-20.9262	0.141	0.034	19.383	0.169	0.006	3.373
400	0.2286	0.282	-0.0534	-23.3596	0.187	0.042	18.198	0.225	0.004	1.575
500	0.2823	0.353	-0.0703	-24.9026	0.234	0.048	17.098	0.28	0.002	0.801
600	0.3360	0.423	-0.0871	-25.9226	0.280	0.056	16.657	0.338	-0.002	-0.607
700	0.3896	0.494	-0.1040	-26.6940	0.327	0.063	16.076	0.396	-0.006	-1.632
800	0.4433	0.564	-0.1208	-27.2502	0.375	0.068	15.411	0.457	-0.014	-3.086
900	0.4970	0.635	-0.1376	-27.6861	0.422	0.075	15.091	0.509	-0.012	-2.414
1000	0.5507	0.705	-0.1545	-28.0552	0.467	0.084	15.193	0.564	-0.013	-2.423
เฉลี่ย		e_{AVG}	-0.0871	-24.5704		0.055	17.339		-0.003	0.355
		$\lvert e \rvert_{AVG}$	0.0871	24.5704		0.055	17.339		0.008	2.613

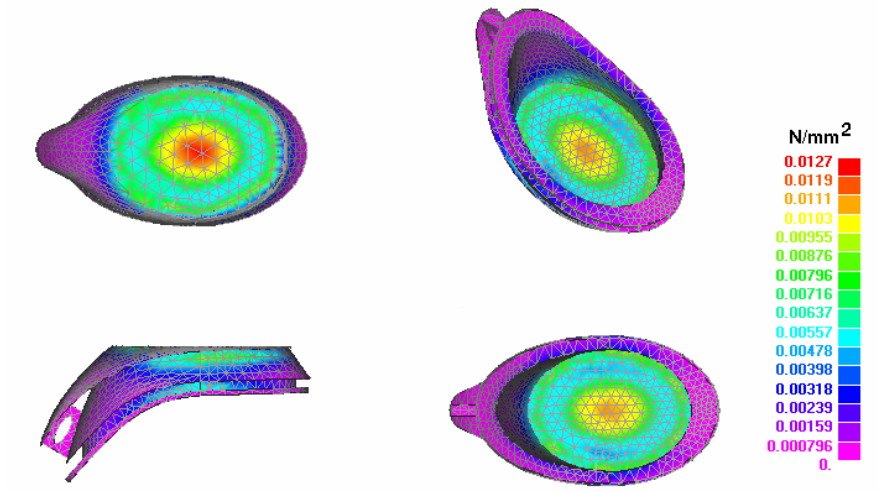
ตารางที่ 14 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผล FEA เทียบกับผลทดสอบทางกลของระยะยุบตัว (Δ) จากการทดสอบการอัดของถ้วยตา รุ่น 981

แรงอัด (Force) N	การทดสอบทางกล Δ_{EXP}	การทดสอบการอัดแบบ ก			การทดสอบการอัดแบบ ข			การทดสอบการอัดแบบ ค		
		Δ_{FEA-A}	e (mm)	e_P (%)	Δ_{FEA-B}	e (mm)	e_P (%)	Δ_{FEA-C}	e (mm)	e_P (%)
200	0.1299	0.150	-0.0196	-15.1240	0.102	0.028	21.454	0.117	0.013	9.903
300	0.1795	0.224	-0.0448	-24.9443	0.153	0.027	14.773	0.175	0.005	2.518
400	0.2292	0.299	-0.0700	-30.5410	0.204	0.025	10.995	0.233	-0.004	-1.658
500	0.2789	0.374	-0.0951	-34.1079	0.255	0.024	8.563	0.292	-0.013	-4.705
600	0.3285	0.449	-0.1204	-36.6431	0.306	0.023	6.855	0.35	-0.021	-6.538
700	0.3782	0.524	-0.1456	-38.5128	0.357	0.021	5.596	0.408	-0.030	-7.891
800	0.4278	0.599	-0.1708	-39.9187	0.408	0.020	4.633	0.467	-0.039	-9.158
900	0.4775	0.674	-0.1960	-41.0412	0.459	0.019	3.878	0.525	-0.047	-9.943
1000	0.5272	0.748	-0.2211	-41.9493	0.509	0.018	3.445	0.582	-0.055	-10.403
เฉลี่ย		e_{AVG}	-0.1204	-33.6425		0.0226	8.9101		-0.021	-4.208
		$\lvert e \rvert_{AVG}$	0.1204	33.6425		0.0226	8.9101		0.025	6.969

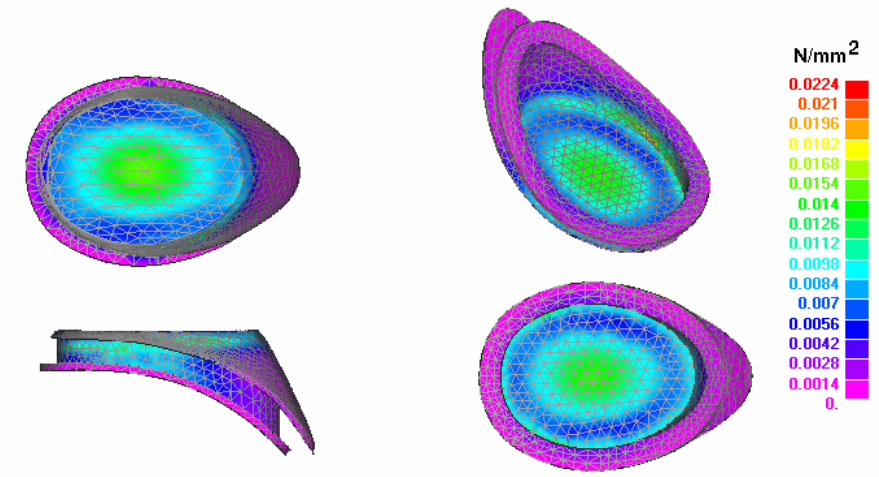
5.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของถ้วยตาภายใต้แรงอัดโดยใช้ FEA

5.3.1 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก

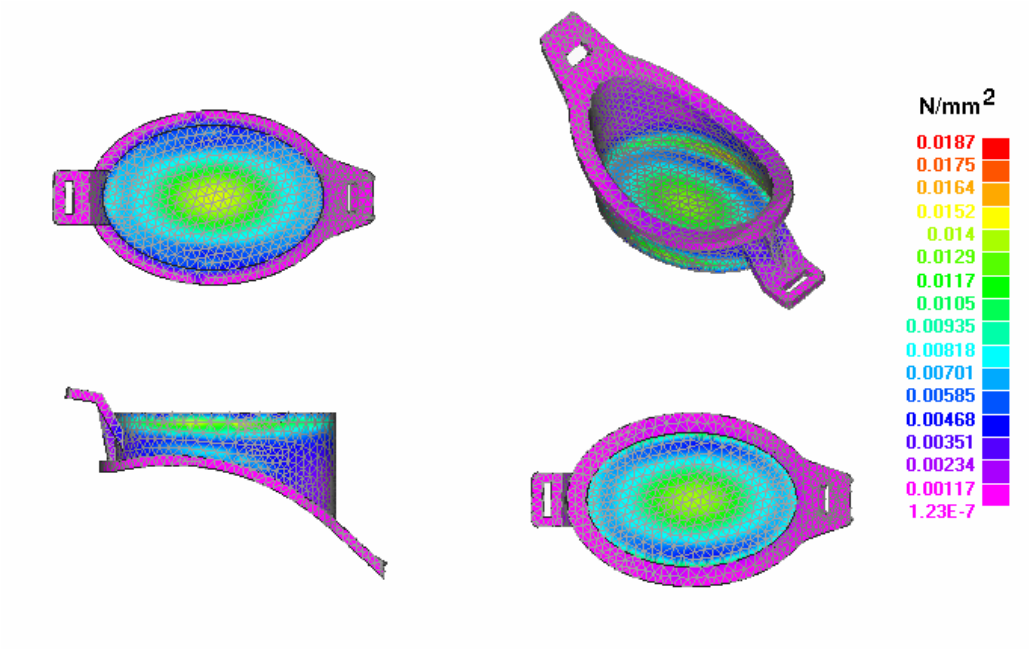
ภาพที่ 90, 91 และ 92 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้นโดยใช้ FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก แสดงเป็นระดับชั้นสี ภายใต้แรงอัดที่ 600 N ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ ในการจำลองการทดสอบ FEA แบบ ก นี้แสดงความเค้นสูงสุดของถ้วยตารุ่น JR-1006 เกิด ณ บริเวณกึ่งกลางของเลนส์ เช่นเดียวกับตำแหน่งของการเกิดระยะยุบตัวสูงสุดแต่สำหรับรุ่น 2006 และ 981 มีค่าสูงสุดบริเวณกรอบลำตัวใกล้แผ่นเลนส์ ภาพที่ 93 แสดงกราฟของความเค้นสูงสุดของถ้วยตา ที่แรงอัด 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ



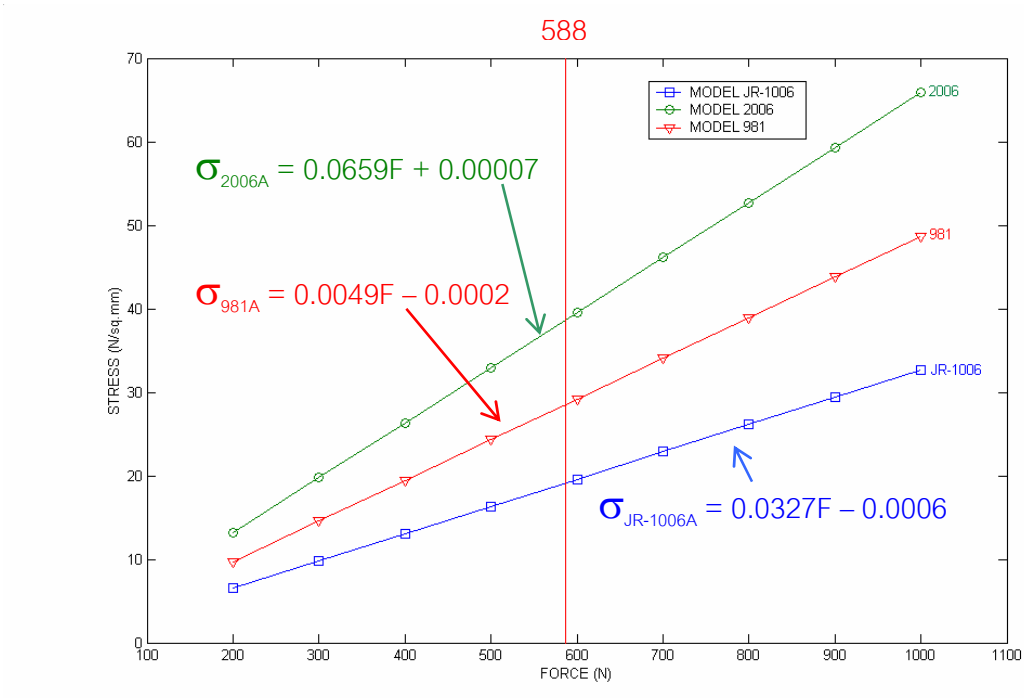
ภาพที่ 90 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006



ภาพที่ 91 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 2006



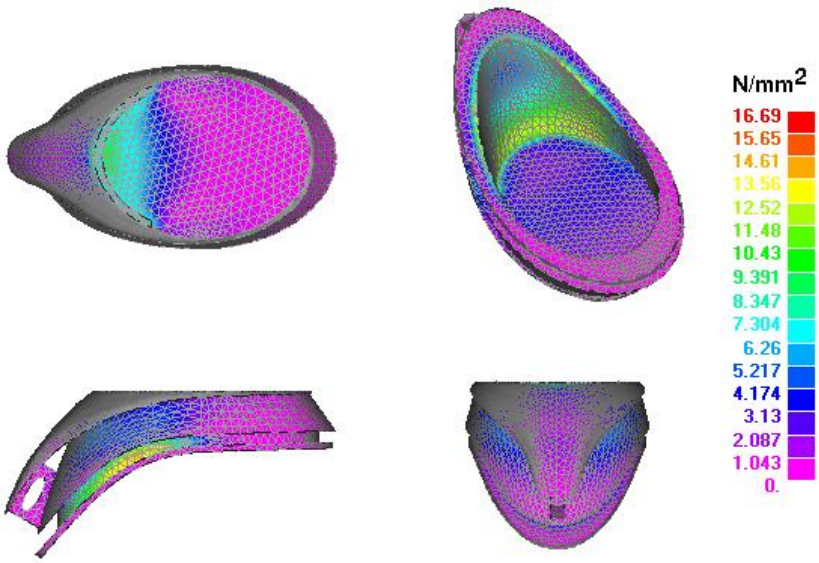
ภาพที่ 92 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 981



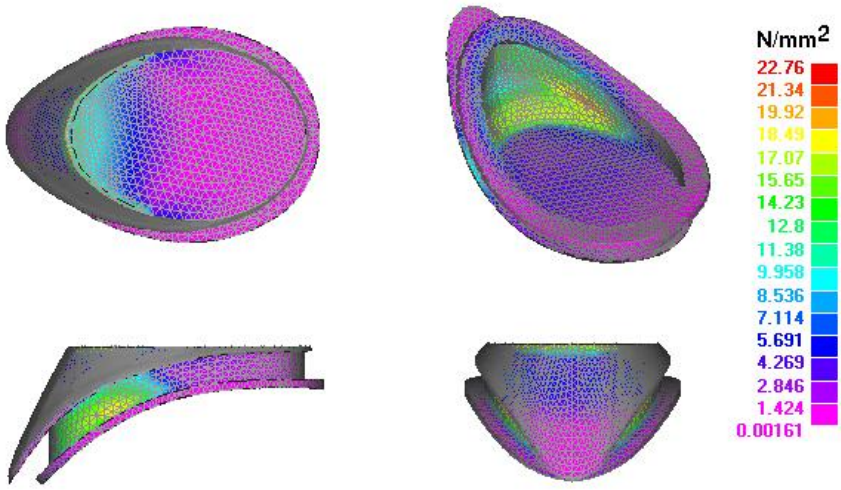
ภาพที่ 93 กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ก ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น

5.3.2 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข

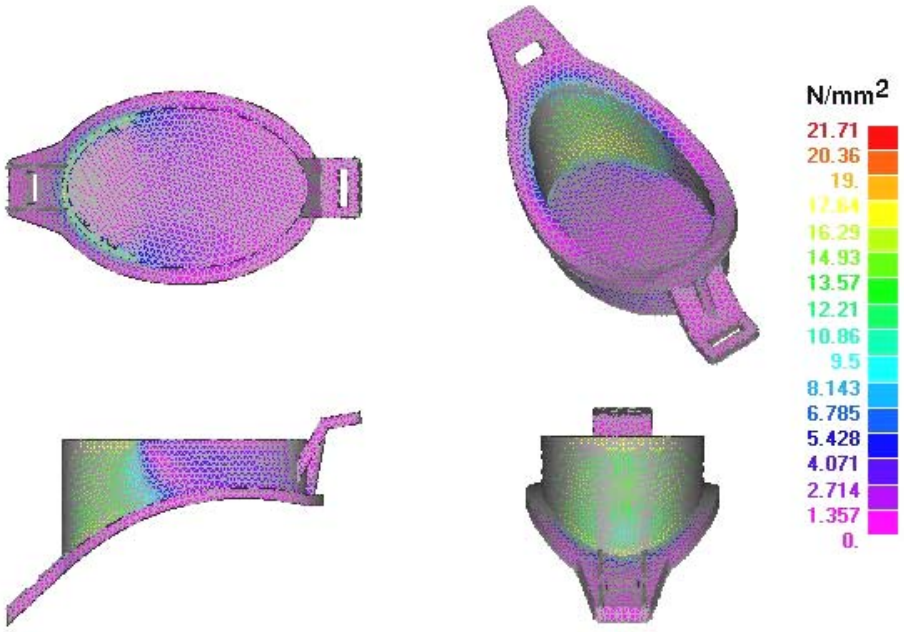
ภาพที่ 94, 95 และ 96 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้นโดยใช้ FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข แสดงเป็นระดับชั้นสี ภายใต้แรงอัดที่ 600 N ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ ความเค้นสูงสุดปรากฏที่กรอบลำตัวของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น ภาพที่ 97 แสดงกราฟของความเค้นสูงสุดของถ้วยตารุ่น JR-1006 รุ่น 2006 และรุ่น 981 ที่แรงอัด 200 N ถึง 1000 N



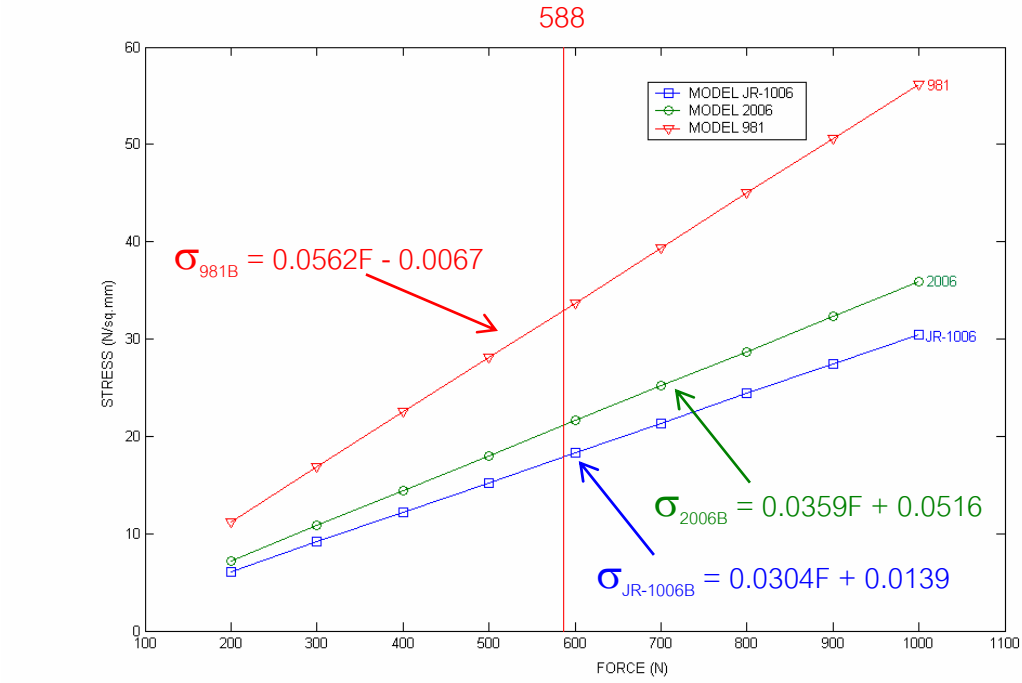
ภาพที่ 94 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006



ภาพที่ 95 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 2006



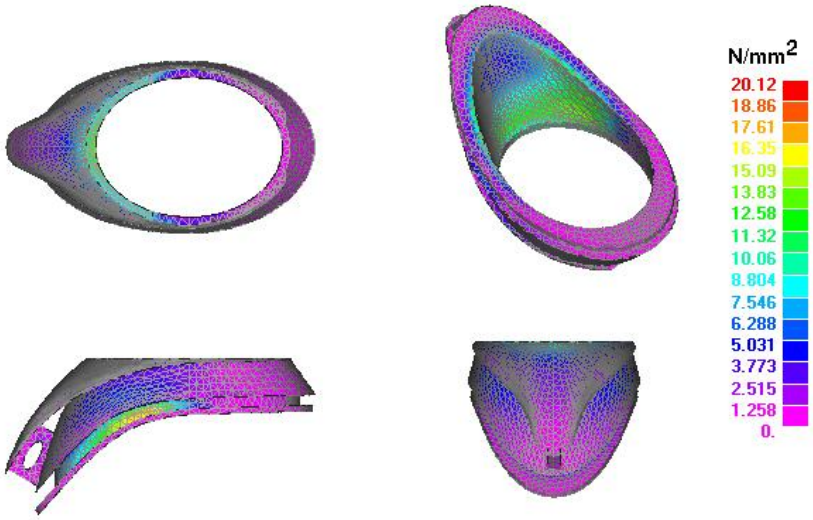
ภาพที่ 96 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 981



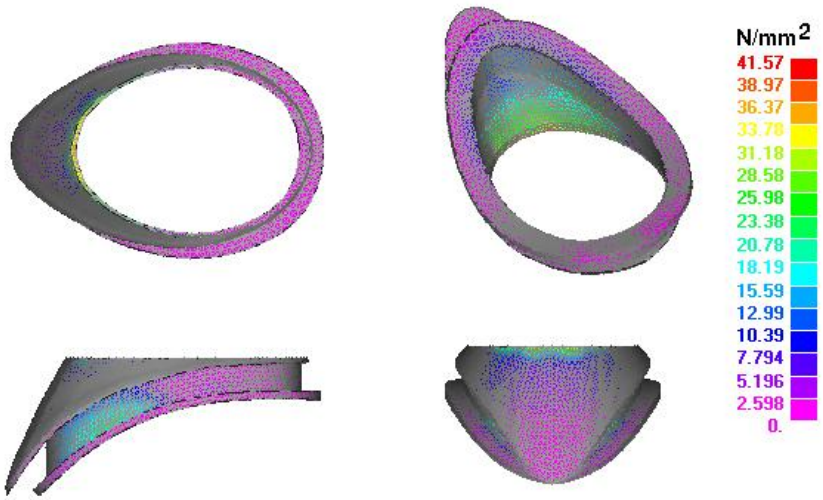
ภาพที่ 97 กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ข ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น

5.3.3 <u>ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค</u>

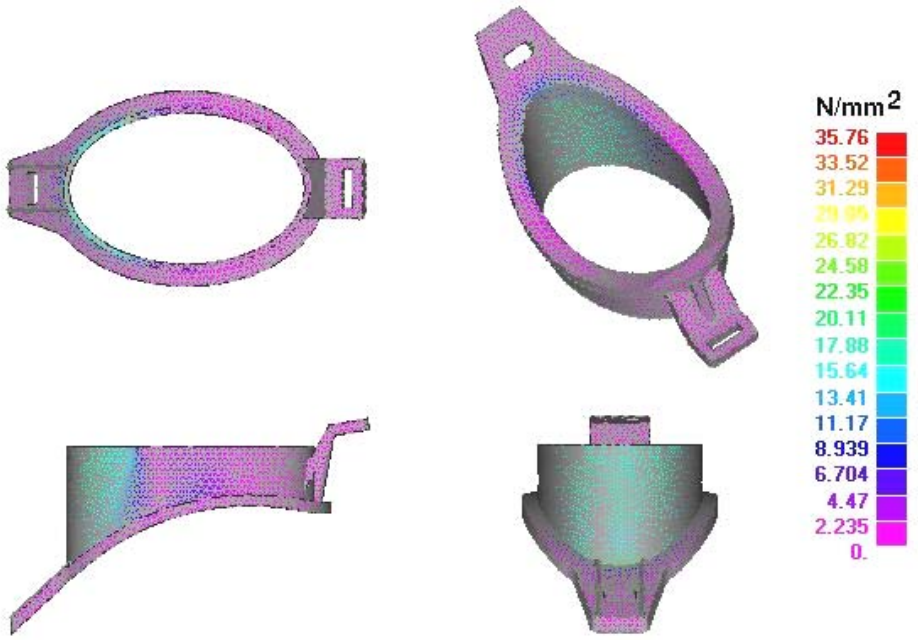
ภาพที่ 98, 99 และ 100 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้นโดยใช้ FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค แสดงเป็นระดับชั้นสี ภายใต้แรงอัดที่ 600 N ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ ความเค้นสูงสุดปรากฏที่กรอบลำตัวของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ ข ภาพที่ 101 แสดงกราฟของความเค้นสูงสุดของถ้วยตา ที่แรงอัด 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ



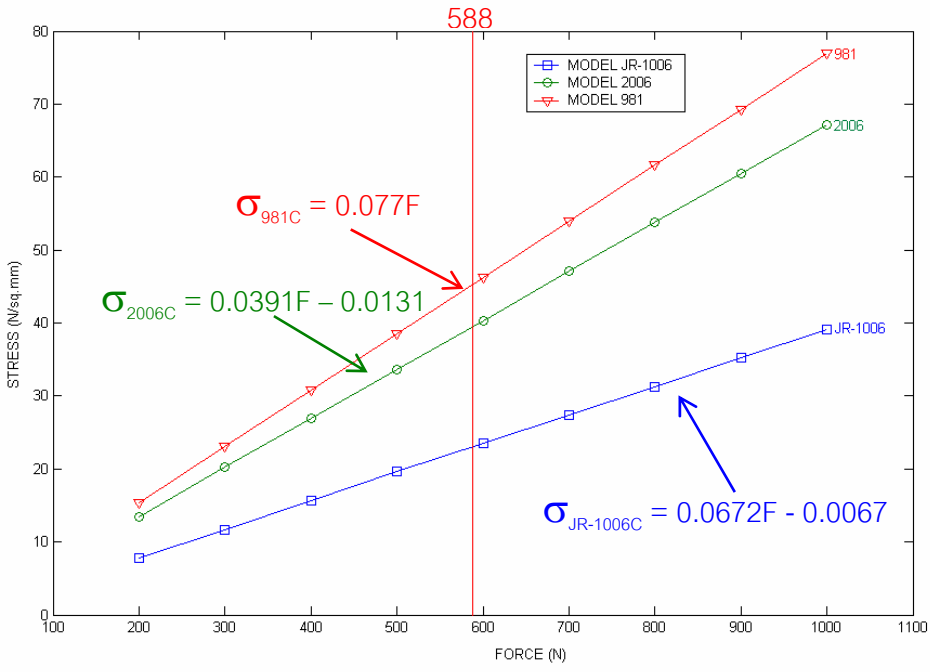
<u>ภาพที่ 98</u> ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น JR-1006



<u>ภาพที่ 99</u> ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 2006



ภาพที่ 100 ความเค้นจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ที่แรงอัด 600 N ของถ้วยตารุ่น 981

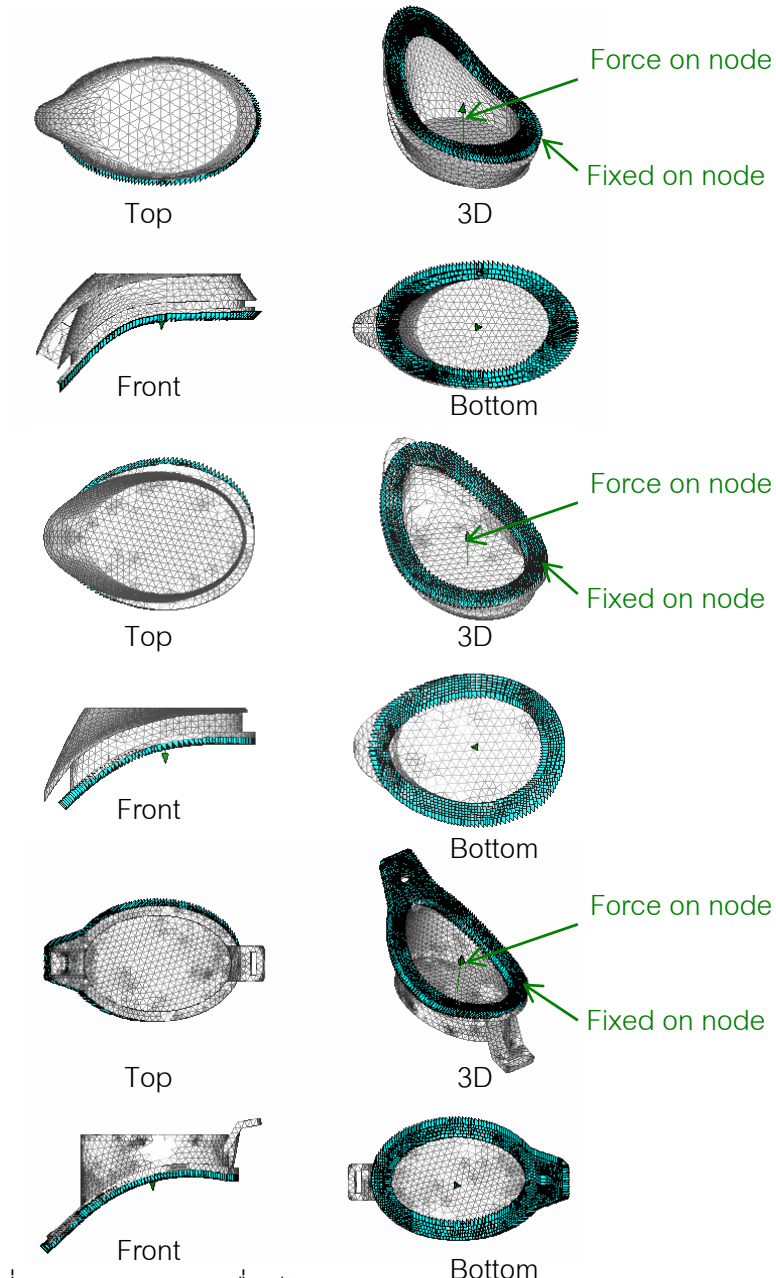


ภาพที่ 101 กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการทดสอบการอัดแบบ ค ในช่วง 200 N ถึง 1000 N ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น

6. ผลการวิเคราะห์การทดสอบการกระแทกเลนส์ถ้วยตาโดยใช้ FEA

6.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM สำหรับวิเคราะห์การกระแทก

แบบจำลอง FEM ของถ้วยตาที่ใช้ในการวิเคราะห์ FEM ใช้แบบจำลองเดียวกันกับ ที่ใช้ในการทดสอบการอัด (ภาพที่ 68) โดยภาพที่ 102 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตำแหน่ง และทิศทาง ของแรงกระแทกที่เกิดจากการตกกระแทกของลูกบอลโลหะ บนผิวเลนส์ของถ้วยตา รุ่น JR-1006 (ภาพที่ 102 ก) รุ่น 2006 (ภาพที่ 102 ข) และ รุ่น 981(ภาพที่ 102 ค)



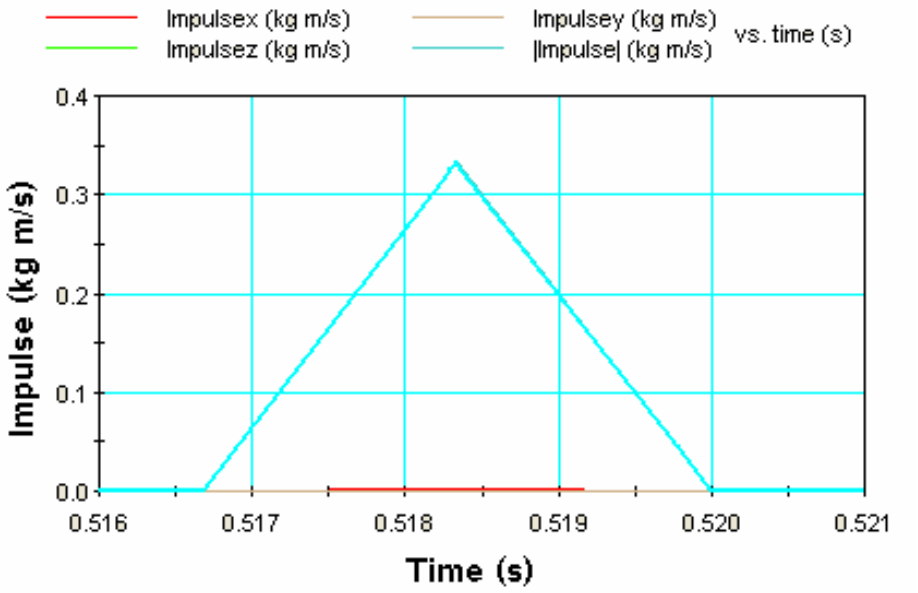
ภาพที่ 102 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ทิศทางและตำแหน่งของแรงกระแทก ของเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 (ก) 2006 (ข) และ 981 (ค)

6.2 การวิเคราะห์แรงกระแทก

การกำหนดแรงกระแทก มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการวิเคราะห์ หาค่า อิมพัลส์ (Impulse) และเวลาที่ลูกบอลโลหะสัมผัสกับผิวหน้าเลนส์ โดยใช้ ซอฟแวร์ MSC.Working Model จำลองการปล่อยลูกบอลโลหะตกลงมากระแทกผิวหน้าเลนส์ของแว่นตาว่ายน้ำ ขั้นตอนที่สองคำนวณค่าแรงที่กระแทกบนผิวหน้าเลนส์จาก อิมพัลส์ ที่เกิดขึ้นแล้วจึงนำค่าแรงกระแทกที่ได้มาทำการวิเคราะห์แบบ Static

ภาพที่ 103 แสดงกราฟของอิมพัลส์ที่วิเคราะห์ได้จากการจำลองลูกบอลโลหะหนัก 44 กรัม ตกจากที่สูง 1.3 เมตร ซึ่งได้ค่าอิมพัลส์เท่ากับ 0.333 kg.m/s และเวลาที่ลูกบอลโลหะสัมผัสกับกับเลนส์ เท่ากับ 0.00333 วินาที แรงกระแทกคำนวณได้จาก อิมพัลส์หารด้วยเวลาซึ่งได้ค่าแรงเท่ากับ 100 N สำหรับการปล่อยลูกบอลโลหะตกจากที่สูง 0.7, 1 และ 1.6 เมตร ขนาดของแรงกระแทกเท่ากับ 73 N, 88 N และ 111 N ตามลำดับ

แรงกระแทกที่วิเคราะห์ได้จากอิมพัลส์นี้ ได้นำไปใช้กำหนดเป็นแรงกระทำบนโหนด ณ จุดที่ลูกบอลตกกระแทกผิวเลนส์ตามเงื่อนไข ได้แสดงไว้แล้ว ในภาพที่ 102 ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ได้สรุปไว้ในภาคผนวกที่ 6

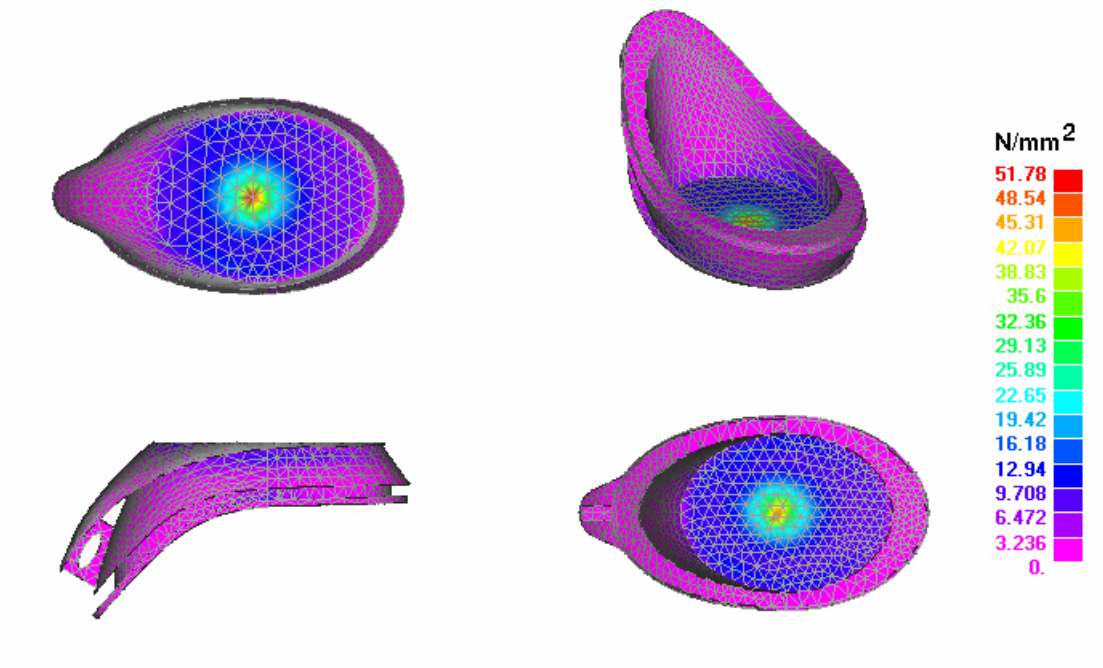


ภาพที่ 103 กราฟของอิมพัลส์ ที่เกิดจากลูกบอลโลหะตกกระแทกผิวหน้าเลนส์ถ้วยตาจากที่สูง 1.3 เมตร

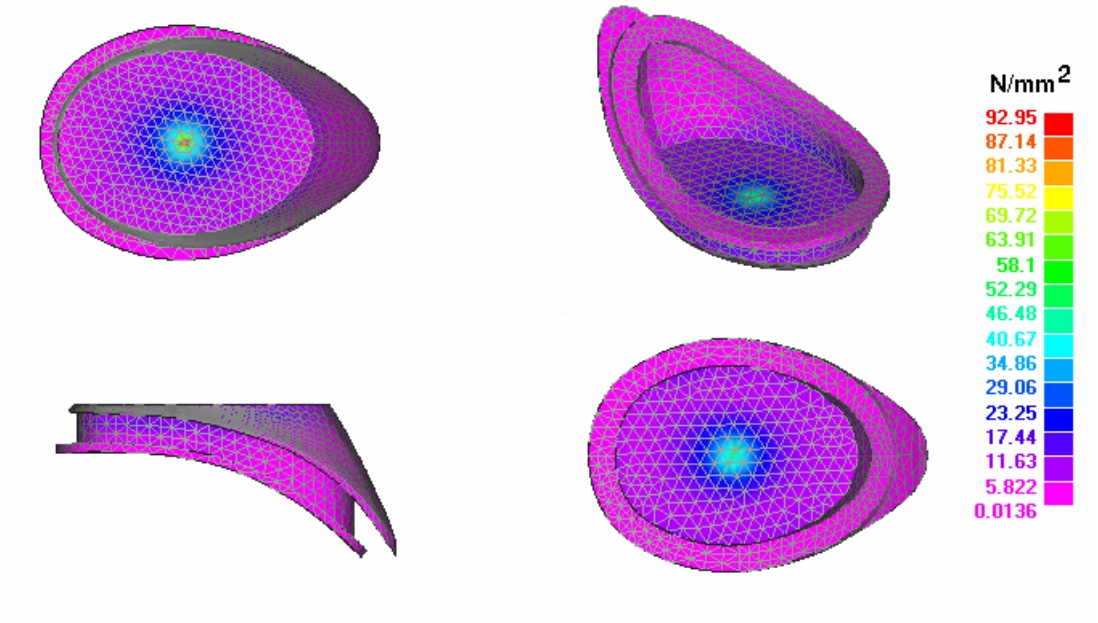
6.3 การวิเคราะห์ความเค้นของการทดสอบการกระแทกโดยใช้ FEA

ผลการวิเคราะห์ FEA แสดงความเค้นที่เกิดจากการปล่อยตกของลูกบอลโลหะหนัก 44 กรัมได้แสดง ในภาพที่ 104 ถึง 106 สำหรับถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่เลนส์ถ้วยตา รุ่น JR-1006 มีค่าเท่ากับ 42.4 N/mm^2 รุ่น 2006 เท่ากับ 43.04 N/mm^2 และ รุ่น 981 เท่ากับ 43.42 N/mm^2 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเลนส์ถ้วยตา ทั้ง 3 รุ่นนี้ไม่เกินค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ (PC) ที่ใช้ทำเลนส์ถ้วยตา (ภาพที่ 52) ซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 53 N/mm^2 ($\pm$5) และค่า Yield อยู่ที่ 52 N/mm^2 ($\pm$7) โดยความเค้นที่ได้ต่ำกว่าค่า Yield แสดงว่าวัสดุไม่ยุบตัวหรือเกิดรอยร้าวสอดคล้องกับผลการทดสอบทางกล

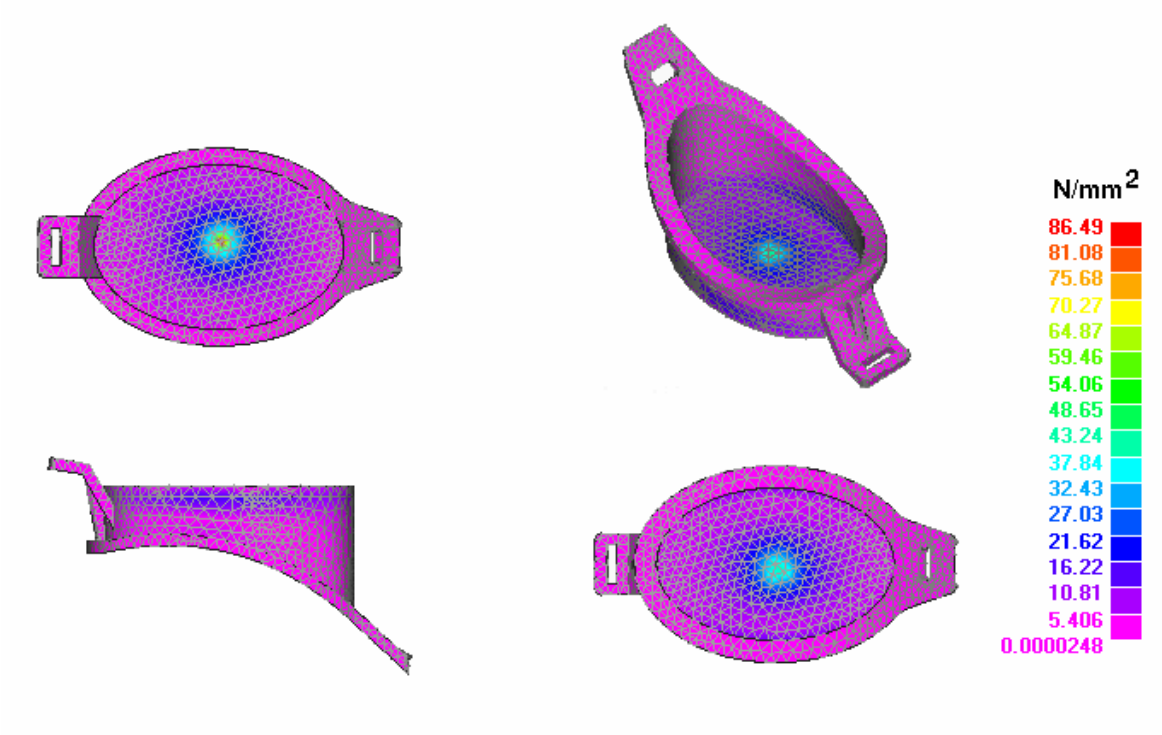
ภาพที่ 107 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นสูงสุดจากผล FEA กับความสูงในช่วง 0.7 ม. ถึง 1.6 ม. ของการปล่อยลูกบอลโลหะตกกระแทกเลนส์



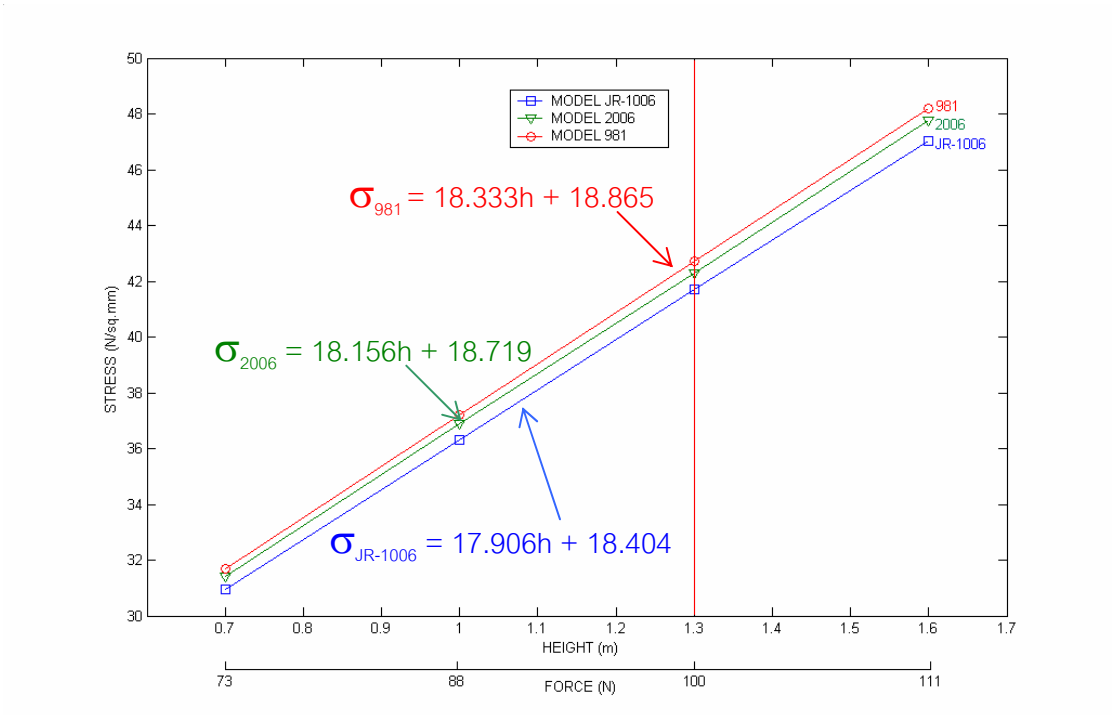
ภาพที่ 104 ความเค้นจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 (ความสูง 1.3 เมตร)



ภาพที่ 105 ความเค้นจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 2006 (ความสูง 1.3 เมตร)



ภาพที่ 106 ความเค้นจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 981 (ความสูง 1.3 เมตร)



ภาพที่ 107 กราฟของความเค้นสูงสุดจากผล FEA ของการกระแทกในช่วงความสูง 0.7 ม. ถึง 1.6 ม. ของเลนส์ถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981

6.4 การวิเคราะห์ความเครียดของการทดสอบการกระแทกโดยใช้ FEA

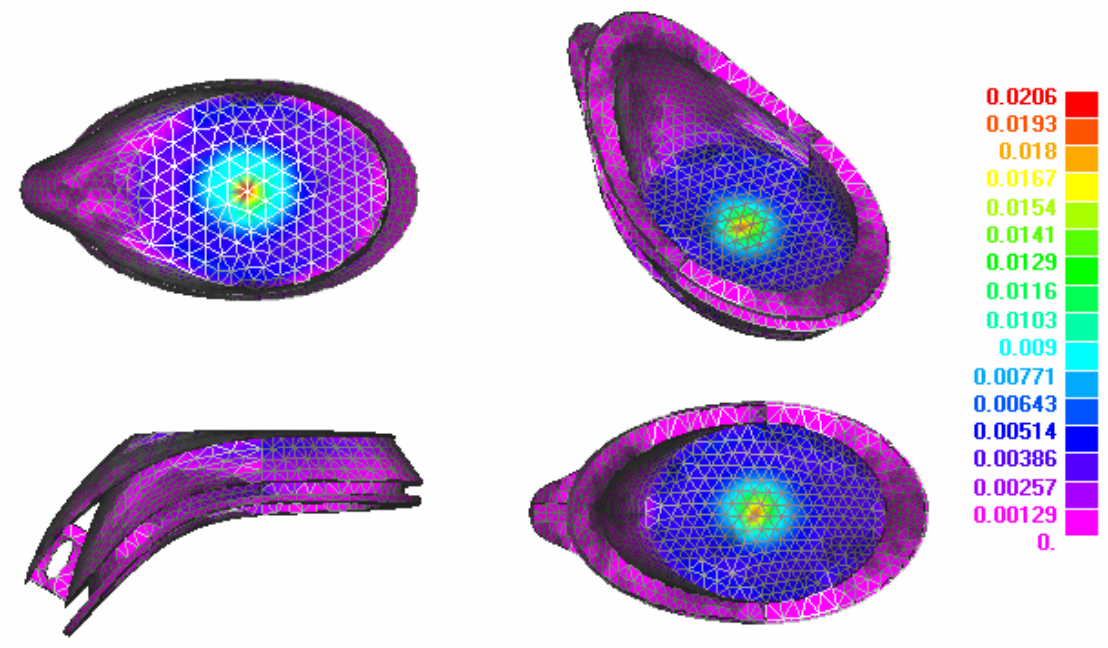
ผลการวิเคราะห์ FEA ของความเครียด (Strain) ของการปล่อยลูกบอลโลหะตกกระแทกเลนส์ เมื่อให้ลูกบอลตกกระแทกเลนส์จากความสูง 1.3 ม. ได้แสดงเป็นระดับชั้นสีในภาพที่ 108 ถึง 110 สำหรับถ้วยตารุ่น JR-1006, 2006 และ 981 ตามลำดับ

ภาพที่ 111 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดจากผล FEA กับความสูงในช่วง 0.7 ม. ถึง 1.6 ม. ของการปล่อยลูกบอลโลหะตกกระแทกเลนส์

