



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

ปริญญา

เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้วิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์
ความแข็งแรงของพระพุทธรูป

Endurable Analysis of Buddha Model Using Reverse Engineering and Finite Element
Method

นามผู้วิจัย นายวีรพงษ์ นิจโรจน์กุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อภิชิต แจ่มบำรุง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ประพนธ์ ขุนทอง, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชพล ช้างชู, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้วิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

ความแข็งแรงของพระพุทธรูป

Endurable Analysis of Buddha Model Using
Reverse Engineering and Finite Element Method

นายวีรพงษ์ นิจโรจน์กุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

วีรพงษ์ นิจิโรจน์กุล 2553: การใช้วิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูป ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม
โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์อภิชาติ แจ่มบำรุง, Ph.D. 100 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการใช้กระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการศึกษาถึงความแข็งแรงของพระพุทธรูปที่จะดำเนินการสร้างจริงที่ อำเภอห้วยกระเจา จังหวัดกาญจนบุรี โดยการศึกษาจะทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จากพระพุทธรูปต้นแบบโดยใช้วิธีการทางวิศวกรรมย้อนรอยและกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ถึงความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในการจำลองได้ใช้แรงลมจากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาในบริเวณสถานที่ก่อสร้างจริงมาเป็นข้อมูลในการคำนวณแรงที่กระทำต่อองค์พระ ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงกระทำหลักที่กระทำต่อโครงสร้างองค์พระคือแรงกระทำจากลมที่มาปะทะนั่นเอง การใส่แรงอันเนื่องมาจากลมที่กระทำต่อองค์พระคำนวณโดยใช้มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคารของกรมโยธาธิการ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า แรงกระทำต่อองค์พระเนื่องจากลมจะเกิดผลความเค้นสูงสุดที่บริเวณข้อพระบาทขององค์พระ และที่ความเร็วลม 33 เมตรต่อวินาทีซึ่งเป็นความเร็วลมเทียบเท่ากับความเร็วลมของพายุโซนร้อนที่เกิดขึ้นในประเทศไทยจะส่งผลให้เกิดความเค้นขนาด 0.37 MPa ที่บริเวณข้อพระบาทขององค์พระพุทธรูปจำลอง ซึ่งความเค้นนี้ยังไม่สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อองค์พระได้

Werapong Nijlojkul 2010: Endurable Analysis of Buddha Model Using Reverse Engineering and Finite Element Method. Master of Engineering (Industrial Production Technology), Major Field: Industrial Production Technology, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Mr. Apichart Chaengbamrung, Ph.D. 100 Pages.

This research uses the procedure of reverse engineering and the finite element method to study the strength of the Buddha image that will be built at Amphur Huay-Krajao, Kanchanaburi Province. The computer model of the Buddha image was created from a real original Buddha image by the reverse engineering and the computer aid design techniques. The finite element method was used to analyse the strength of the Buddha image that will be built. In the case of the strength analysis, the wind velocity data at the place where the Buddha image will be constructed was asked from the Meteorological Department of Thailand. This wind velocity data was used to calculate the force having an impact on the Buddha image because of the result of the exertion force which effect on the structure of the Buddha image is the force of the wind power. This wind velocity was converted to be wind force by using the standard of wind power calculation and the reaction of the Public Works Department. The results of strength analysis show that the maximum stress occurs at the ankle of the Buddha image. At the wind velocity of 33 m/s, the speed of the tropical storm occurring in Thailand, the value of the maximum stress is 0.37 MPa occurring at the ankle area of the Buddha image. This value of maximum stress cannot be a cause of collapsing of the Buddha image that will be constructed.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบคุณ บิดาและมารดาที่ให้ กำเนิดข้าพเจ้ามา และได้อบรมสั่งสอนเลี้ยงดูมาเป็นอย่างดีจนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ และได้แนวทางที่ดีมาใช้ในการดำเนินชีวิตของข้าพเจ้ามาประพฤติ และ ปฏิบัติตามเพื่อใช้เป็นแนวทางสืบต่อไป และ ขอกราบขอบคุณ อาจารย์ ดร.อภิชาติ แจ่มบำรุง ประธานกรรมการที่ปรึกษา และอาจารย์ดร.ประพนธ์ ขุนทองที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานการศึกษาวิจัย และตลอดจนให้คำปรึกษาจนประสบผลตามที่คาดหวังไว้

ขอกราบขอบคุณบูรพาจารย์ที่ได้อบรมสั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาการศึกษาและวิทยาการตั้งแต่เริ่มต้น จนกระทั่งถึงปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ที่มีความรู้ และมีปฏิภาณในการทำงานมา จนสามารถบรรลุเป้าหมายที่คาดหวังและฟันฝ่าอุปสรรคนานับประการ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งได้มอบโอกาสในการเรียนรู้งานในส่วนต่างๆทำให้สามารถนำสิ่งที่ได้มาช่วยในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ และกลุ่มบุคคลที่จะลืมกล่าวขอบคุณมิได้เลยนั่นคือ คุณฐานวัฒน์ ศศิเมธิพัตร คุณประพัทธ์ คุ่มปลีวงศ์ คุณนพพร ปีกแว่น และคุณนัฐพงศ์ จรุงรักษ์ รวมถึงเพื่อนร่วมงานในสถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรมและเพื่อนร่วมงานที่บริษัท Engineering Computer Service (ECS THAILAND) ที่ได้ช่วยแนะนำวิธีการทำงานจนสามารถบรรลุเป้าหมาย รวมถึงทุกท่านที่ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจ เพื่อส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้ประสบความสำเร็จ ทั้งในทางตรงและทางอ้อมให้สมหวังดังตามความปรารถนา ที่คาดหวังไว้ จึงขอขอบพระคุณไว้ใน ณ.ที่นี้ด้วย

วีรพงษ์ นิจโรจน์กุล

กันยายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	81
ผล	81
วิจารณ์	88
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	95
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อมูลเกี่ยวกับตัวเครื่องเลเซอร์สแกน	25
2	ข้อมูลเกี่ยวกับหัวจับพิกัดสามมิติ	26
3	ตารางคำนวณแรงลม	67
4	แสดงความเร็วลมในแต่ละเดือนในรอบ 10 ปี	67
5	ค่าประกอบความสำคัญของลม	71
6	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม	72
7	ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ	76
8	ข้อกำหนดแรงลมต่ำสุด	78
9	แสดงค่าความเค้นและบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด	87