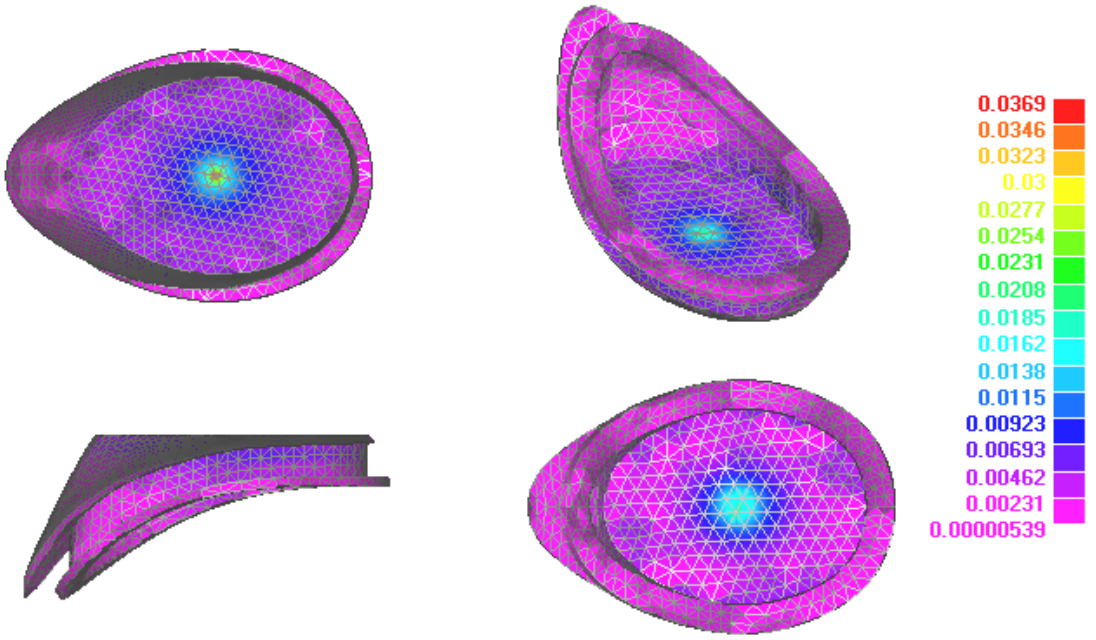
7. ผลการทดสอบความสบายในการสวมใส่โดยใช้ FEA

7.1 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM

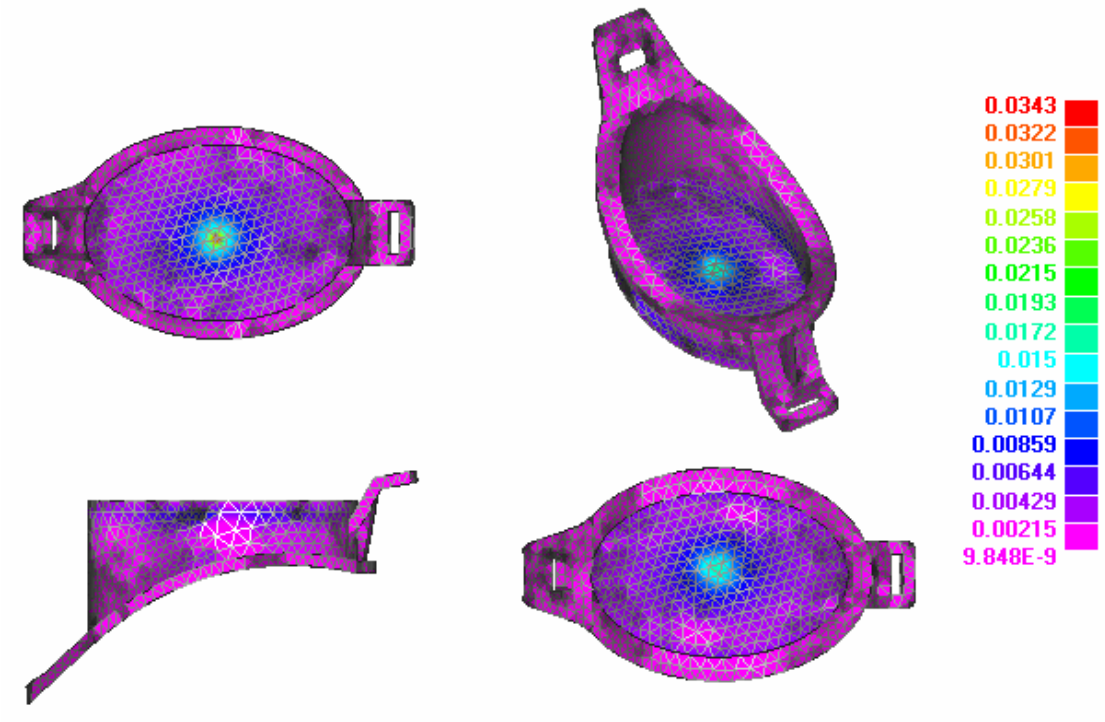
ใบหน้ารูปปั้นศีรษะตามแสดงในภาพที่ 23 เป็นใบหน้าและศีรษะที่ใช้ในการจำลอง FEM ของใบหน้า สำหรับประเมินความสบายในการสวมใส่แว่นตาว่ายน้ำ โดยวิเคราะห์ระยะที่ผิวหนังโดนกดลึกและความเค้นที่เกิดจากการกดบนใบหน้าของส่วนฐานและปะเก็นกันน้ำของแว่นตาว่ายน้ำ



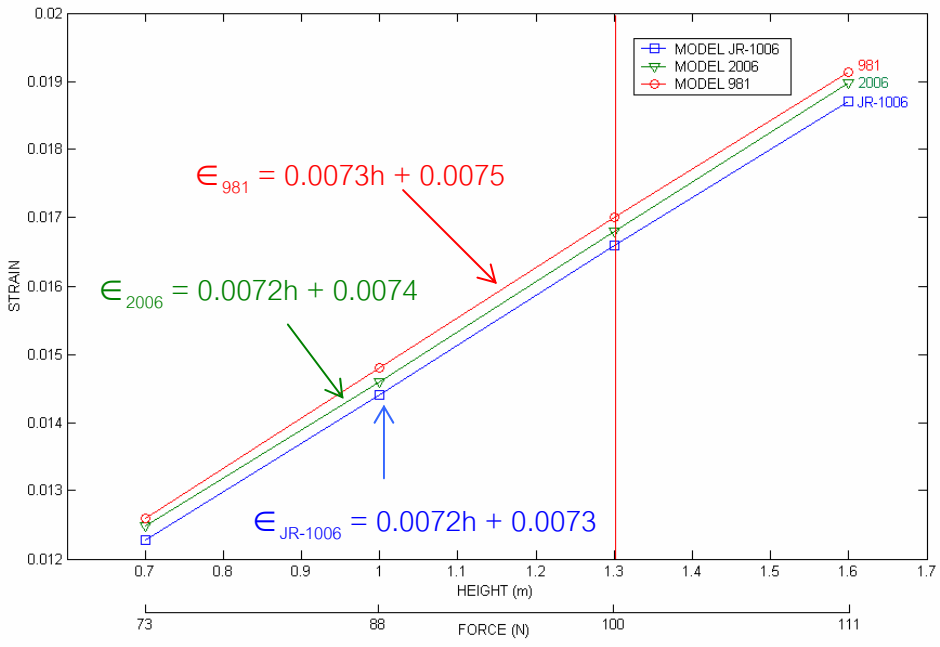
ภาพที่ 108 ความเครียดจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 (ความสูง 1.3 เมตร)



ภาพที่ 109 ความเครียดจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 2006 (ความสูง 1.3 เมตร)

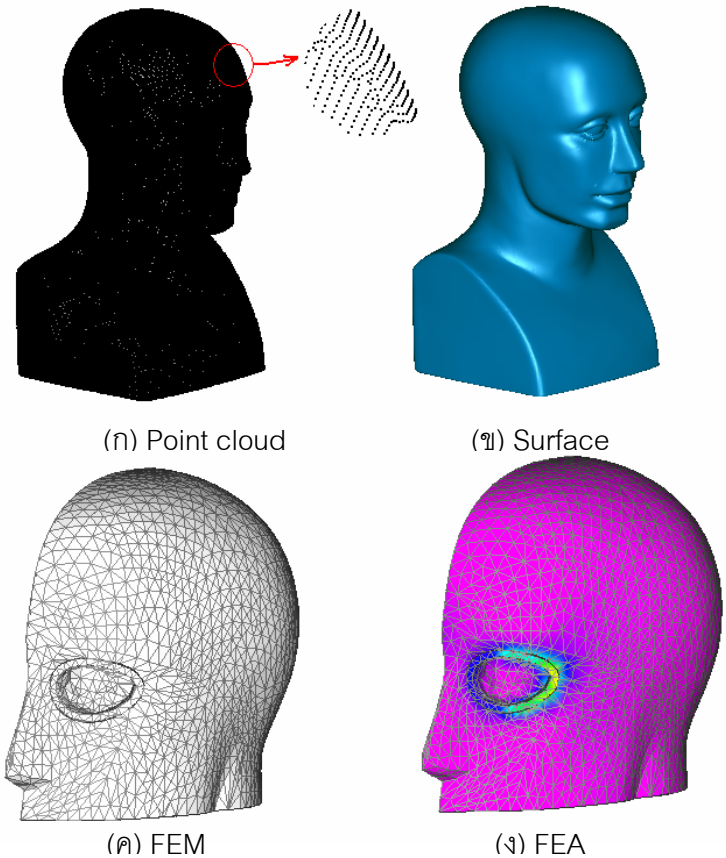


ภาพที่ 110 ความเครียดจากผล FEA ของการกระแทกบนเลนส์ถ้วยตารุ่น 981 (ความสูง 1.3 เมตร)

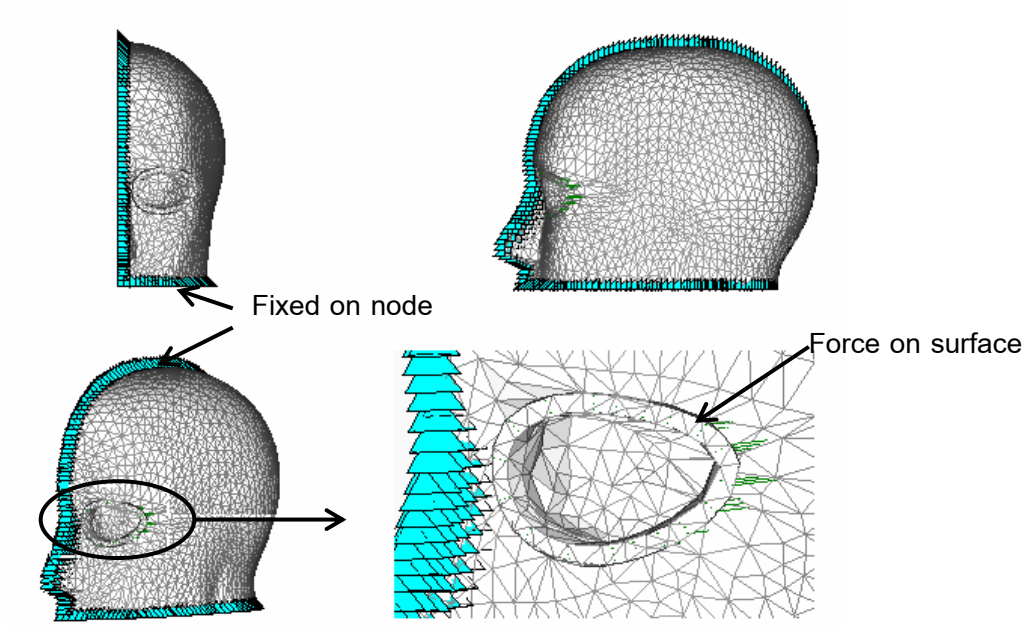


ภาพที่ 111 กราฟของความเครียดสูงสุดจากผล FEA ของการกระแทกในช่วงความสูง 0.7 ม. ถึง 1.6 ม. ของเลนส์ถ้วยตา รุ่น JR-1006, 2006 และ 981

แบบ CAD ของศีรษะสร้างได้จากการสแกนด้วยเครื่อง Optical Scanner (ภาพที่ 24) ภาพที่ 112 ก แสดงจุดโคออดิเนต หรือ Point Cloud บนผิวของรูปปั้นศีรษะที่ได้จากการแสกน ภาพที่ 112 ข แสดงผลการจำลอง CAD ของใบหน้าแบบพื้นผิว (Surface model) ของศีรษะ โดยการเชื่อมต่อจุดที่ได้จากการแสกน จากความเป็นสมมาตรของศีรษะจึงแบ่งครึ่งแบบจำลอง CAD ของศีรษะและนำด้านซ้ายของศีรษะมาใช้ในการวิเคราะห์ FEA บริเวณเบ้าตาบนใบหน้า แบบจำลองครึ่งศีรษะนี้ยังคงเป็นแบบพื้นผิว จึงได้แปลงให้เป็นแบบจำลองโซลิตโมเดล แล้ว จำลองส่วนฐานและปะเก็นกันน้ำของแว่นตาบนใบหน้า ภาพที่ 112ค แสดงการจำลอง FEM ของใบหน้าครึ่งซ้ายพร้อมส่วนฐานเป็นขอบของฐานถ้วยตาที่แนบติดบนใบหน้า แบบจำลอง FEM สำหรับถ้วยตารุ่น 2006 ประกอบด้วย 28,598 โหนด และ18,066 เอลิเมนต์ และของถ้วยตารุ่น 1006 ประกอบด้วย 11,054 โหนด และ 6,609 เอลิเมนต์ ภาพที่ 113 แสดงการกำหนดเงื่อนไข ขอบเขตและทิศทางของแรง



ภาพที่ 112 แบบจำลอง CAD และ FEM ของใบหน้า



ภาพที่ 113 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและทิศทางของแรงสำหรับวิเคราะห์ความสบายในการสวมใส่

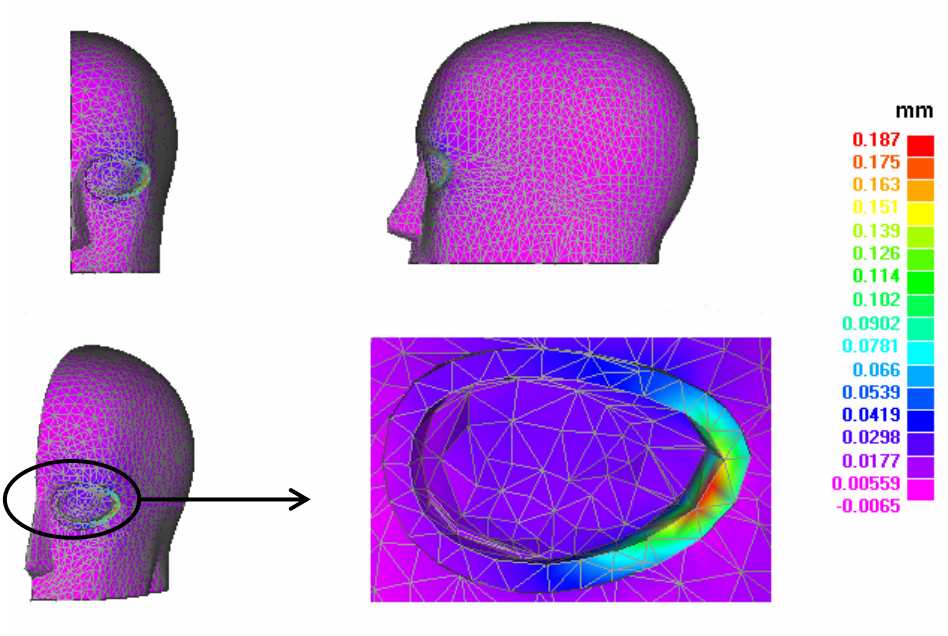
7.2 ผลการวิเคราะห์ระยะยุบบนใบหน้าโดยใช้ FEA

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ การยุบที่เกิดบนใบหน้าตามขอบของแว่นตาว่ายน้ำที่แรงเท่ากับ 5 N ของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น 2006 และรุ่น 1006 ได้แสดงเป็นระดับชั้นสีในภาพที่ 114 และ 115 ตามลำดับ โดยกำหนดค่า E ของผิวหนังเท่ากับ 13.7 N/mm^2 ภาพที่ 116 และ 117 แสดงกราฟของระยะยุบที่ผิวหนัง 4 ตำแหน่ง (a, b, c และ d) ตามขอบแว่นที่แนบบนใบหน้าเมื่อเทียบกับแรงที่ 3, 5, 7 และ 9 N ของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น 2006 และรุ่น 1006 ตามลำดับ

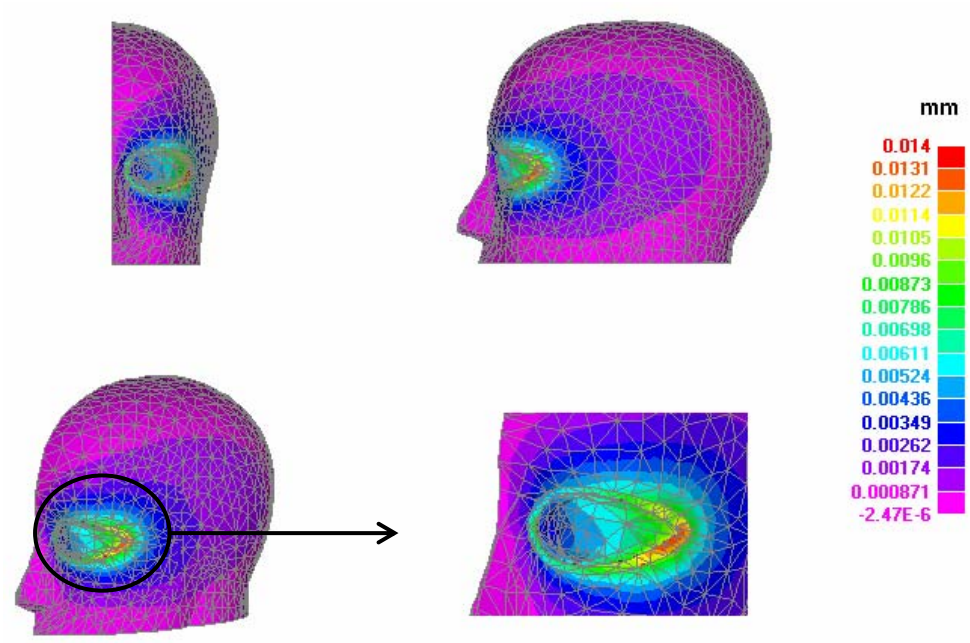
7.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นบนใบหน้าโดยใช้ FEA

ภาพตัวอย่างแสดงระดับชั้นสีของความเค้นจากผล FEA จากแรงกดบนขอบของถ้วยตาเท่ากับ 5 N ของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น 2006 และรุ่น 1006 ได้แสดงในภาพที่ 118 และ 119 ตามลำดับ ภาพที่ 120 และ 121 แสดงกราฟของความเค้นที่ 4 ตำแหน่ง บนฐานของแว่นตาว่ายน้ำรุ่น 2006 และ 1006 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงที่ 3, 5, 7 และ 9 N จุดที่มีความเค้นมากสุดได้แก่จุด C

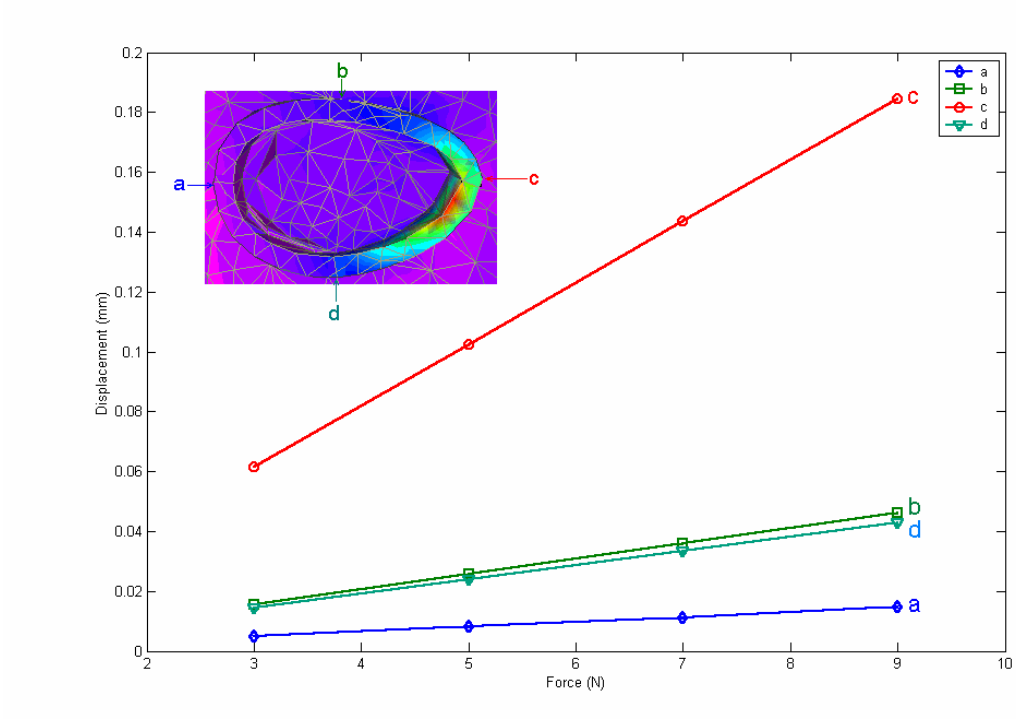
จากการประเมินจากแบบสอบถามจากผู้ทดสอบการสวมใส่จำนวน 50 คน พบความเจ็บปวดอยู่ที่ตำแหน่ง ระหว่าง C กับ D มากที่สุด (70%) ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้โดย FEA



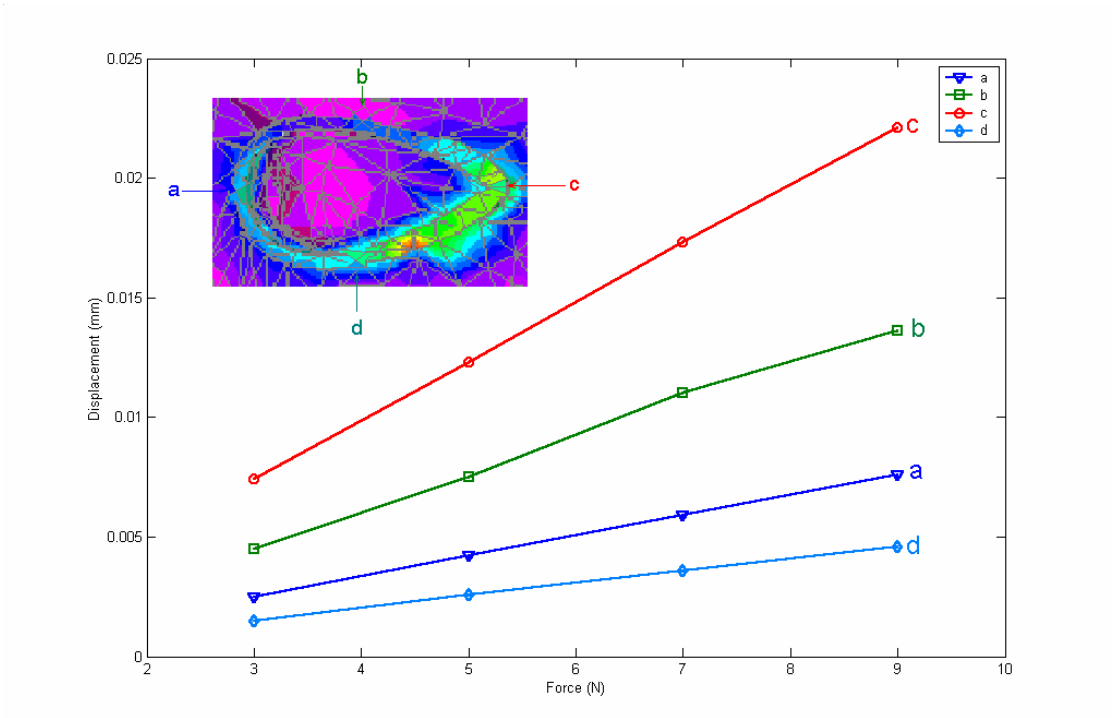
ภาพที่ 114 ผล FEA ของระยะที่ผิวหนังบนใบหน้ายุบเมื่อมีแรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 2006