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	OPL-3D: Optical digitizer แสดงลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้	5
2	Optical Layout แสดงทิศทางของแนวลำแสงของอุปกรณ์	5
3	แสดงลำดับขั้นตอนจากวิศวกรรมย้อนรอยจนกระทั่งถึงกระบวนการ Rapid Prototype	6
4	แสดงหลักการทำงานของสแกนเนอร์ 3มิติแบบไม่สัมผัส	10
5	แสดงตัวอย่างนำพิกัดจุด (ซ้าย) และแบบจำลองโพลิกอน (ขวา) ของชิ้นงานต้นแบบไปใช้งาน	14
6	แสดงกระบวนการทำงานของโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยที่กระทำกับแบบโพลิกอนโดยตรง	16
7	การทำงานของอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติในระบบเลเซอร์	18
8	ชุด Portable Arm CMM	24
9	ชุดหัวเลเซอร์สแกน Kreon รุ่น KZ-50	25
10	แสดงรายละเอียดผังกระบวนการทำงานของวิศวกรรมย้อนรอย	27
11	องค์พระพุทธรูปองค์ต้นแบบที่นำมาสแกน	28
12	แสดงการกำหนดจุดอ้างอิงก่อนการทำงาน	29
13	โปรแกรม Polygonia	30
14	แสดงการตั้งกำลังของแสงเลเซอร์	31
15	การตั้งชื่อไฟล์งานก่อนสแกน	31
16	แสดง กลุ่มพิกัดจุดที่ได้จากการสแกน	33
17	ภาพขยายกลุ่มพิกัดจุดที่ได้จากการสแกนองค์พระพุทธรูป	34
18	กลุ่มพิกัดจุดที่จะได้หลังจาก Export มาที่โปรแกรม Geomagic	35
19	โปรแกรม Geo Magic Studio 8 ที่นำมาใช้ในกระบวนการแปลงกลุ่มพิกัดจุด	35
20	กลุ่มพิกัดจุดที่นำเข้าจาโปรแกรม Polygonia	36
21	แสดงถึงกลุ่มพิกัดจุดที่อยู่ห่างจาก กลุ่มพิกัดจุดหลัก	37
22	แสดงคำสั่งที่ใช้ในการ Reduce Noise	38
23	แสดงกลุ่มพิกัดจุดที่เปลี่ยนเป็นแบบจำลองแผ่นผิว	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ภาพแสดงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap เคียร์ส่วนด้านหน้าและด้านหลัง	40
25	ภาพแสดงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap ในส่วนหน้าอกและแผ่นหลัง	40
26	ภาพแสดงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap ในช่วงพระบาทด้านหน้าและพระบาทด้านหลัง	41
27	แสดงการนำไฟล์ Import ชิ้นงานทั้งส่วนเพื่อทำการประกอบ	43
28	แสดงรายละเอียดก่อนการกำหนดจุด Fixed	45
29	แสดงรายละเอียดหลังจากประกอบจุดทุกจุดเข้าด้วยกันเรียบร้อยแล้ว	46
30	แสดงรายละเอียดหลังจากที่โปรแกรมคำนวณผิวงานสองผิวที่ประสานกัน	47
31	แสดงรายละเอียดหลังจากที่โปรแกรมคำนวณความกลมกลืนของผิวแล้ว	47
32	แสดงรายละเอียด หลังจากที่คำนวณความกลมกลืนของผิว และเชื่อมทั้งสองผิวให้เป็นผิวงานเดียวกันแล้ว	48
33	แสดงลักษณะงานช่วงลำตัวและช่วงล่างของพระพุทธรูป	48
34	แสดงพระพุทธรูปจำลองหลังจากประกอบและประสานผิวเรียบร้อยแล้ว	49
35	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของแบบจำลองพื้นผิว	50
36	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณเคียร์	50
37	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณมือและแนวชายจีวร	51
38	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณแนวชอกชายสังฆาฏิ	51
39	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณต้นขา	52
40	แสดงถึงรายละเอียดการใช้คำสั่ง Fill Hole รูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณต้นขา	52
41	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณชายจีวรที่ผิดพลาดจากการประกอบ	53
42	แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณพระบาท	53
43	ก่อนใช้คำสั่ง Relax	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	การเลือกบริเวณที่จะทำการ Relax	54
45	หลังการใช้คำสั่ง Relax	55
46	แสดงรายละเอียดภาพหลังจากทำการใช้คำสั่ง Fill Hole และ การใช้คำสั่ง Relax	55
47	แสดงรายละเอียดก่อนทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิง	56
48	แสดงรายละเอียดหลังทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิง	56
49	แสดงรายละเอียดหลังทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิง (หลังจากออกจากคำสั่ง)	57
50	แสดงรายละเอียดภาพหลังจากทำสร้างเส้นแนว Patch	57
51	แสดงแนวการสร้าง Patch	58
52	การกำหนดการแบ่งโครงร่างตาข่าย ที่เหมาะสมทำการ Fit Surface	59
53	ภาพขยายการกำหนดการแบ่งโครงร่างตาข่าย ที่เหมาะสมทำการ Fit Surface	60
54	แสดงรายละเอียดองค์พระพุทธรูป ที่ผ่านกระบวนการตกแต่งแบบพื้นผิว	61
55	โปรแกรม Unigraphics NX 5	62
56	ภาพพระพุทธรูปในลักษณะเป็นแบบจำลองทรงตันด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 5	63
57	ภาพแบบจำลองพระพุทธรูปที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองการวิเคราะห์ ความแข็งแรง	64
58	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	65
59	พระพุทธรูปจำลองที่ผ่านการสร้าง 3D Tetrahedral Mesh แล้ว	66
60	แผนที่ความเร็วอ้างอิง	70
61	แสดงรายละเอียดแรงที่ได้ในการทดลองขององค์พระพุทธรูป	79
62	ผลที่ได้จากการจำลองการทดลองหาความแข็งแรงขององค์พระพุทธรูปจำลอง	79
63	ชิ้นงานจำลองที่ได้จากกระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอย และ Rapid Proto Type	80
64	ภาพแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
65	กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างขวา ในกรณีที่ใช้ เอลิเมนต์ขนาดใหญ่	82
66	กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างซ้าย ในกรณีที่ใช้ เอลิเมนต์ขนาดใหญ่	83
67	กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาททั้งสองข้าง ในกรณีที่ใช้ เอลิเมนต์ขนาดใหญ่	83
68	ภาพแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่และ นำค่าแรงโน้มถ่วงของโลกเข้ามาพิจารณา	83
69	ภาพแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์เฉลี่ยของชิ้นงานมีขนาด เท่ากับ 750 mm. และในส่วนบริเวณที่สนใจคือ บริเวณข้อพระบาทมีขนาด 150 mm.	84
70	แสดงส่วนขยายขนาดเอลิเมนต์ขนาดเล็กบริเวณที่สนใจ	85
71	แสดง Stress ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างซ้ายของเอลิเมนต์ละเอียด	86
72	แสดง Stress ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างขวาของเอลิเมนต์ละเอียด	86
73	แสดงการเปรียบเทียบ Stress ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาททั้งสองข้าง ของเอลิเมนต์ละเอียด	87
ภาพผนวกที่		
1	ขนาดขององค์จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	88
2	รายละเอียดในแต่ละมุมมอง	88
3	รายละเอียดแรงที่ใส่ในแต่ละชั้น	89
4	รายละเอียดเอลิเมนต์ขนาด 1000 mm.	90
5	รายละเอียดเอลิเมนต์ขนาด 750 mm.	90
6	รายละเอียดเอลิเมนต์ขนาดโดยเฉลี่ยทั้งองค์พระขนาด 750 mm. และ บริเวณที่สนใจขนาดเท่า 150 mm.	91