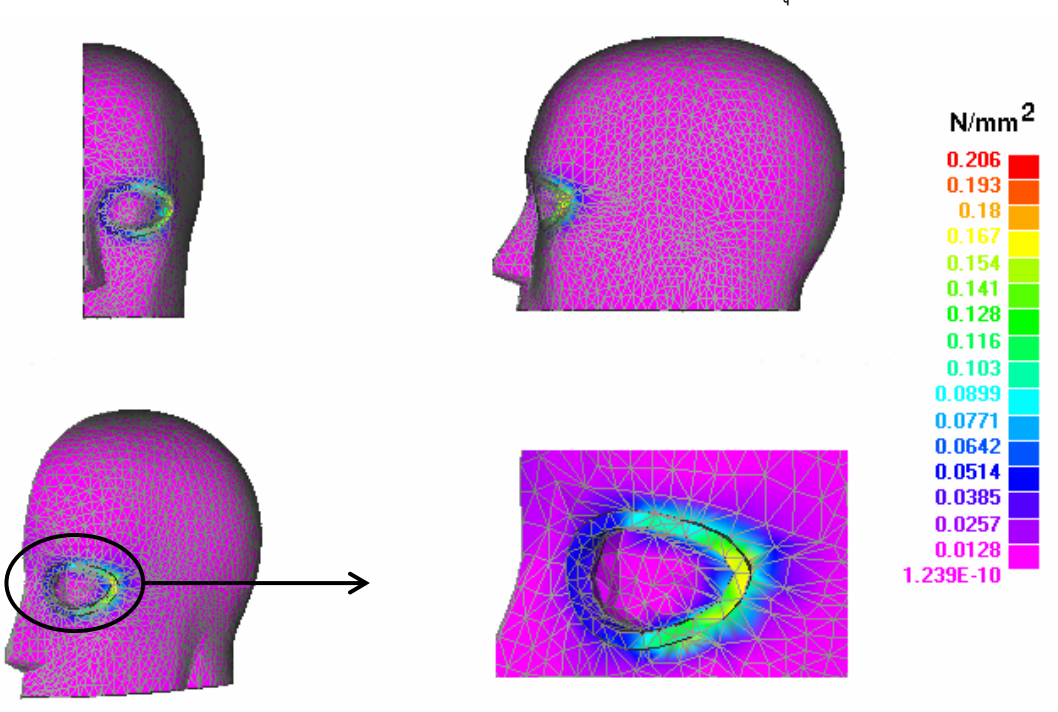
ภาพที่ 115 ผล FEA ของระยะที่ผิวหนังบนใบหน้ายุบเมื่อมีแรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 1006



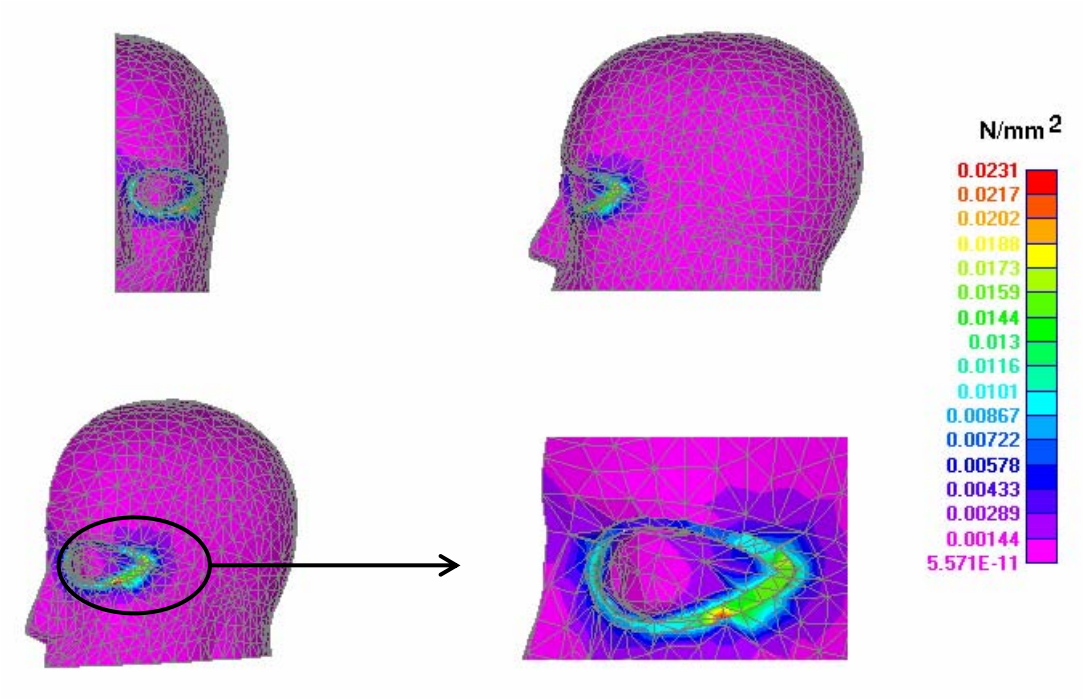
ภาพที่ 116 กราฟของระยะยุบ 4 บริเวณบนผิวหนังจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 2006



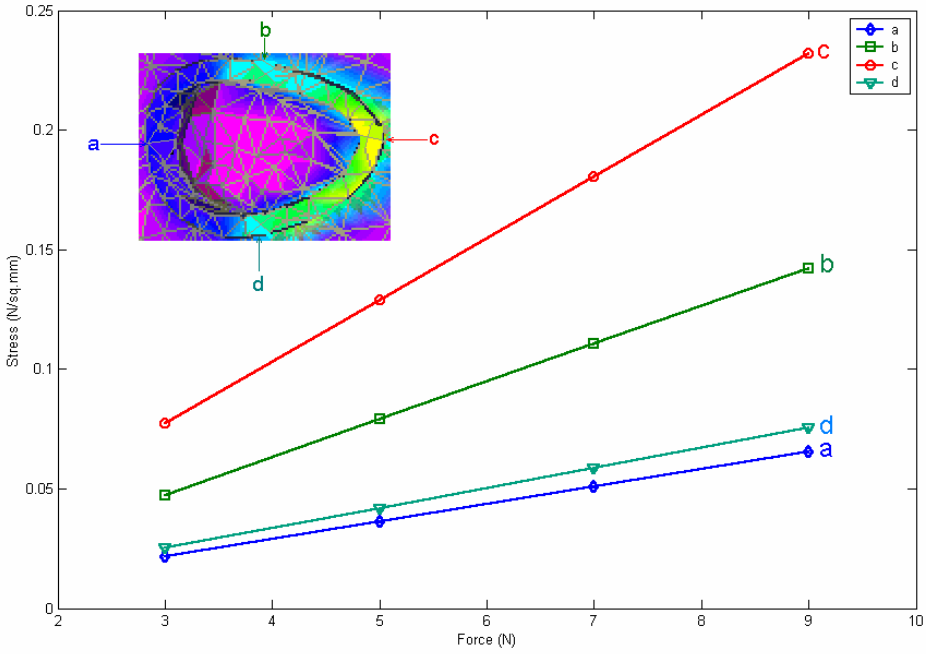
ภาพที่ 117 กราฟของระยะยุบ 4 บริเวณบนผิวหนังจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 1006



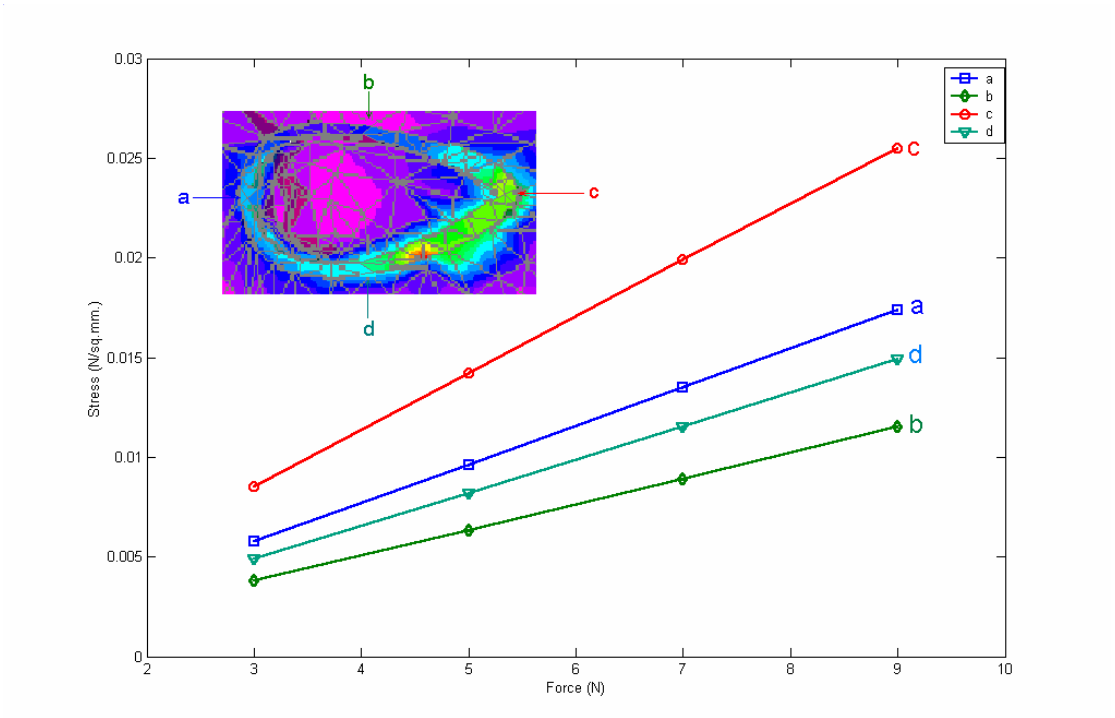
ภาพที่ 118 ความเค้นบนใบหน้าจากผล FEA ที่แรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 2006



ภาพที่ 119 ความเค้นบนใบหน้าจากผล FEA ที่แรงเท่ากับ 5 N ของถ้วยตารุ่น 1006



ภาพที่ 120 กราฟของความเค้น 4 บริเวณบนใบหน้าจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 2006



ภาพที่ 121 กราฟของความเค้น 4 บริเวณบนใบหน้าจากผล FEA ของแรงในช่วง 3 N ถึง 9 N ของการสวมใส่ถ้วยตารุ่น 1006

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ แล้วได้พัฒนาวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (CAD) และได้ทำการศึกษาและทดสอบชิ้นส่วนต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำ ตามมาตรฐานการทดสอบผลิตภัณฑ์แว่นตาว่ายน้ำของ BS5883:1996 โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง (หรือการทดสอบทางกล) โดยผลที่ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ ในการพัฒนาการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบทำให้สามารถออกแบบรูปทรงต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำได้สดวกรวดเร็วและสามารถวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำได้ก่อนทำการผลิตและการทดสอบจริง นอกจากนี้กรรมวิธีและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางกลตามมาตรฐาน BS5883:1996 อันได้แก่ การทดสอบการดึง การทดสอบการอัด และการกระแทกของเลนส์ถ้วยตา ได้พัฒนาให้สามารถทำการทดสอบเบื้องต้นได้ภายในประเทศ

ผลจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การพัฒนากรรมวิธีการออกแบบแว่นตาว่ายน้ำ ชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำที่สำคัญและซับซ้อนมากที่สุดคือถ้วยตา ในงานวิจัยนี้ได้แยกส่วนประกอบของถ้วยตา เป็นรูปทรงเฉพาะแบบหรือฟีเจอร์ได้เป็น 6 กลุ่ม ได้แก่ ส่วนฐาน กรอบลำตัว เลนส์ ตัวหู และอื่นๆ จากการรวบรวมถ้วยตาจำนวน 31 รุ่น สามารถสร้างและรวบรวมจำนวนฟีเจอร์ได้ตามสรุปในตารางที่ 15 โดยแต่ละฟีเจอร์ที่สร้างขึ้นมาเหล่านี้สามารถดัดแปลงและแก้ไขได้ เพื่อให้สามารถนำมาประกอบเป็นรุ่นใหม่ๆ ได้ง่ายและสดวกขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบนำฟีเจอร์ต่างๆ มาประกอบเป็นถ้วยแว่นตารุ่นใหม่เป็นตัวอย่างจำนวน 4 แบบ นอกจากนี้ลำดับขั้นตอนและวิธีการสร้างแต่ละฟีเจอร์ สามารถนำมาใช้ศึกษาการออกแบบที่ซับซ้อนได้ สำหรับชิ้นส่วนอื่นๆ ไม่สามารถจัดแยกเป็นกลุ่มฟีเจอร์ได้และเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปทรงที่ไม่ซับซ้อนมาก ดังนั้นการออกแบบชิ้นส่วนแว่นตาอื่นๆ จะง่ายและสดวกกว่าโดยการขึ้นรูปโดยตรง

ตารางที่ 15 สรุปฟีเจอร์ต่างๆ ของถ้วยตาจำนวน 31 รุ่น

ชิ้นส่วน	จำนวนฟีเจอร์	ชิ้นส่วน	จำนวนฟีเจอร์
ส่วนฐาน	9	ชินหู	3
กรอบลำตัว	11	ชิ้นจมูก	5
เลนส์	6	อื่นๆ	3

2. การทดสอบทางกลของการดึงชิ้นจมูก ได้ทดสอบตามมาตรฐาน BS5883:1996 โดยมีความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบการดึงและการอัดของแรง 0.5% และระยะทาง 0.01 mm จำนวนชิ้นจมูกที่ใช้ในการทดสอบมี 2 รุ่น คือ รุ่น J-1 และ J-10 จำนวนรุ่นละ 5 ชิ้น การทดสอบเริ่มที่แรงดึง 5 N จนชิ้นทดสอบขาด ผลการทดสอบของชิ้นจมูกทั้งสอง แสดงความสัมพันธ์ของระยะยืดและแรงดึงเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในช่วงบันทึกผลตั้งแต่ 5 N ถึง 60 N โดยมีความเบี่ยงเบนของระยะยืดต่ำที่แรงดึงต่ำและเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดึงเพิ่ม การฉีกขาดเกิดขึ้นที่จุดจับยึดชิ้นจมูก

3. การทดสอบทางกลของการอัดถ้วยตา ได้ทดสอบถ้วยตารูปทรงต่างๆ จำนวน 3 รุ่น จำนวนรุ่นละ 5 ชิ้น แล้วบันทึกค่าระยะยุบตัวและแรงอัด ที่แรงอัดตั้งแต่ 0 N ถึง 1000 N ผลทดสอบนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวกับแรงอัดเป็นแบบเชิงเส้น ถ้วยตารุ่น JR-1006 มีค่าเบี่ยงเบนของระยะยุบตัวอยู่ในช่วง 0.016 ถึง 0.035 mm รุ่น 2006 มีค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 0.018 ถึง 0.053 mm และ รุ่น 981 มีค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 0.025 ถึง 0.053 mm โดยในแต่ละรุ่นจะมีค่าเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น ที่แรงกดทดสอบสูงสุด (1000 N) ไม่ปรากฏความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงรูปทรง (บุบยุบ) อย่างถาวร

4. การทดสอบทางกลของการกระแทกเลนส์ถ้วยตา ได้ทดสอบด้วยลูกบอลโลหะหนัก 44 กรัม ปล่อยตกที่ความสูง 0.7 เมตร ถึง 1.6 เมตร ที่ความสูงทดสอบสูงสุดที่ 1.6 เมตร พบว่าถ้วยตาของแว่นตาว่ายน้ำ ทั้ง 3 รุ่น ไม่ปรากฏความเสียหาย การบุบยุบอย่างถาวรและไม่พบรอยร้าวบนผิวเลนส์

5. การสร้างแบบจำลอง FEM ของชิ้นจมูกและถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ แบบจำลอง Finite Element Model (FEM) ของชิ้นจมูกและถ้วยตาเพื่อใช้วิเคราะห์หาระยะยืดหรือระยะยุบตัวและความเค้น เนื่องด้วยรายละเอียดของรูปแบบของชิ้นจมูกและถ้วยตามีความซับซ้อนสูงและความหนาไม่คงที่จึงต้องใช้เอลิเมนต์รูปทรงโซลิต 3 มิติ แบบ Tetrahedral รายละเอียดที่สูงและซับซ้อนจึงทำให้การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เล็กลง จึงทำให้มีจำนวนโหนดและเอลิเมนต์จำนวนมาก วัสดุของเอลิเมนต์ (PVC และ PC) ใช้เป็น Isotropic

6. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบการดึงชิ้นจมูก ของชิ้นจมูกทั้งสองรุ่นได้ความสัมพันธ์ของระยะยืดและแรงดึงเป็นแบบเส้นตรงเช่นเดียวกับผลการทดสอบทางกล แต่ความชันของเส้นน้อยกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (e_{AVG}) ของทั้งสองรุ่น เท่ากับ 11.00%

7. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบการอัดถ้วยตาแว่นตาว่ายน้ำ ของถ้วยตาทั้ง 3 รุ่น พบแบบจำลอง FEM แบบ ค (ไม่มีเลนส์ และใช้แรงกดเป็นบริเวณ 1/4 ตามขอบบนของกรอบลำตัว) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยมี e_{AVG} อยู่ในช่วง –4.208% ถึง 0.285%

8. เมื่อพิจารณาจากการทดสอบทางกลพบว่าทั้งการทดสอบการดึงและการทดสอบการอัด ความสัมพันธ์ของระยะยืดและระยะบุบกับแรง เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ค่าทดสอบสูงสุดเป็น 6 เท่า สำหรับการทดสอบการดึง และ 1.7 เท่าสำหรับการอัด จากค่ามาตรฐานทดสอบของ BSI ดังนั้นการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุสามารถกำหนดเป็นแบบเชิงเส้นได้ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ FEA

9. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทดสอบการกระแทกเลนส์แว่นตาว่ายน้ำ ได้วิเคราะห์จากอิมพัลส์แล้วแปลงเป็นแรงสถิตย์ ผลจาก FEA ที่ความสูง 1.6 ม. หรือ 1.23 เท่าของความสูงที่ทดสอบตาม BSI แสดงค่าความเค้นสูงสุด ค่าเท่ากับ 47.045 N/mm^2 สำหรับเลนส์ถ้วยตารุ่น JR-1006 ค่าความเค้นเท่ากับ 47.775 N/mm^2 สำหรับ รุ่น 2006 และ 48.197 N/mm^2 สำหรับรุ่น 981 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเลนส์ถ้วยตา ทั้ง 3 รุ่น ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุดของโพลีคาบอเนต ที่ได้จากการทดสอบตามภาพที่ 52 (53 N/mm^2) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำเลนส์ถ้วยตา และผล FEA ของค่าความเครียด (0.0192) ต่ำกว่าค่าความเครียดที่ค่าความเค้นสูงสุด (0.103) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเลนส์ไม่เกิดการบุบยุบถาวร สอดคล้องกับการทดสอบจริง

10. ผลการวิเคราะห์ FEA ของความสบายในการสวมใส่ ได้วิเคราะห์โดยใช้แรงกดบนขอบของกรอบถ้วยตาจำนวน 2 รุ่น รอบดวงตาขนาด 3, 5, 7 และ 9 N ผลจาก FEA ที่ได้พบว่าบริเวณหางตาจะเกิดความเค้นและระยะยุบมากที่สุด ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องจากการประเมินโดยใช้ผู้ทดสอบสวมใส่จริง ผลที่ได้นี้ยังไม่สามารถระบุเป็นระดับความสบายของการสวมใส่ได้เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลของค่าความเค้นบนใบหน้าที่จะระบุความเจ็บปวด หลักการเบื้องต้นจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อให้ทางคณะผู้วิจัยดำเนินการต่อในอนาคตได้ภายหลังสิ้นสุดโครงการวิจัยนี้

11. ตัวแปรความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ และผล FEA มีปัจจัยต่างๆ ดังนี้
    - ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด วิธีทดสอบหาคุณสมบัติทางกล วัสดุที่นำมาใช้ทดสอบซึ่งไม่สามารถควบคุมกรรมวิธีการผลิตให้ใกล้เคียงได้
    - ความคลาดเคลื่อนจากการจำลอง FEM เช่นการกำหนดขอบเขตและโหลด เป็นตำแหน่งตายตัว แต่ในขณะทดสอบจะเกิดการเคลื่อนตัวของชิ้นงานและ Fixture ที่ใช้รองชิ้นงาน
    - ความคลาดเคลื่อนของแบบที่ใช้จำลอง FEA เช่นความหนาของชิ้นงาน ไม่สามารถวัดได้แม่นยำ เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็ก และโปร่งใส

12. ผลจากการวิจัยนี้สามารถทำให้บริษัทประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาลงได้โดย
    - ประหยัดเวลาในกระบวนการสร้างแบบแว่นตาว่ายน้ำรุ่นใหม่ ตั้งแต่เริ่ม ออกแบบโดยใช้ CAD จนถึงขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์เพื่อการผลิต ลงได้ 50%
    - ประหยัดเวลาในออกแบบแว่นตาว่ายน้ำรุ่นใหม่ ได้ 80% หากเป็นการนำแบบแว่นตาว่ายน้ำรุ่นเก่ามาแก้ไขให้เป็นแบบใหม่ โดยระยะเวลาในการออกแบบขึ้นอยู่กับความชำนาญและประสบการณ์ของผู้ออกแบบซึ่งจำเป็นต้องเป็นผู้ที่มีหน้าที่ในการออกแบบและใช้ซอฟต์แวร์เป็นหน้าที่ประจำ
    - ช่วยเพิ่มผลผลิตเนื่องจากการลดขนาดของชิ้นส่วนแว่นตาว่ายน้ำ ทำให้ใช้วัตถุดิบลดลงเป็นผลให้ใช้เวลาในการฉีดต่อชิ้นลดลงด้วย และลดพลังงานที่ใช้ในการผลิต
    - ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขแม่พิมพ์ หากแว่นตาว่ายน้ำรุ่นนั้นไม่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกล จาก BSI

เอกสารอ้างอิง

1. ทานตววรณ เต็กชื่น, นิรันดร์ จันรัสมี, อดิศักดิ์ แก้วใส. 2544. พลาสติก1. สำนักพัฒนาเทคนิคศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ,กรุงเทพฯ.

2. บรรเลง ศรนิล. 2539. เทคโนโลยีพลาสติก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ. น. 59-66.

3. บริษัทไทยโพลีคาร์บอเนต จำกัด. สมบัติทางกายภาพของ PC S-3000UR.

4. บริษัท บางกอก พีวีซี (1996) จำกัด. Physical properties of PVC Compound.

5. http://www.ptli.com/testlopedia/tests/tensile-plastics-D638-ISO527.asp, 10 มีนาคม 2546.

6. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์. 2545. โซลิตโมเดล เทคโนโลยีที่แท้จริงสำหรับการออกแบบ. **วิศวกรรมสาร** 55 (7): 37- 43.

7. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์. 2545. การจัดระบบ CAD/CAM/CAE ให้เหมาะสมกับธุรกิจ ตอนที่ 2. **ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม** 9 (2): 73-79.

8. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์. 2545. การจัดระบบ CAD/CAM/CAE ให้เหมาะสมกับธุรกิจ ตอนที่1. **ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม** 9 (1): 106-111.

9. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์ และคณะ. การออกแบบภาชนะบรรจุของเหลวโดยกรรมวิธีวิศวกรรม, สกว, เมษายน 2546.

ภาคผนวก

ภาคผนวก 1
คุณลักษณะเฉพาะของชุดทดสอบการดึงและการอัด

ภาพผนวกที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะของชุดทดสอบการดึงและการอัด

HOUNSFIELD

LTD.

HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT

H50K-S MATERIALS TESTING MACHINE

- Double column load frame with 50kN capacity
- Speed range 0.001 to 500 mm/min
- Set speed resolution 0.001 mm/min
- Speed accuracy 0.005%
- Extension resolution 0.001 mm
- Extension accuracy 0.01 mm
- Force measurement conform to EN10002-2, ASTM E4, DIN 51221
- Accuracy 0.5% of applied force
- Available, load cells: 5,10,25,50,100,250,500N
- 1kN,2.5kN,5kN,10kN,25kN,50kN
- Automatic identification of load cell
- Large backlit graphical display
- Storage and retrieval of 5 Test profiles
- Alpha numeric keypad
- Multi unit
- Multi language
- High resolution graphical output direct to standard printer
- Programmable Limits, Force, Extension, Auxiliary and Jog
- Automatic auxiliary equipment recognition
- PC Control Mode for use with HOUNSFIELD QMAT-Software (Win 95,98,NT)
- Height 1620mm, Width 720mm, Depth 500mm, Weight 180kg

The H50K-S materials testing machine is designed to test a wide range of materials including: Plastic, Rubber, Metals, Timber, Packaging materials, Textiles, Leather, Chains, Wires, Medical products and components etc. in Tension, Compression, Shear, Tear, Flexural and Peel.

Through advanced technology and quality engineering Hounsfield has produced this machine which is accurate and easy to use. Powerful as a stand-alone unit, the machine capability is enhanced by the functionality of connecting it direct to a standard printer and obtain a comprehensive test report by pressing a single key.

The Hounsfield H50K-S machine can be used in laboratory and factory environments. It is designed to work with the full range of contacting and non-contacting Hounsfield extensometers.

By connecting the H50K-S to a PC and operating under Hounsfield QMAT Software, the most complex tests are made simple to create or run. The Software does also include statistical data analysis and storage.

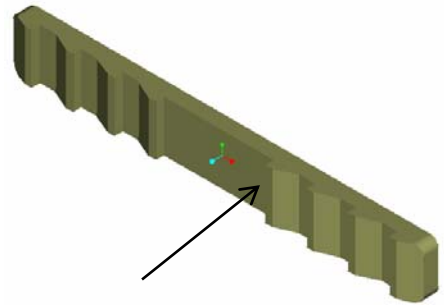
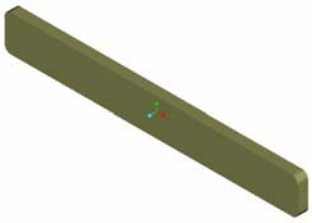
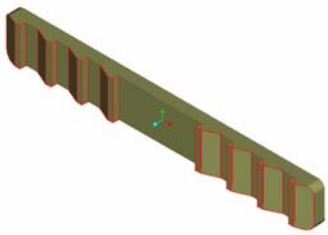
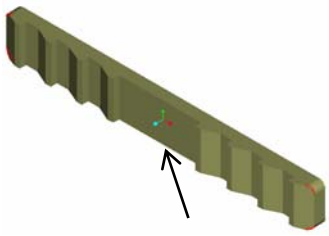
Hounsfield guarantees the resolution and accuracy of the machine by providing a traceable calibration certificate free of charge.

ภาคผนวก 2
การสร้างโซลิตโมเดลของชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ

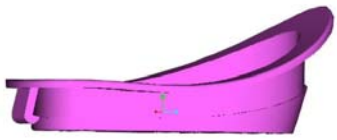
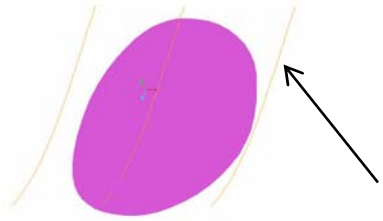
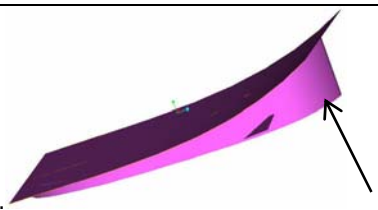
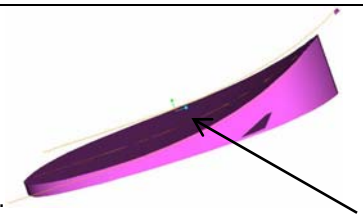
การจำลองแบบโดยใช้ CAD

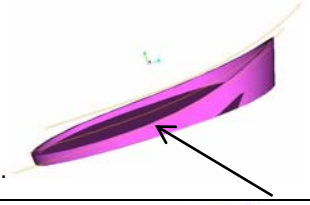
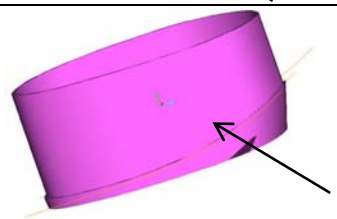
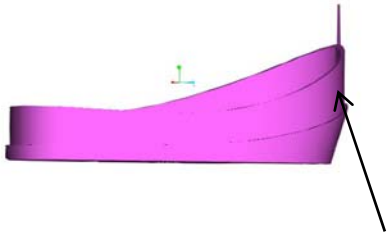
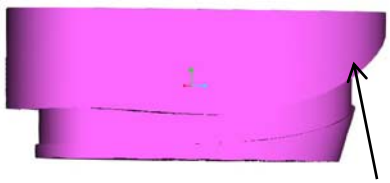
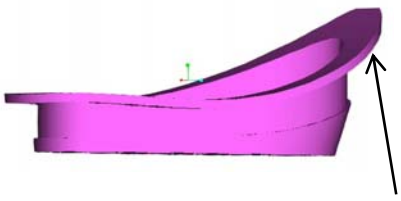
ชิ้นส่วนต่างๆ ของแว่นตาว่ายน้ำ ประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้ Lens และ Eye Cup, Lipseal, Joint, Buckle และสายรัด ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนนั้นมีวิธีการสร้างให้เป็นโซลิดโมเดล ที่ต่างกันออกไป โดยสามารถสรุปวิธีการสร้างส่วนต่างๆ ของชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำได้ดังนี้

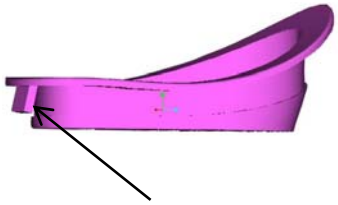
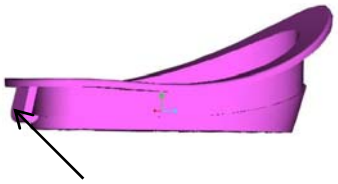
1. **การสร้าง Joint**

<table>
<tr><th>โซลิดโมเดล</th><th>รูปทรงเฉพาะแบบ (Feature)</th><th>คำสั่ง</th></tr>
<tr><td rowspan="3">  </td><td> 
1.</td><td>Create : Solid
↓
Protrusion
↓
Extrude</td></tr>
<tr><td> 
2.</td><td>Create : Solid
↓
Protrusion
↓
Extrude</td></tr>
<tr><td> 
3.</td><td>Create : Solid
↓
Cut
↓
Extrude</td></tr>
</table>

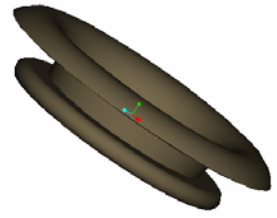
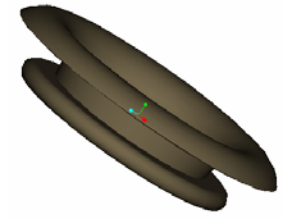
2. **<u>การสร้าง โซลิตโมเดล ของ Lens และ Eye cup</u>**

โซลิตโมเดล	รูปทรงเฉพาะแบบ (Feature)	คำสั่ง
	1.	Create : Surface ↓ Flat ↓ Extrude
	2. 	Create ↓ Datum ↓ Curve
	3.	Create : Surface ↓ Advance ↓ Boundaries
	4. 	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Extrude
	5.	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Use Quilt
	6. 	Create : Solid ↓ Cut ↓ Extrude

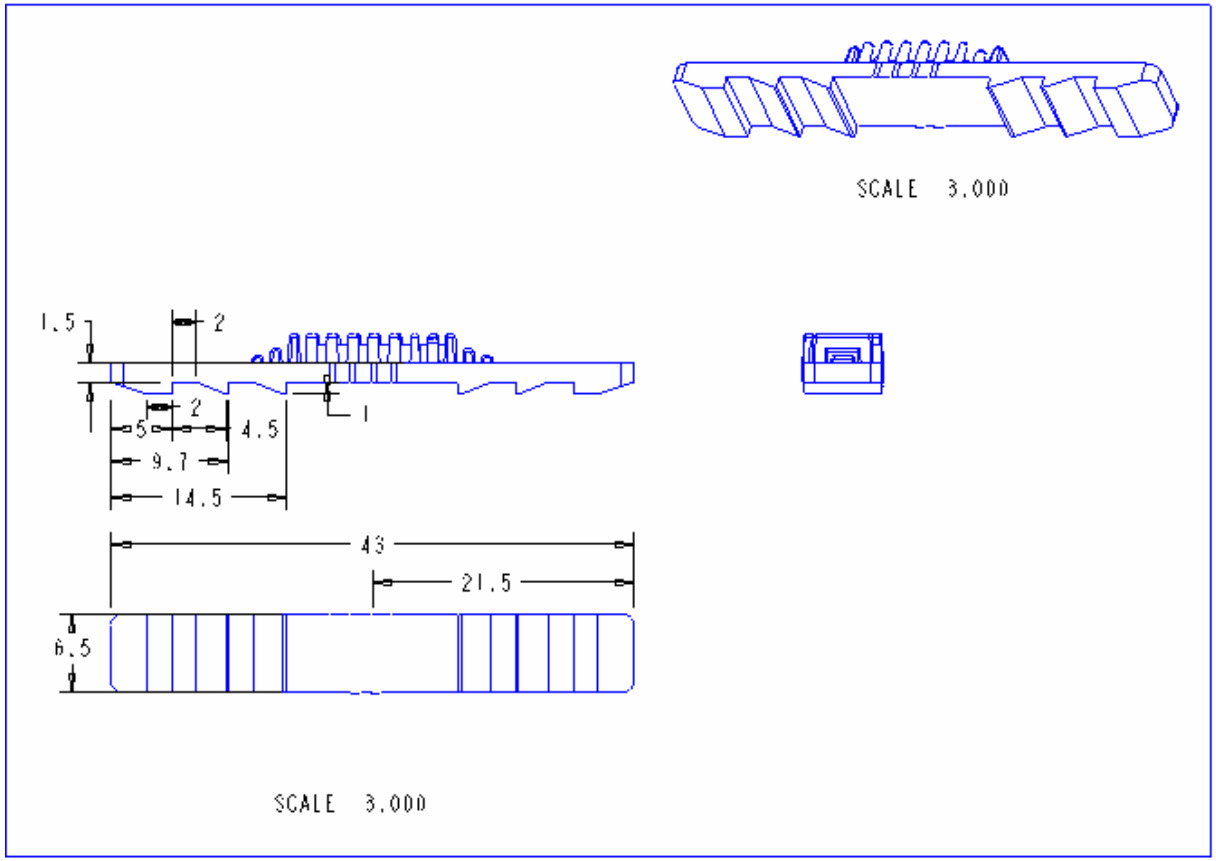
โซลิตโมเดล	รูปทรงเฉพาะแบบ (Feature)	คำสั่ง
	7.	Create : Solid ↓ Cut ↓ Extrude
	8. 	Create : Solid ↓ Shell
	9. 	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Extrude
	10. 	Create : Solid ↓ Cut ↓ Extrude
	11. 	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Extrude
	12. 	Create : Solid ↓ Cut ↓ Extrude

โซลิตโมเดล	รูปทรงเฉพาะแบบ (Feature)	คำสั่ง
	13. 	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Extrude
	14. 	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Extrude

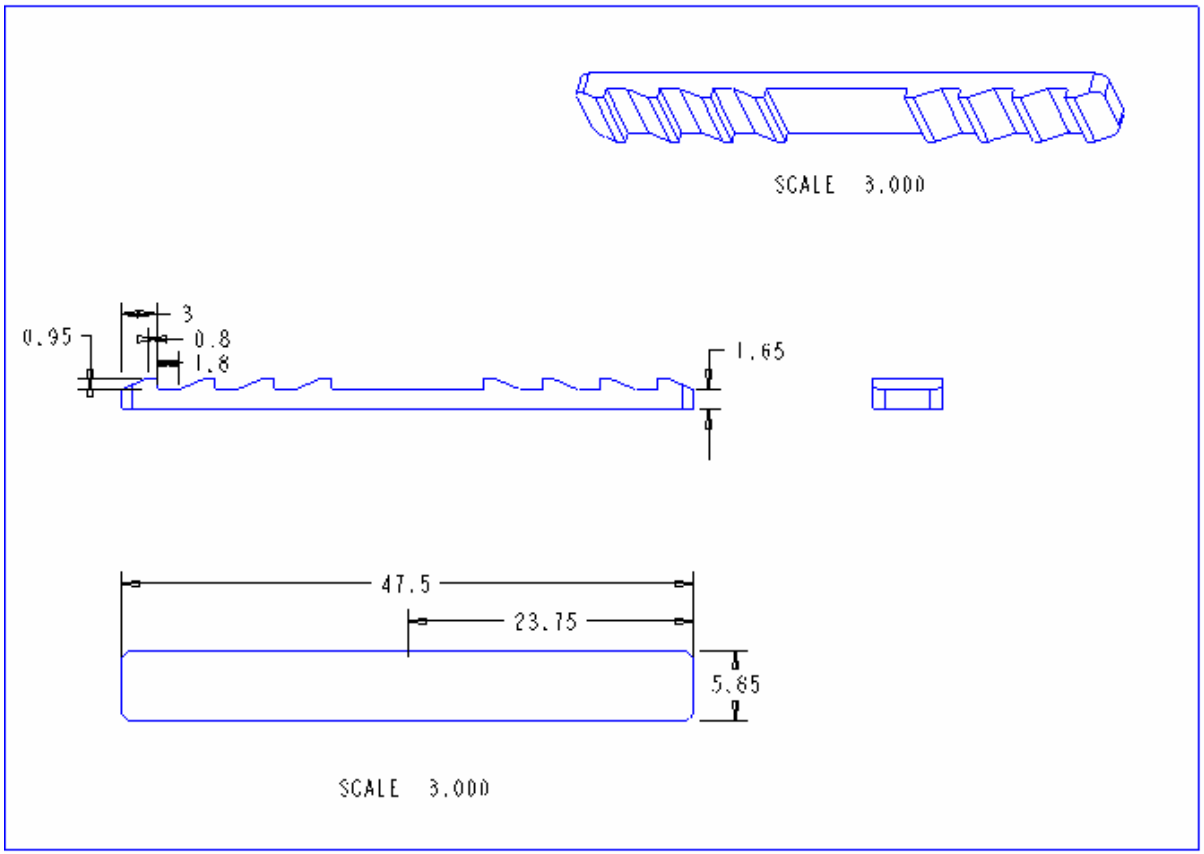
3. **<u>การสร้าง Lip seal</u>**

โซลิตโมเดล	รูปทรงเฉพาะแบบ (Feature)	คำสั่ง
	1. 	Create : Solid ↓ Protrusion ↓ Revolve : Thin

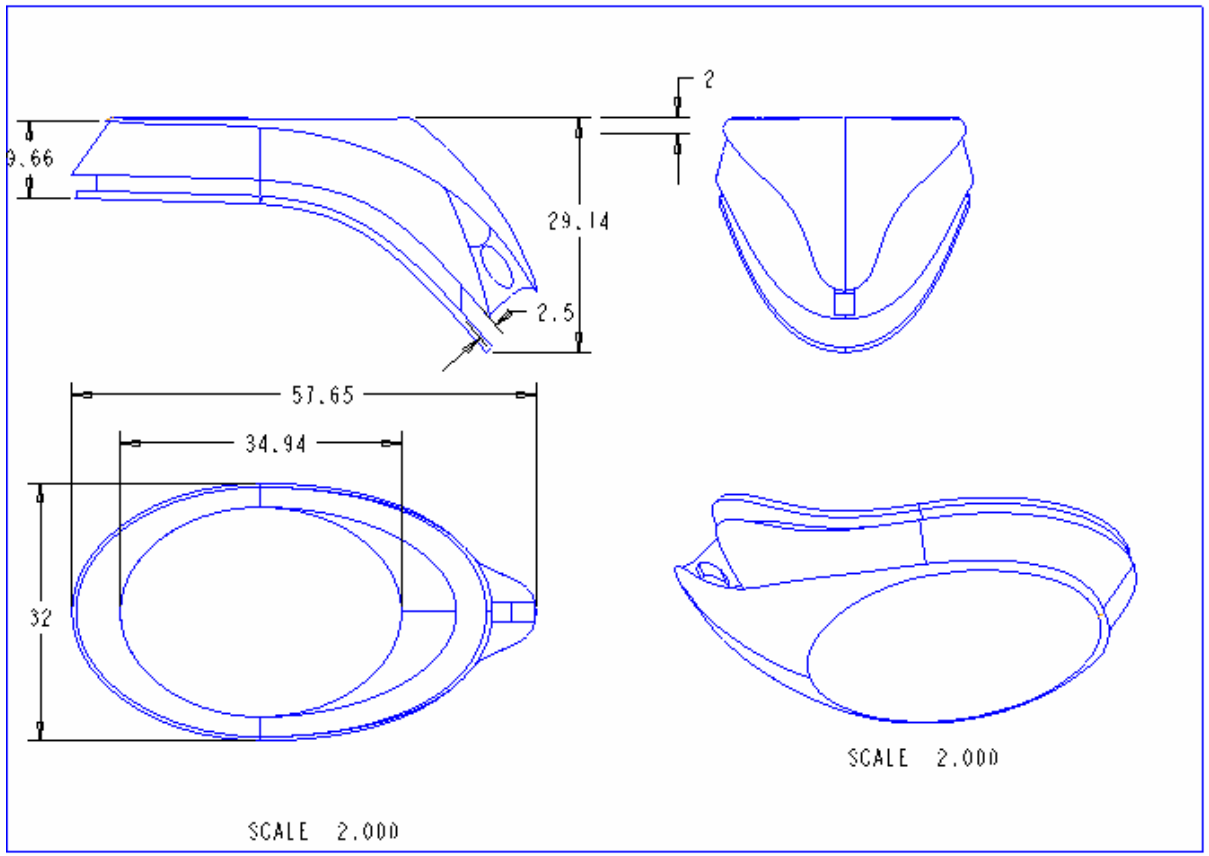
ภาคผนวก 3
ภาพวาดรายละเอียดของชิ้นส่วนของแว่นตาว่ายน้ำ



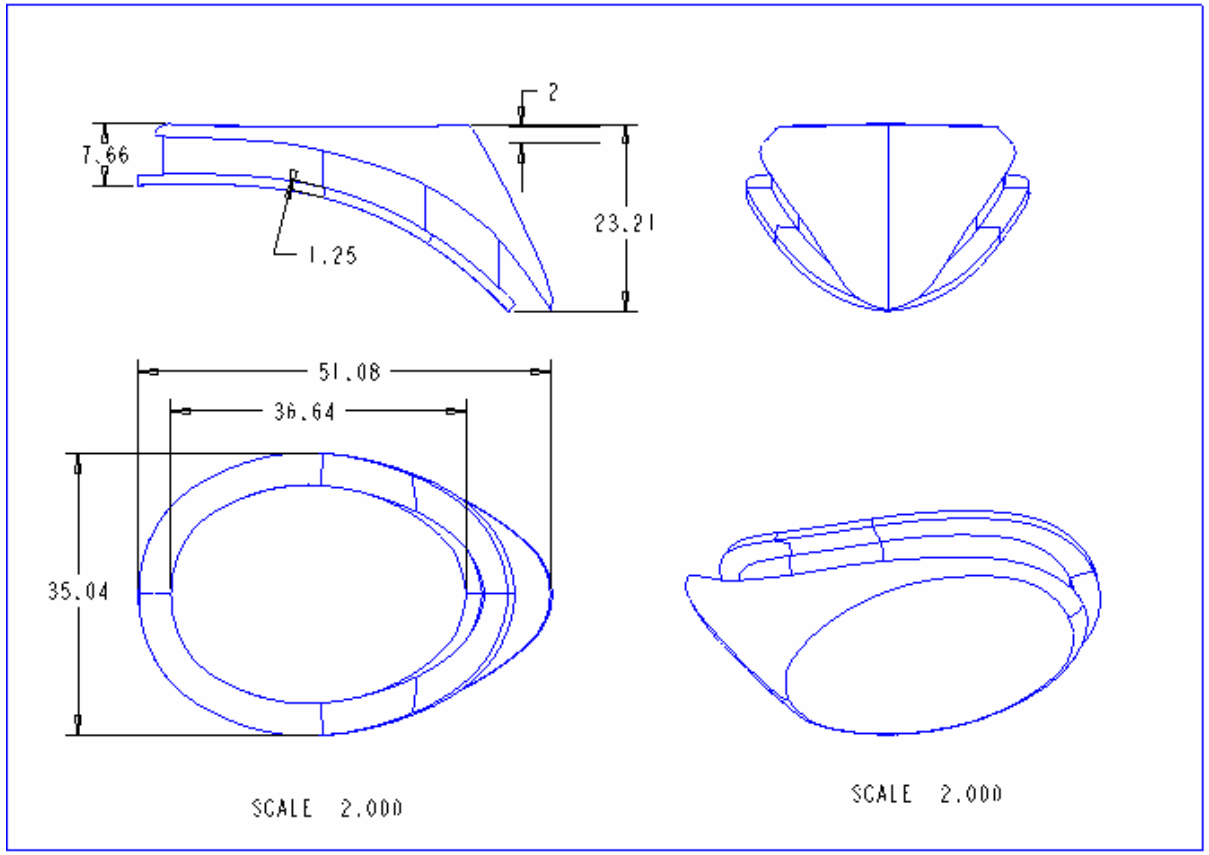
ภาพผนวกที่ 2 ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของชิ้นจมูกรุ่น J-1



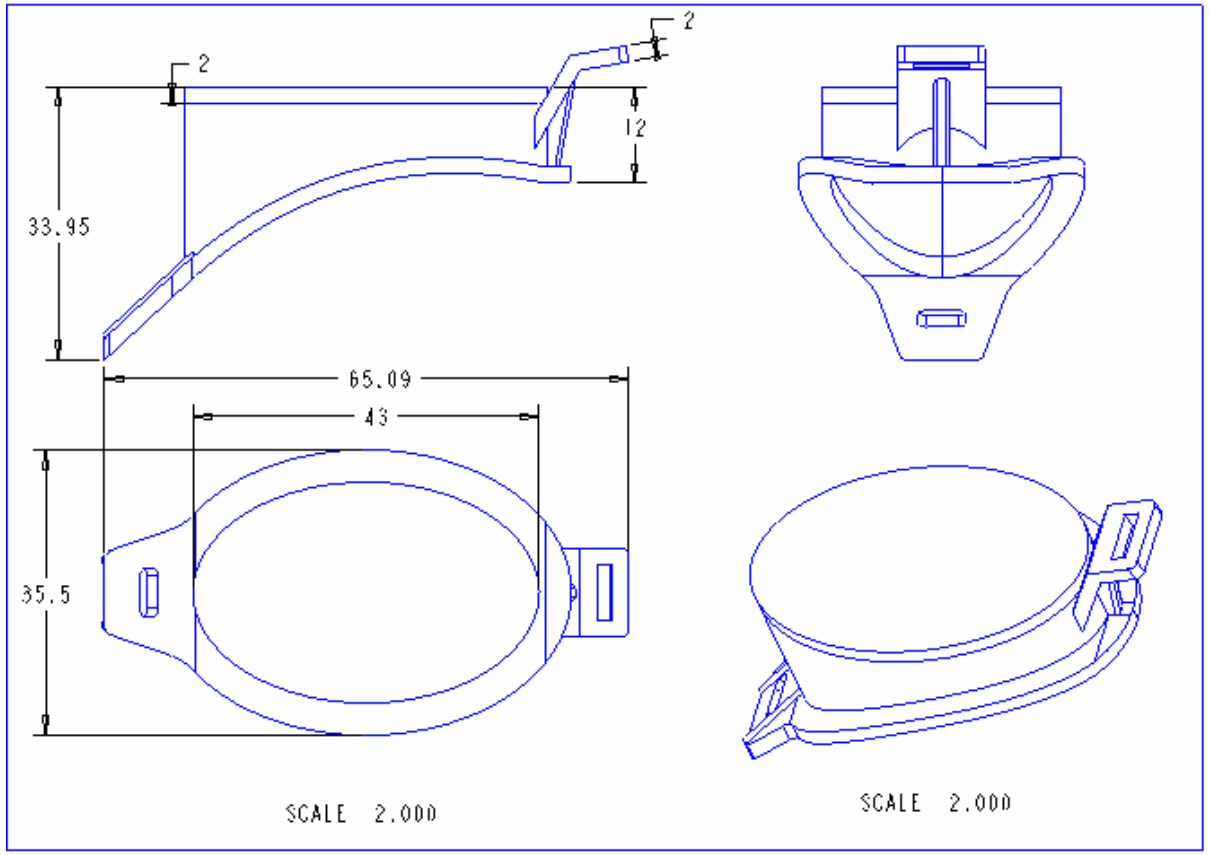
ภาพผนวกที่ 3 ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของชิ้นจมูกรุ่น J-10



ภาพผนวกที่ 4 ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตารุ่น JR-1006



ภาพผนวกที่ 5 ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตารุ่น 2006



ภาพผนวกที่ 6 ภาพวาดรายละเอียดของขนาดของถ้วยตารุ่น 981

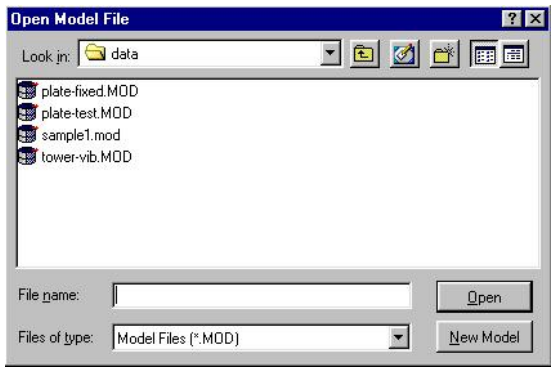
ภาคผนวกที่ 4

ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ของการดึงชิ้นจมูก

1. **ขั้นตอน** Pre-Processing

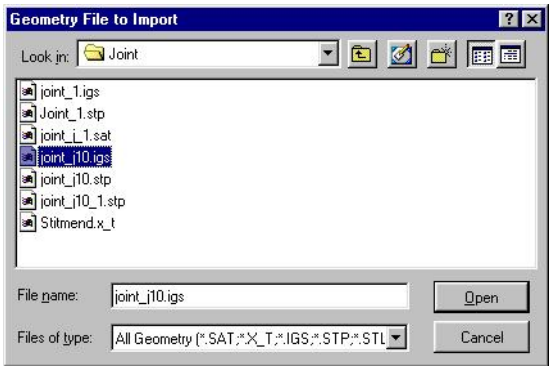
1.1 เปิดโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows โดย กดสองครั้ง ที่ไอคอน

1.2 กดที่ New Model

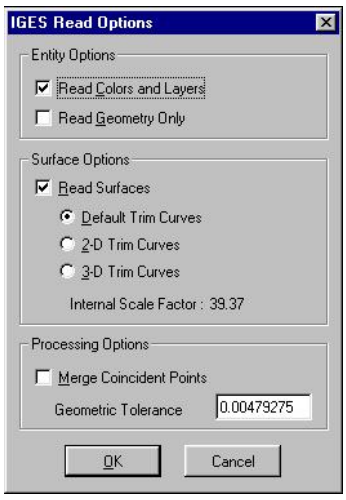


1.3 กดที่ File → Import → Geometry

1.4 เลือกไฟล์ ของแบบที่จะทำการวิเคราะห์ (เช่น joint_j10.iges) จากโฟลเดอร์ ที่เก็บไฟล์นี้ แล้วกดที่ปุ่ม Open



1.5 กดที่ปุ่ม OK

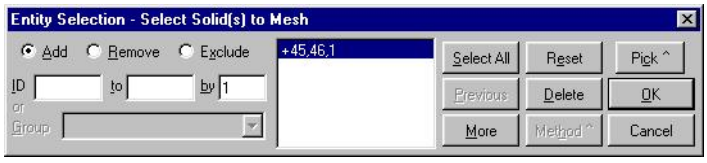


1.6 กดที่ Geometry → Solid → Stitch

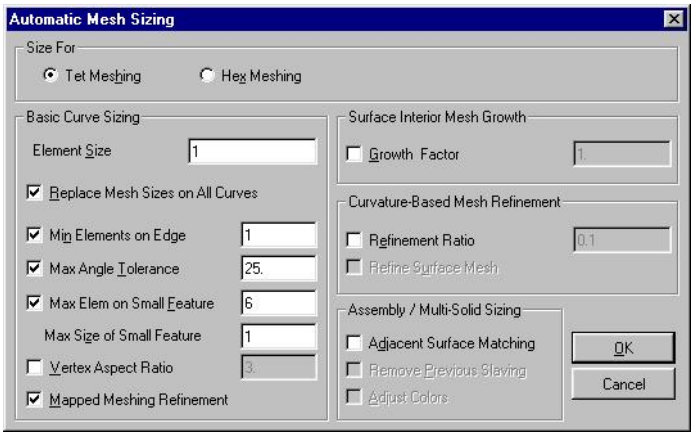
กด Select All → OK → OK

1.7 กดที่ Mesh → Geometry → Solids

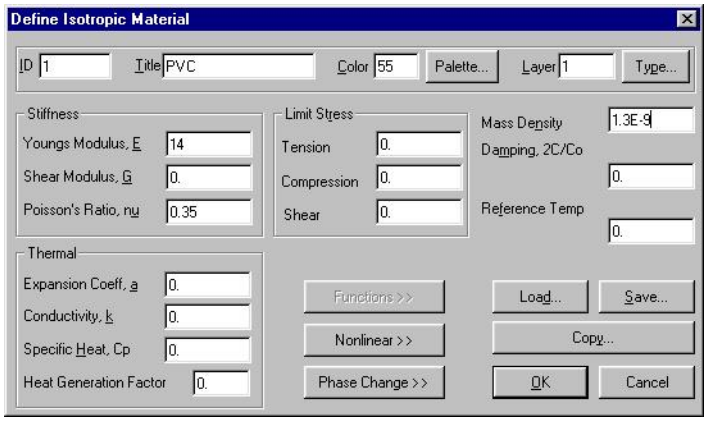
กด Select All → OK



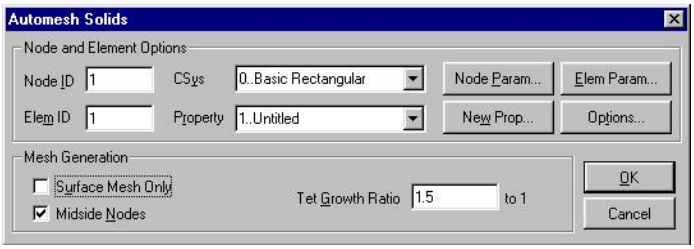
พิมพ์ 1 ในช่อง Element Size และ Max Size of Small Feature แล้วกด OK

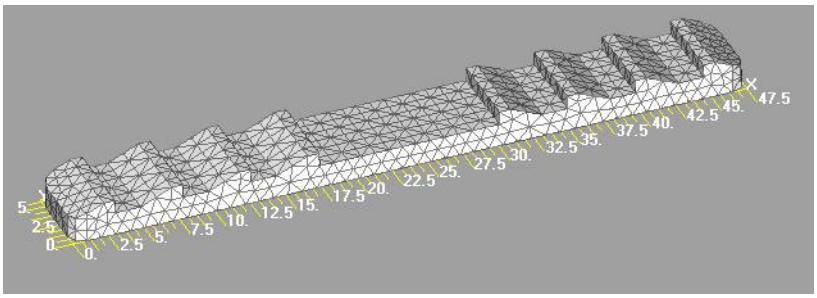


1.8 ในช่อง Title, Youngs Modulus, E, Poisson's Ratio, nu และ Mass Density พิมพ์ PVC, 14, 0.35 และ 1.3E-9 ตามลำดับ แล้วกด OK



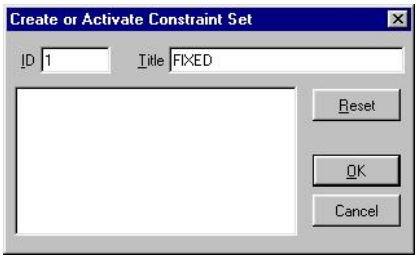
กด OK



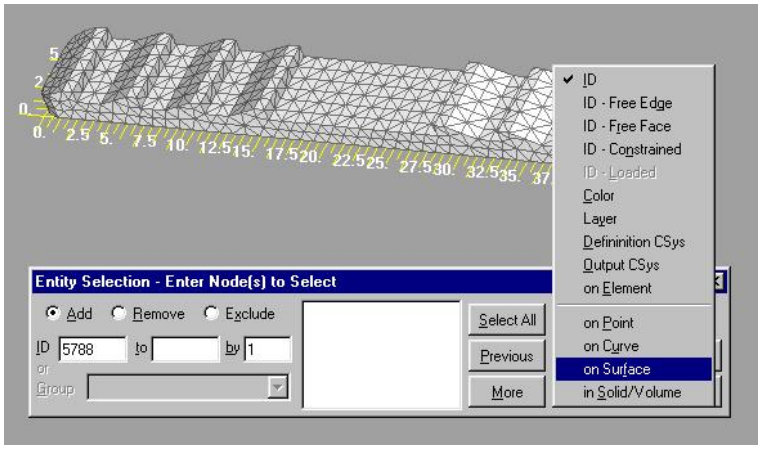


1.9 กดที่ Model → Constraint → Nodal

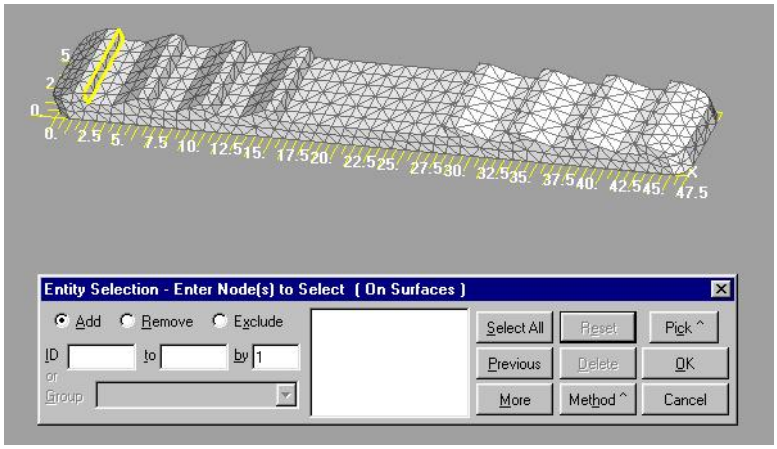
พิมพ์ Fixed ในช่อง Title แล้วกด OK



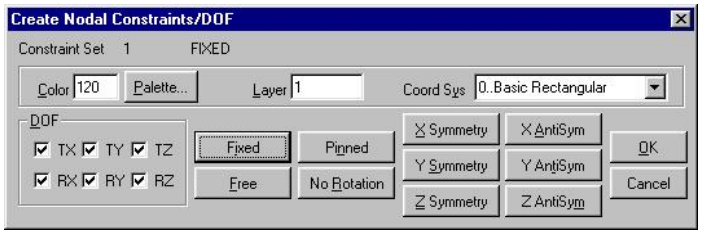
กด Method^ → on Surface



เลือก ผิวที่จะทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (เช่น 82) แล้วกด OK

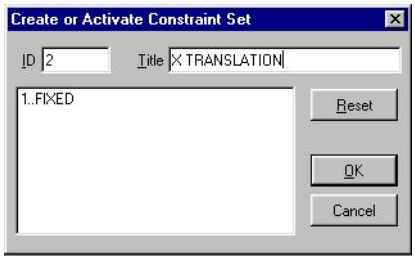


กด Fixed → OK → Cancel



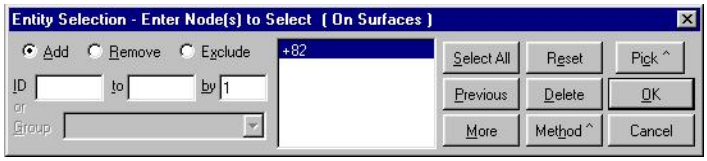
1.10 กด Model → Constraint → Set

พิมพ์ 2 ในช่อง ID และ X TRANSLATION ในช่อง Title แล้วกด OK

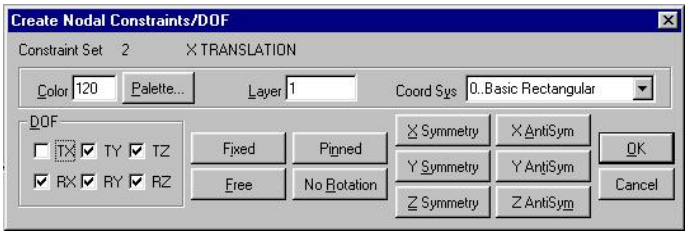


กดที่ Model → Constraint → Nodal

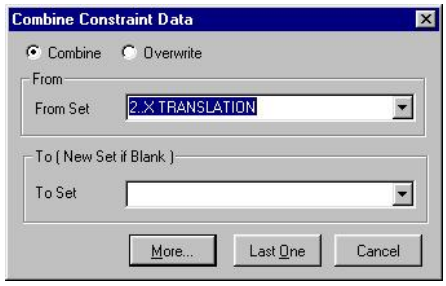
กด Method^ → on Surface → เลือกเลือกผิวที่ต้องการ (เช่น 82) → OK



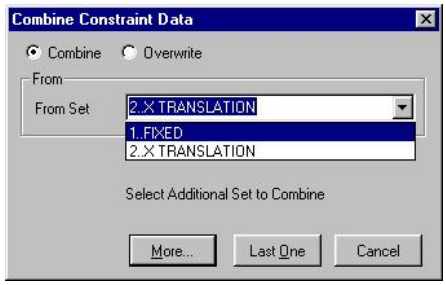
กด Fixed →TX → OK → Cancel



1.11 กดที่ Model → Constraint → Combine

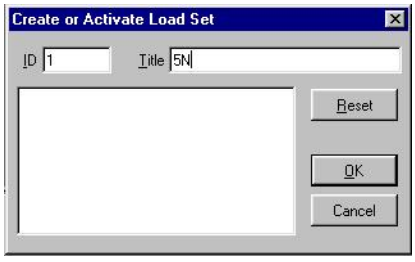


กด More, เลือก 1..FIXED ในช่อง From Set แล้วกด Last One

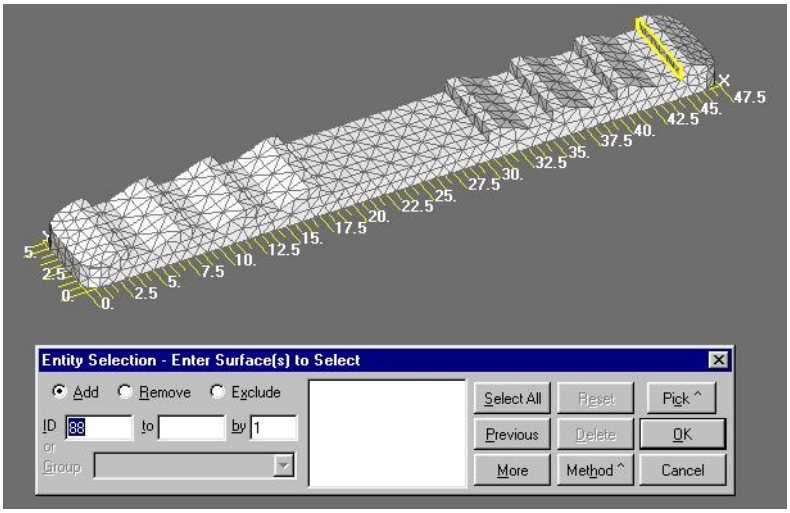


1.12 กดที่ Model → Load → On Surface

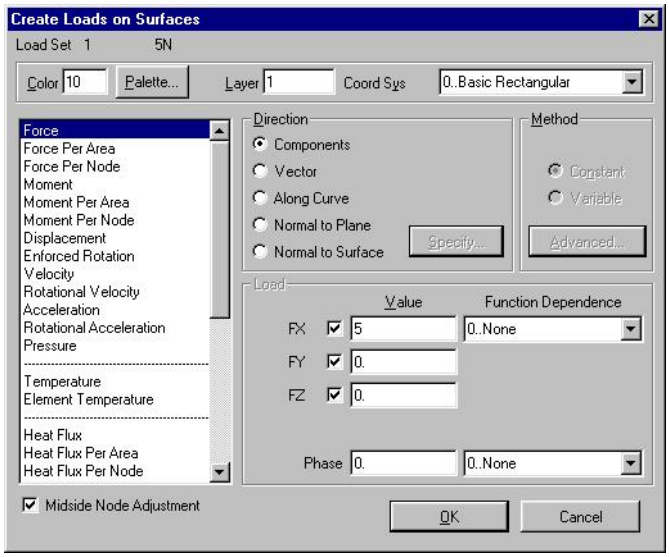
1.12.1 พิมพ์ 5N ในช่อง Title แล้วกด OK



1.12.2 เลือก Surface 54 แล้วกด OK

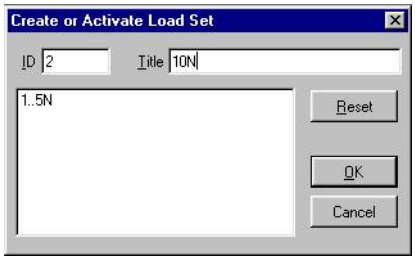


1.12.3 พิมพ์ 5N ในช่อง FX → OK → Cancel



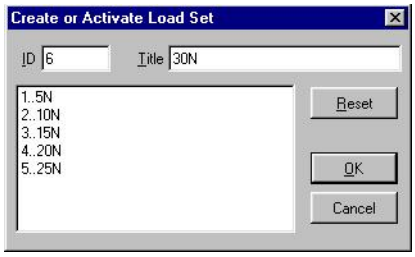
1.13 กดที่ Model → Load → Set

1.13.1 พิมพ์ 2 ในช่อง ID และ 10N ในช่อง Title แล้วกด OK



1.13.2 ทำตามขั้นตอนที่ 1.12.2 ถึง 1.12.3 โดยเปลี่ยนค่าในช่อง FX เป็น 10

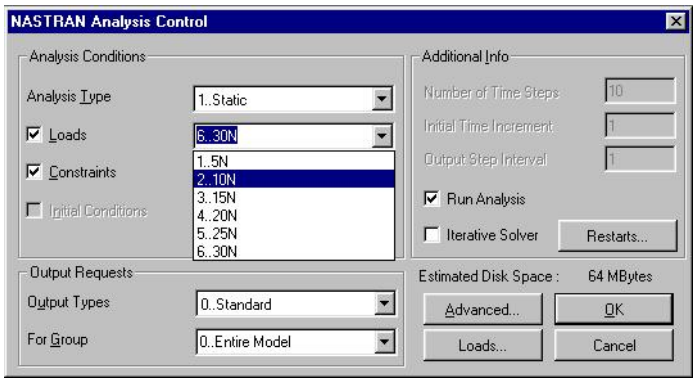
1.14 ทำตามขั้นตอนที่ 13 โดยเพิ่มค่าโหลดในช่อง FX ขึ้น ครั้งละ 5 จนถึง 30



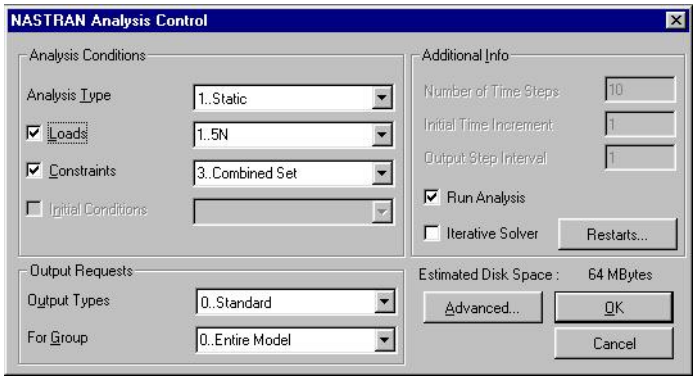
2. **ขั้นตอน** Processing

1.1 กดที่ File → Analyze

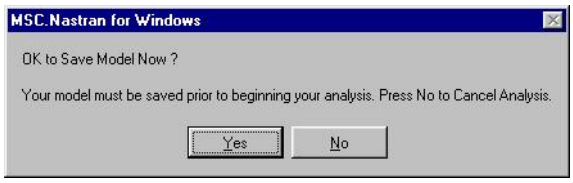
กด ในช่อง Load เพื่อเลือก Load Set 5N



กด OK



กด Yes แล้วตั้งชื่อ File และเลือก Folder สำหรับเก็บไฟล์ข้อมูล → Save



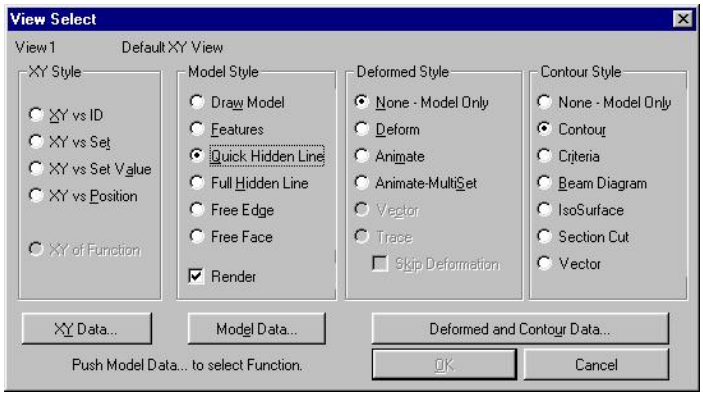
1.1 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่างๆ ใช้เวลาประมาณ 2 นาที

กด Continue

1.1 ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยเปลี่ยน Load Set ไปเรื่อยๆจนครบทุก Set

3. ขั้นตอน Post Processing

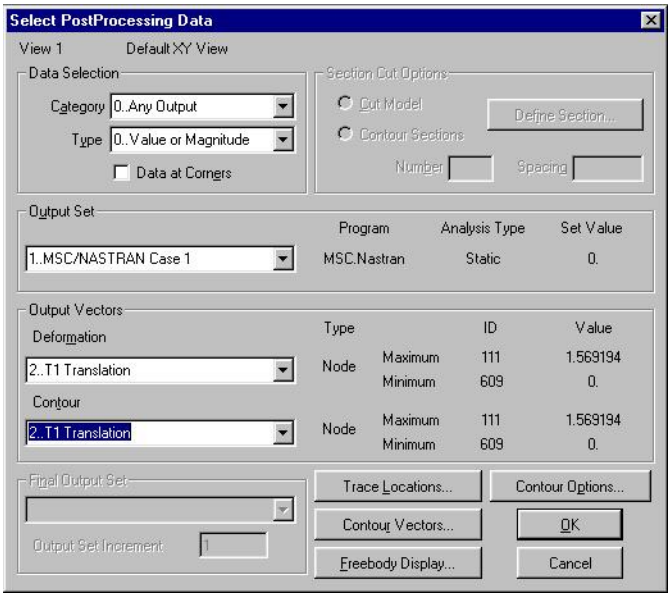
3.1 กด View → Select → Deformed and Contour Data



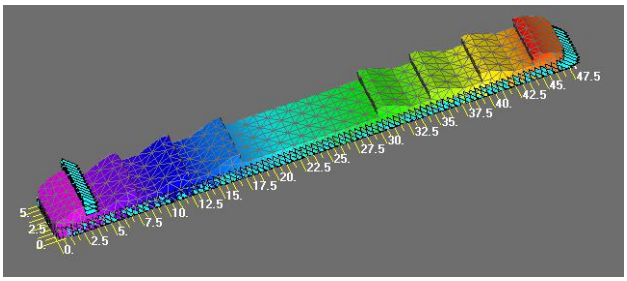
3.2 เลือก 1..MSC/NASTRAN Case 1 ในช่อง Output Set (ผลลัพธ์ ของ Load set 1)

3.3 เลือก 2..T1 Translation ในช่อง Deformation (ดูผลการเคลื่อนตัวในแนวแกน X)

3.4 เลือก 2..T1 Translation ในช่อง Contour (ดูผลการกระจายการเคลื่อนตัวในแนวแกน X)



3.5 กด OK → OK



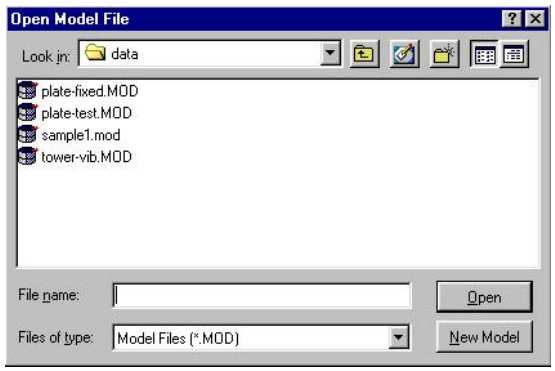
ภาคผนวก 5

ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE การกดของเลนส์

1. **ขั้นตอน** Pre-Processing

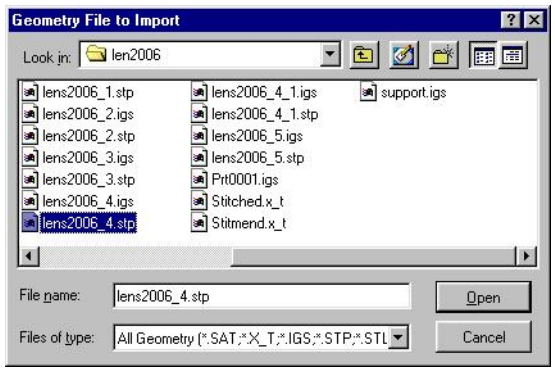
1.1 เปิดโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows โดย กดสองครั้ง ที่ไอคอน

1.2 กดที่ New Model

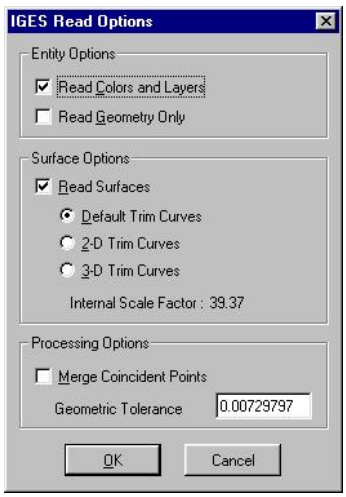


1.3 กดที่ File → Import → Geometry

1.4 เลือกไฟล์ ของแบบที่จะทำการวิเคราะห์ (เช่น lens2006_4.iges) จากโฟลเดอร์ ที่เก็บไฟล์นี้ แล้วกด Open



กด OK

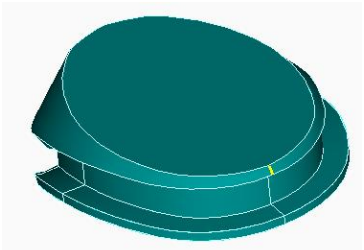


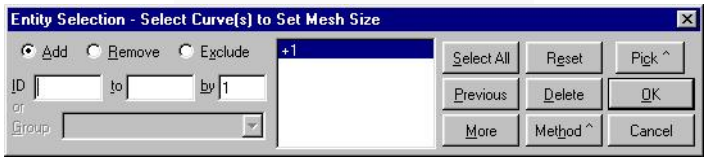
1.5 กดที่ Geometry → Solid → Stitch

กด Select All → OK → OK

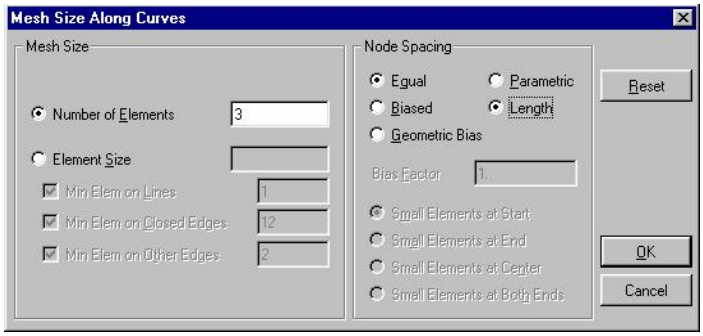
1.6 กดที่ Mesh → Mesh Control → Size Along Curve

เลือก Curve 1 → OK

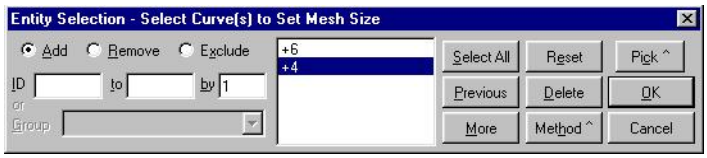




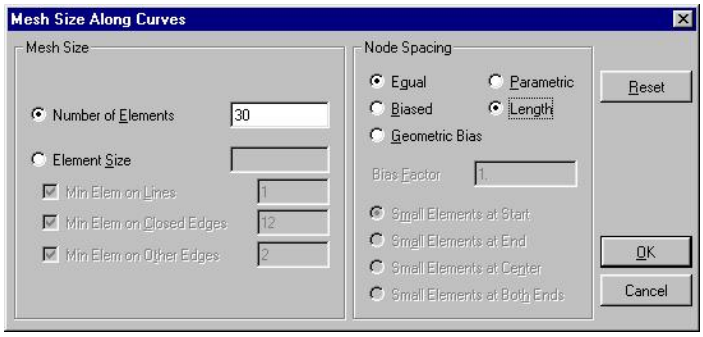
พิมพ์ 3 ในช่อง Number of Element, กด Equal, กด Length → OK



เลือก Curve 4 และ 6 → OK



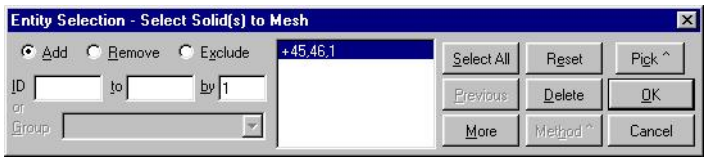
พิมพ์ 30 ในช่อง Number of Element, กด Equal, กด Length → OK



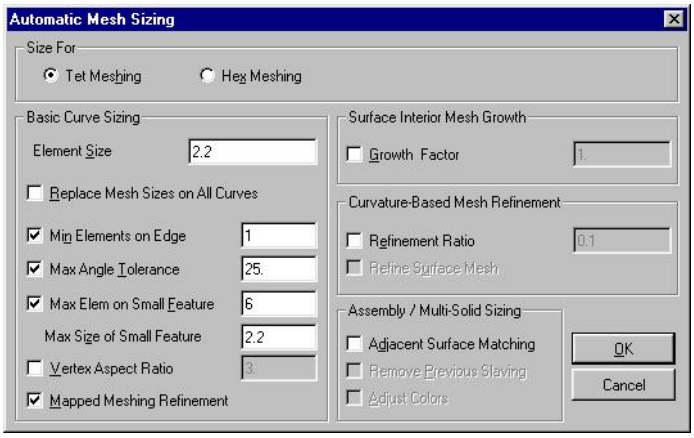
กด Cancel

1.7 กดที่ Mesh → Geometry → Solids

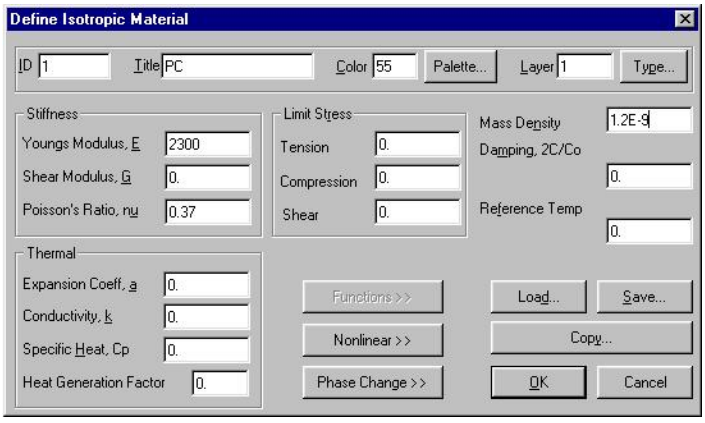
กด Select All → OK



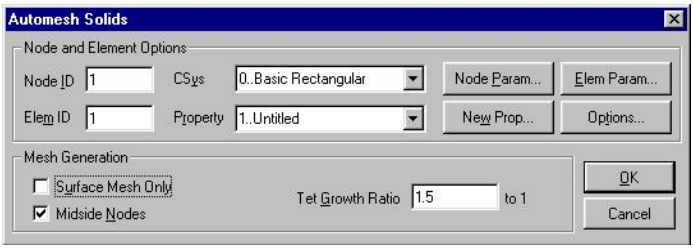
พิมพ์ 2.2 ในช่อง Element Size และ Max Size of Small Feature แล้วกด OK

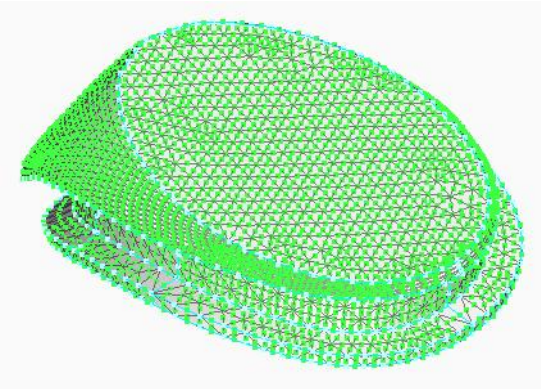


1.8 ในช่อง Title, Youngs Modulus, E, Poisson's Ratio, nu และ Mass Density พิมพ์ PC, 2300, 0.37 และ 1.2E-9 ตามลำดับ แล้วกด OK



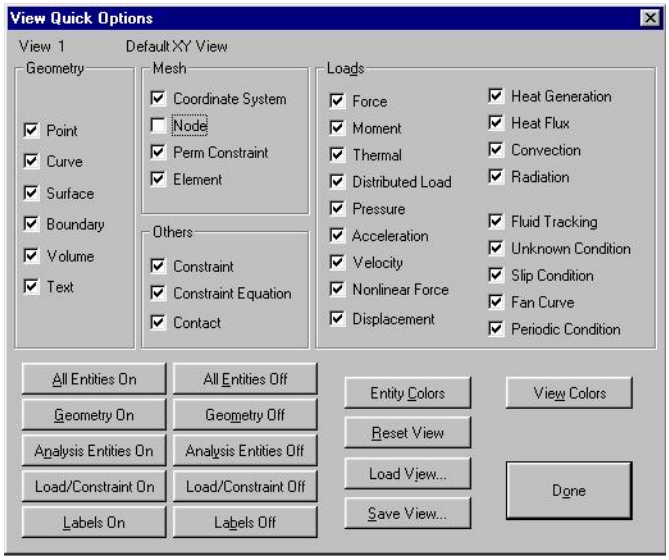
กด OK

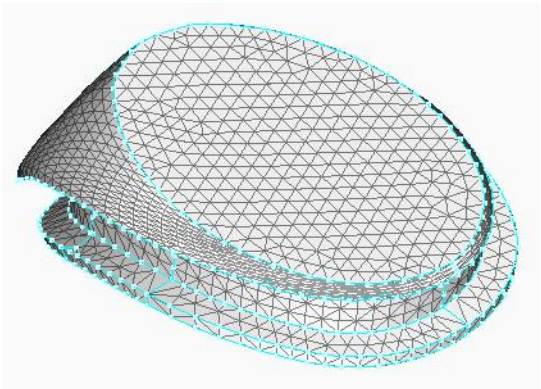




1.9 กดปุ่ม Ctrl + Q ที่คีย์บอร์ด

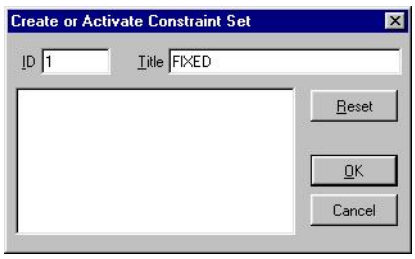
กดที่ Node → Done





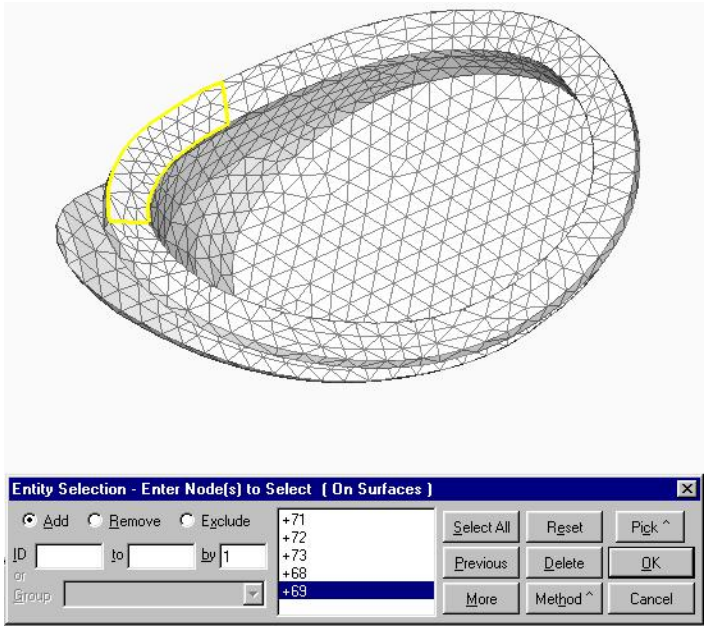
1.10 กดที่ Model → Constraint → Nodal

พิมพ์ Fixed ในช่อง Title แล้วกด OK

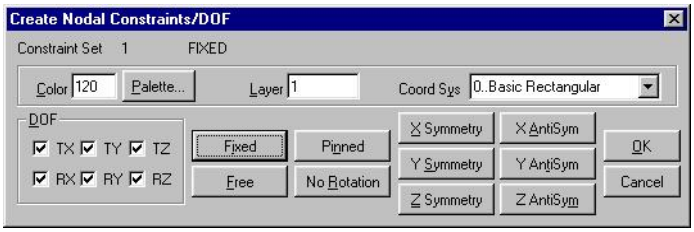


กด Method^ → on Surface

เลือก Surface 68, 69, 70, 71, 72 และ 73 แล้วกด OK

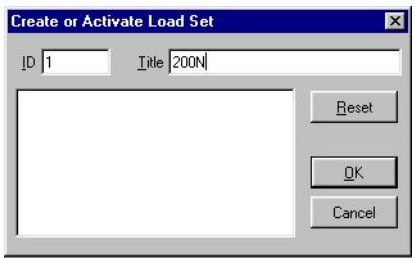


กด Fixed → OK → Cancel

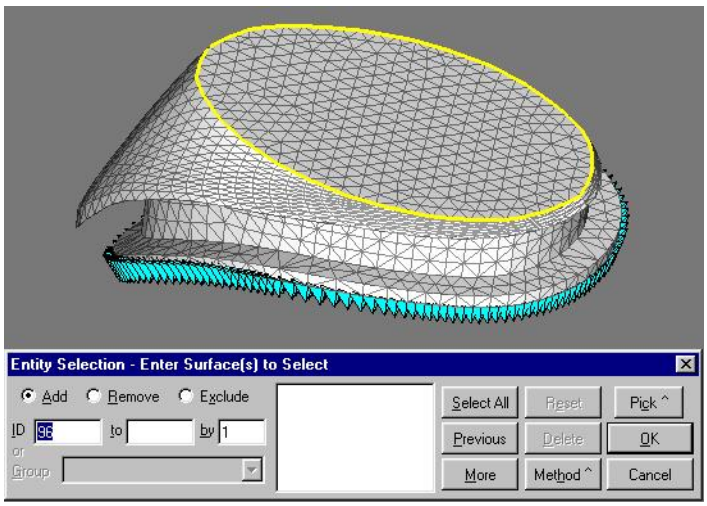


1.11 กดที่ Model → Load → On Surface

1.11.1 พิมพ์ 200N ในช่อง Title แล้วกด OK



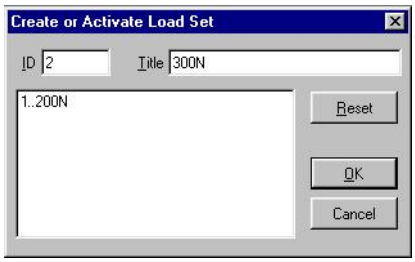
1.11.2 เลือก Surface 93 แล้วกด OK



1.11.3 พิมพ์ 200 ในช่อง FZ → OK → Cancel

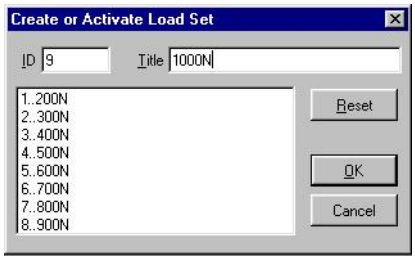
1.12 กดที่ Model → Load → Set

1.12.1 พิมพ์ 2 ในช่อง ID และ 300N ในช่อง Title แล้วกด OK



1.12.2 ทำตามขั้นตอนที่ 1.11.2 ถึง 1.11.3 โดยเปลี่ยนค่าในช่อง FZ เป็น 300

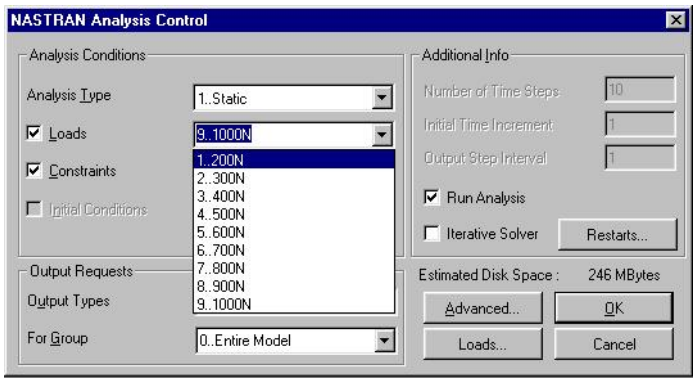
1.13 ทำตามขั้นตอนที่ 12 โดยเพิ่มค่าโหลดในช่อง FZ ขึ้น ครั้งละ 100 จนถึง 1000



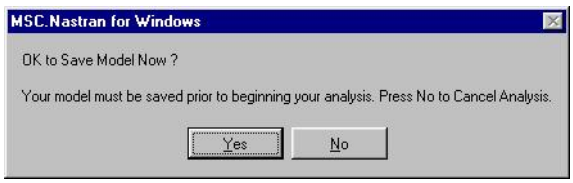
2. ขั้นตอน Processing

1.1 กดที่ File → Analyze

กด ในช่อง Load เพื่อเลือก Load Set 200N → กด OK



กด Yes แล้วตั้งชื่อ File และเลือก Folder สำหรับเก็บไฟล์ข้อมูล → Save



1.1 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่างๆ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

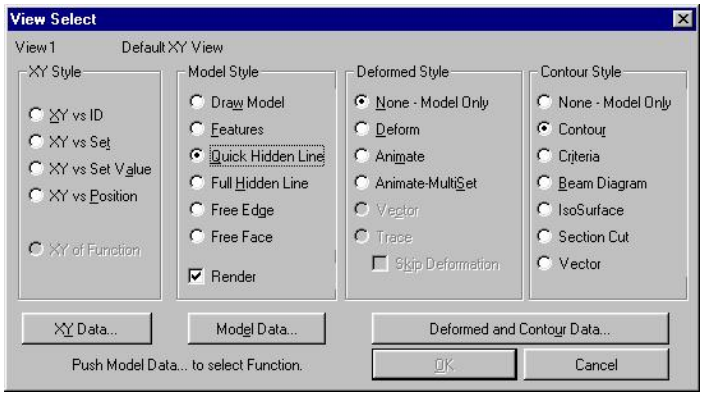
กด Continue

1.1 ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยเปลี่ยน Load Set ไปเรื่อยๆจนครบทุก Set

3. ขั้นตอน Post Processing

1.1 กด View → Select

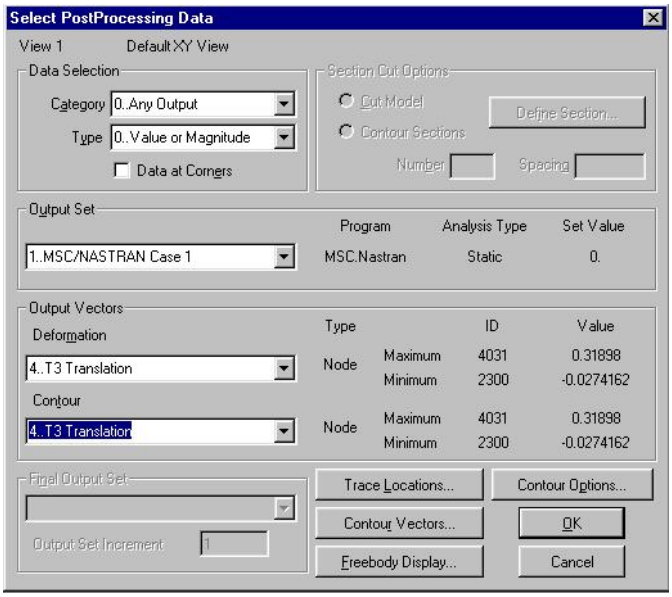
กด Deformed and Contour Data



3.1.1 เลือก 1..MSC/NASTRAN Case 1 ในช่อง Output Set (ผลลัพธ์ ของ Load set 1)

3.1.2 เลือก 4..T3 Translation ในช่อง Deformation (ดูผลการเคลื่อนตัวในแนวแกน Z)

3.1.3 เลือก 4..T3 Translation ในช่อง Contour (ดูผลการกระจายการเคลื่อนตัวในแนวแกน Z)

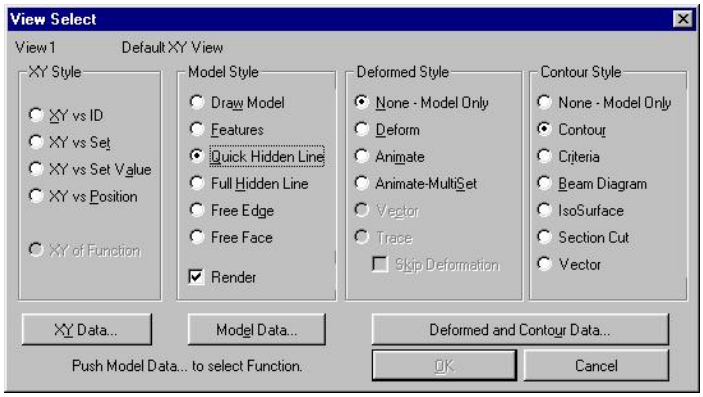


กด OK → OK

3.2 กรณีต้องการดูการกระจายของความเค้น

กด View → Select

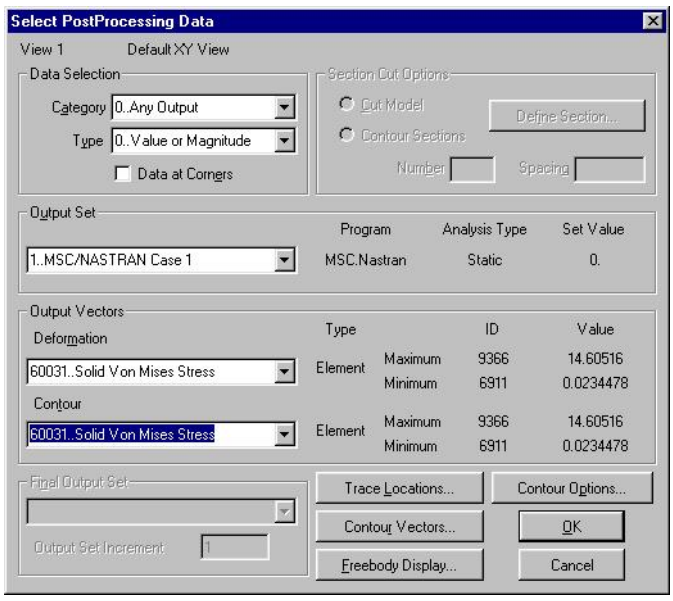
กด Deformed and Contour Data



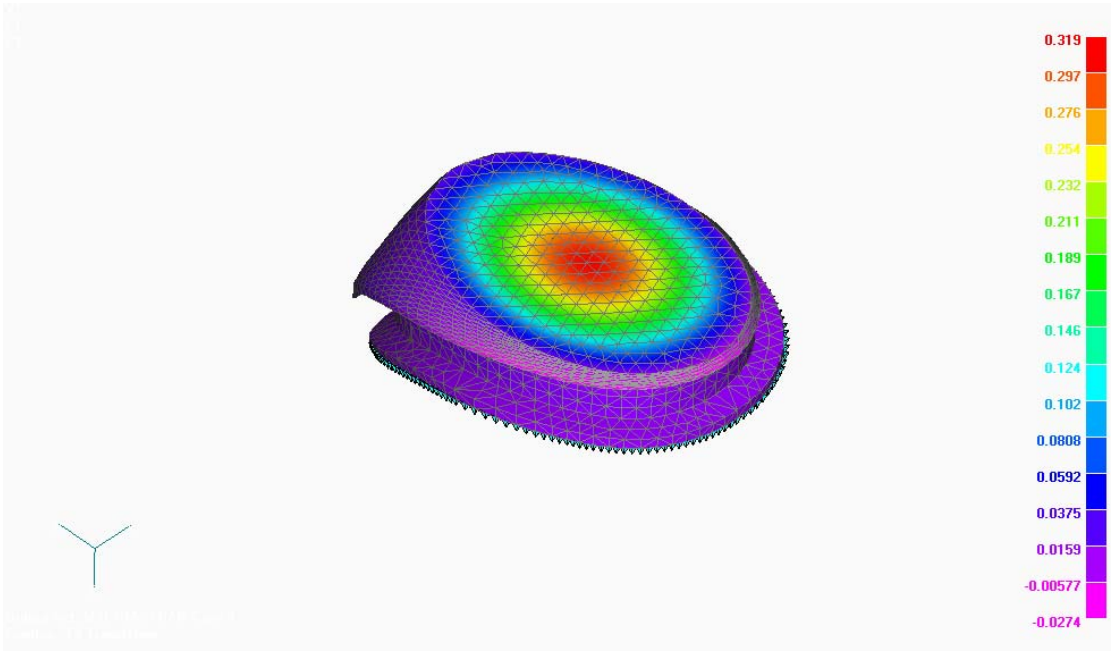
3.2.1 เลือก 1..MSC/NASTRAN Case 1 ในช่อง Output Set (ผลลัพธ์ ของ Load set 1)

3.2.2 เลือก 60031..Solid Von mises Stress ในช่อง Deformation

3.2.3 เลือก 60031.. Solid Von mises Stress ในช่อง Contour


Select PostProcessing Data
View 1
Default XY View
Data Selection
Category 0..Any Output
Type 0..Value or Magnitude
Data at Corners
Section Cut Options
Cut Model
Contour Sections
Define Section...
Number
Spacing
Output Set
1..MSC/NASTRAN Case 1
Program
Analysis Type
Set Value
MSC.Nastran
Static
0.
Output Vectors
Deformation
60031..Solid Von Mises Stress
Contour
60031..Solid Von Mises Stress
Type
ID
Value
Element
Maximum
9366
14.60516
Minimum
6911
0.0234478
Element
Maximum
9366
14.60516
Minimum
6911
0.0234478
Final Output Set
Output Set Increment
1
Trace Locations...
Contour Options...
Contour Vectors...
OK
Freebody Display...
Cancel

กด OK → OK


0.319
0.297
0.276
0.254
0.232
0.211
0.189
0.167
0.146
0.124
0.102
0.0808
0.0592
0.0375
0.0159
-0.00577
-0.0274

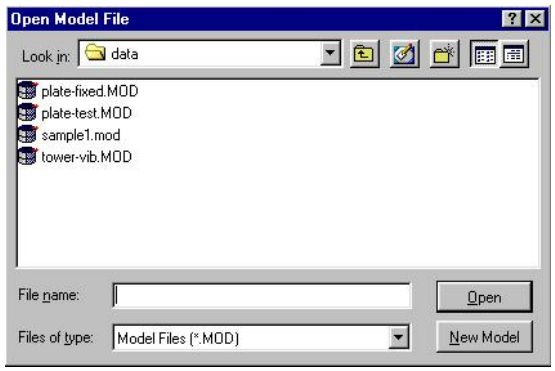
ภาคผนวก 6

ขั้นตอนการวิเคราะห์ CAE ของการกระแทกของเลนส์

1. **ขั้นตอน** Pre-Processing

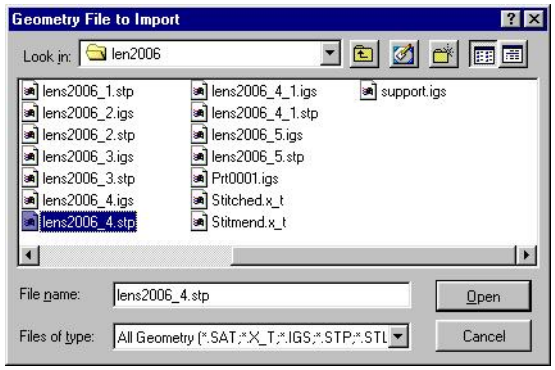
1.1 เปิดโปรแกรม MSC/NASTRAN for Windows โดย กดสองครั้ง ที่ไอคอน

1.2 กดที่ New Model

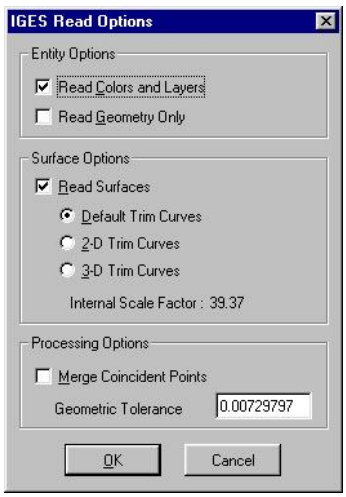


1.3 กดที่ File → Import → Geometry

1.4 เลือกไฟล์ ของแบบที่จะทำการวิเคราะห์ (เช่น lens2006_4.iges) จากโฟลเดอร์ ที่เก็บไฟล์นี้ แล้วกด Open



กด OK

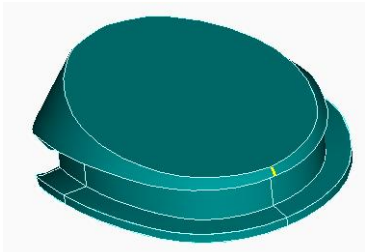


1.5 กดที่ Geometry → Solid → Stitch

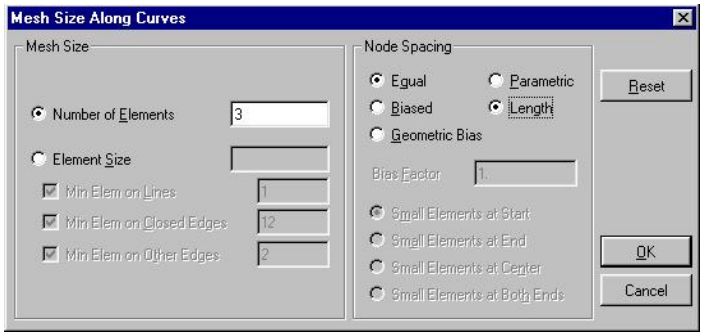
กด Select All → OK → OK

1.6 กดที่ Mesh → Mesh Control → Size Along Curve

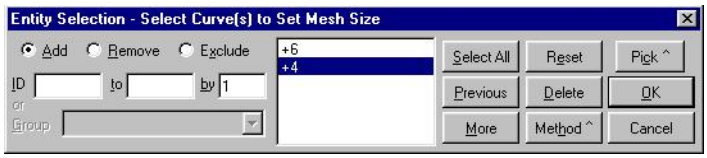
เลือก Curve 1 → OK



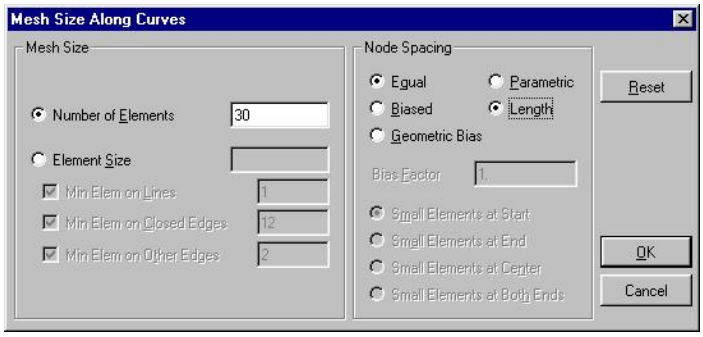
พิมพ์ 3 ในช่อง Number of Element, กด Equal, กด Length → OK



เลือก Curve 4 และ 6 → OK



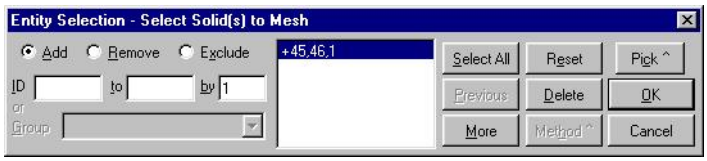
พิมพ์ 30 ในช่อง Number of Element, กด Equal, กด Length → OK



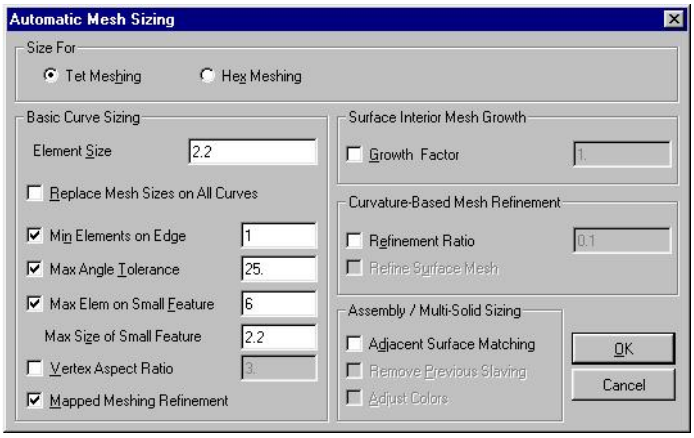
กด Cancel

1.7 กดที่ Mesh → Geometry → Solids

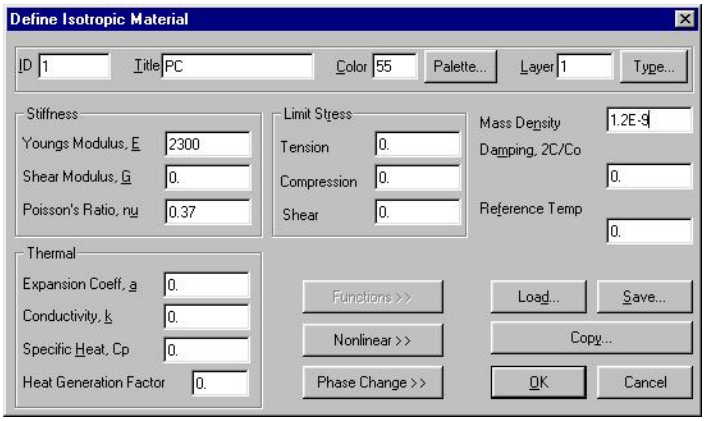
กด Select All → OK



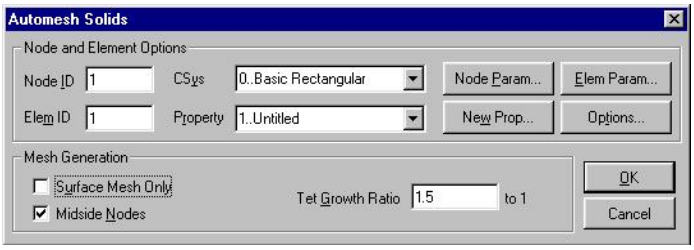
พิมพ์ 2.2 ในช่อง Element Size และ Max Size of Small Feature แล้วกด OK

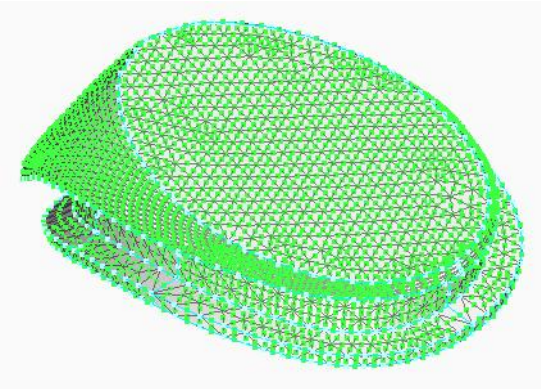


1.8 ในช่อง Title, Youngs Modulus, E, Poisson's Ratio, nu และ Mass Density พิมพ์ PC, 2300, 0.37 และ 1.2E-9 ตามลำดับ แล้วกด OK



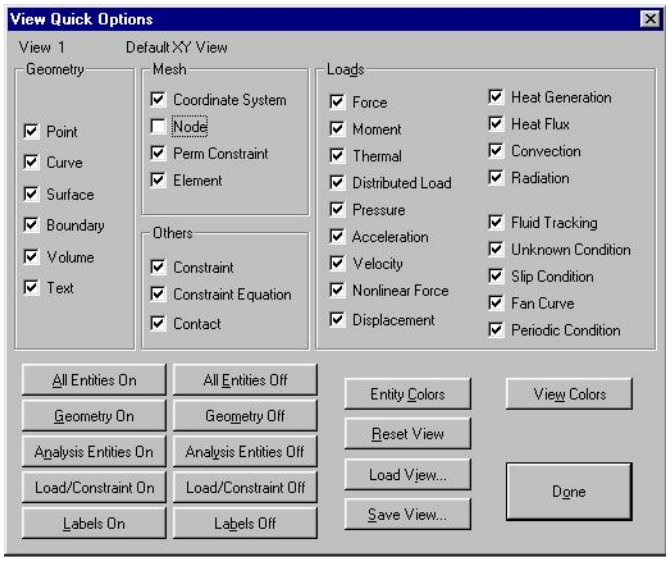
กด OK

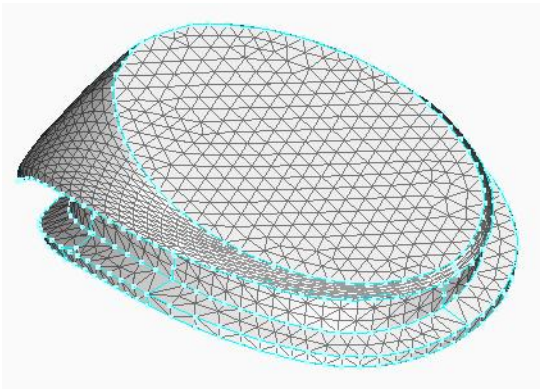




1.9 กดปุ่ม Ctrl + Q ที่คีย์บอร์ด

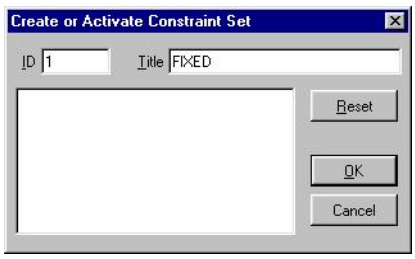
กดที่ Node → Done





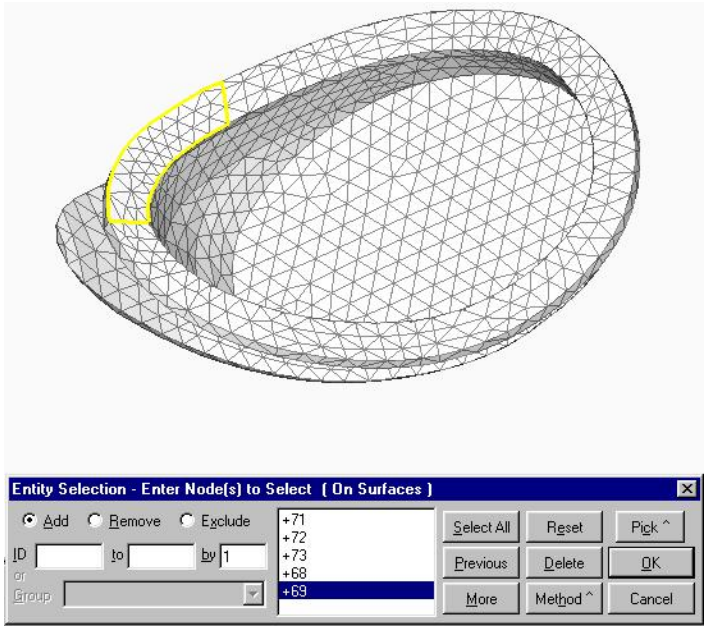
1.10 กดที่ Model → Constraint → Nodal

พิมพ์ Fixed ในช่อง Title แล้วกด OK

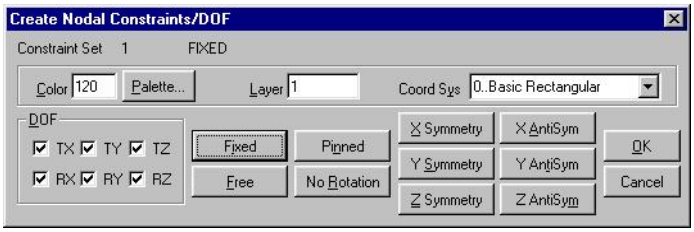


กด Method^ → on Surface

เลือก Surface 68, 69, 70, 71, 72 และ 73 แล้วกด OK

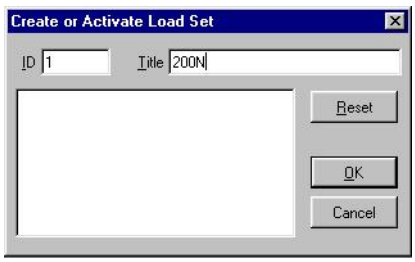


กด Fixed → OK → Cancel

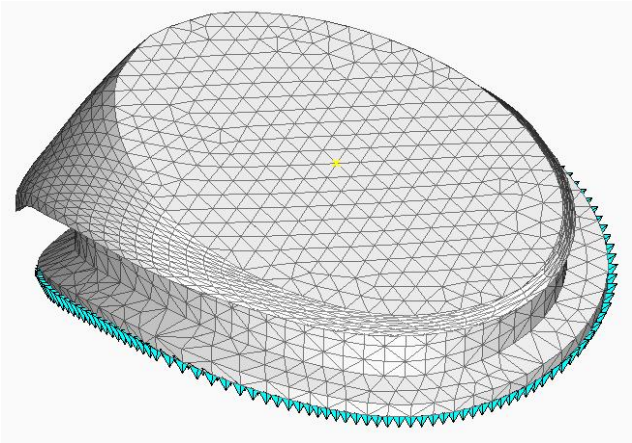


1.11 กดที่ Model → Load → Nodal

1.11.1 พิมพ์ 200N ในช่อง Title แล้วกด OK



1.11.2 เลือก Node 1834 แล้วกด OK

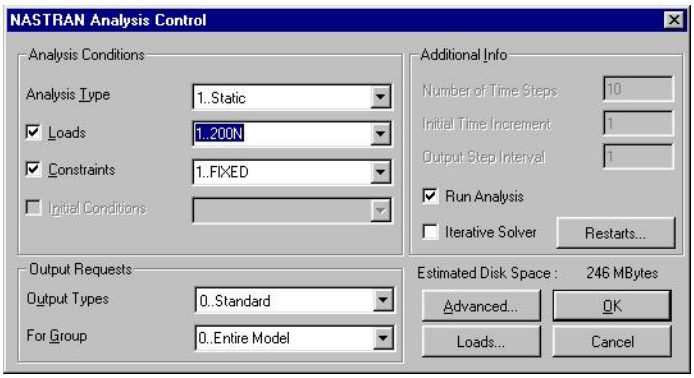


1.11.3 พิมพ์ 200 ในช่อง FZ → OK → Cancel

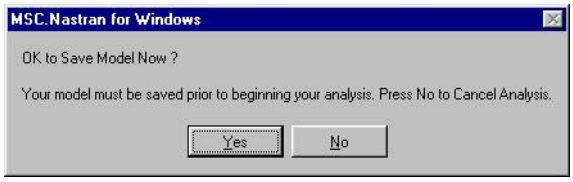
2. **ขั้นตอน Processing**

2.1 กดที่ File → Analyze

กด OK



กด Yes แล้วตั้งชื่อ File และเลือก Folder สำหรับเก็บไฟล์ข้อมูล → Save



2.2 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่างๆ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

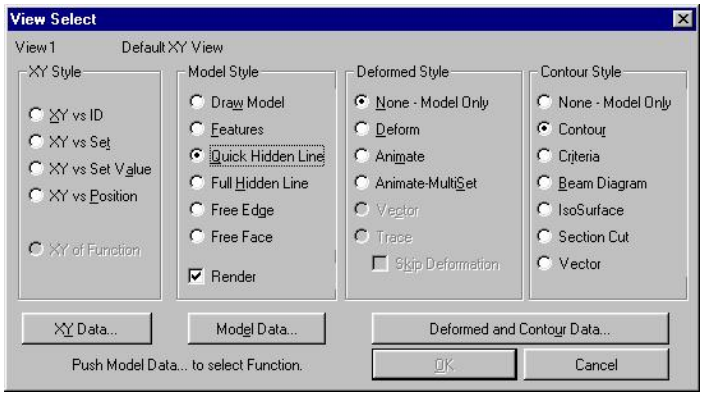
กด Continue

2.3 ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยเปลี่ยน Load Set ไปเรื่อยๆจนครบทุก Set

3. **ขั้นตอน Post Processing**

2.1 กด View → Select

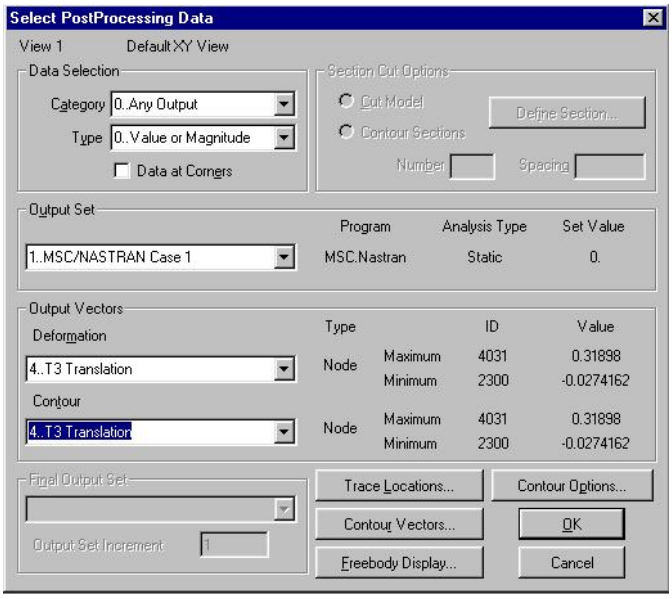
กด Deformed and Contour Data



3.1.1 เลือก 1..MSC/NASTRAN Case 1 ในช่อง Output Set (ผลลัพธ์ ของ Load set 1)

3.1.2 เลือก 4..T3 Translation ในช่อง Deformation (ดูผลการเคลื่อนตัวในแนวแกน Z)

3.1.3 เลือก 4..T3 Translation ในช่อง Contour (ดูผลการกระจายการเคลื่อนตัวในแนวแกน Z)

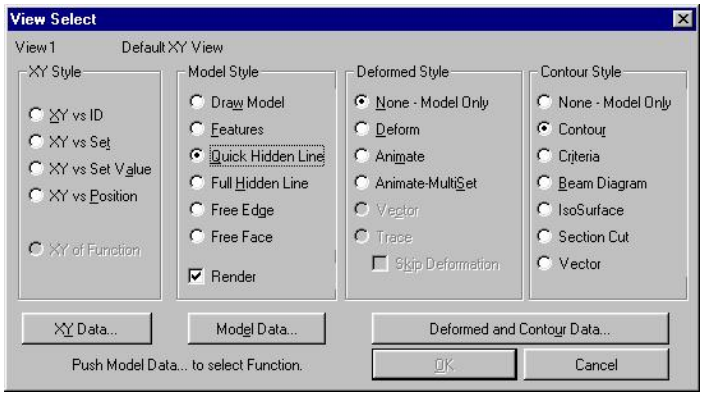


กด OK → OK

3.2 กรณีต้องการดูการกระจายของความเค้น

กด View → Select

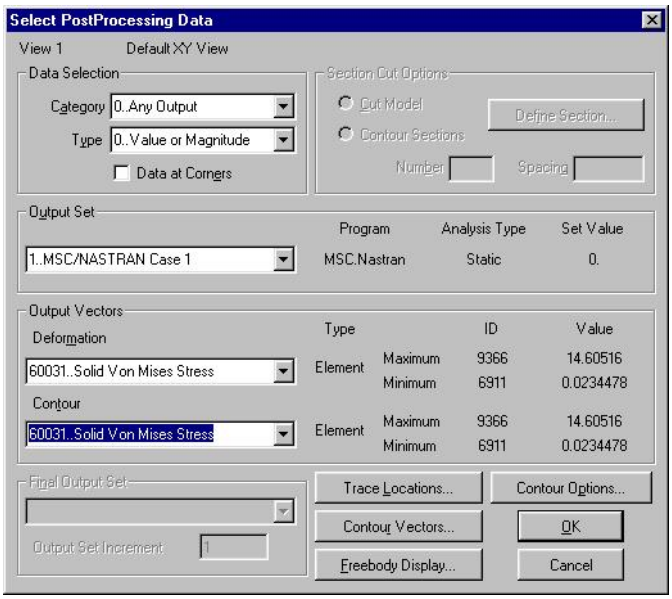
กด Deformed and Contour Data



3.2.1 เลือก 1..MSC/NASTRAN Case 1 ในช่อง Output Set (ผลลัพธ์ ของ Load set 1)

3.2.2 เลือก 60031..Solid Von mises Stress ในช่อง Deformation

3.2.3 เลือก 60031.. Solid Von mises Stress ในช่อง Contour



กด OK → OK