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่รับลมมีค่าเท่ากับผลคูณของความกว้างของอาคาร กับมิติในแนวดิ่งของพื้นที่ที่พิจารณาแรง มีหน่วยเป็นตารางเมตร
C_e	=	ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ
C_g	=	ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม
C_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยลมที่กระทำภายนอกอาคาร
H	=	ความสูงของอาคารมีหน่วยเป็นเมตร
I	=	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม
P	=	หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร
q	=	หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร
$\bar{V}$	=	ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
Z	=	ความสูงจากพื้นดิน ณ ตำแหน่งที่คำนวณค่าหน่วยแรงลม มีหน่วยเป็นเมตร
ρ	=	ความหนาแน่นของมวลอากาศ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส

การใช้วิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูป

Endurable Analysis of Buddha Model Using Reverse Engineering and Finite Element Method

คำนำ

ในปัจจุบันกระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) ได้เข้ามามีบทบาทในงานอุตสาหกรรมไทยอย่างมาก โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถออกแบบต้นแบบ วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของต้นแบบแล้วจึงนำมาผลิตจริงได้ และในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงชิ้นส่วนเครื่องจักรกล มีความซับซ้อนทางด้านรูปร่างมากขึ้น ส่งผลให้การสร้างชิ้นงานโดยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) เป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก ดังนั้นวิธีการทางวิศวกรรมย้อนรอยจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ช่วยในการออกแบบ ส่งผลทำให้กระบวนการ มีความสะดวก และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ทั้งนี้ในการสร้างชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์ใช้กันมากในอุตสาหกรรมรถยนต์และชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมเหล่านี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยเพื่อการวิเคราะห์มานานแล้ว แต่ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากมีข้อจำกัดต่างๆ เช่น เรื่องการลงทุนของอุปกรณ์ และซอฟต์แวร์

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวิธีการและกระบวนการทางด้านวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้ในการสร้างองค์พระพุทธรูป โดยใช้เครื่องเก็บพิกัดสามมิติ ระบบเลเซอร์ มาใช้ในการเก็บข้อมูลควบคู่กับการใช้โปรแกรม Geo Magic และ Unigraphics มาช่วยในการสร้าง CAD Model เพื่อใช้ในการหาเส้นรอบองค์พระพุทธรูปเพื่อใช้ในการอ้างอิงในการก่อสร้าง ซึ่งองค์พระที่จะสร้างขึ้นมาใหม่นั้นมีความสูงที่ 32 เมตรโดยประมาณ นอกจากนี้แล้วยังได้นำ CAD File ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูป โดยพิจารณาแรงกระทำจากแรงลมในภูมิประเทศของสถานที่ก่อสร้าง คือ อำเภอห้วยกระเจา จังหวัดกาญจนบุรี โดยนำแรงลมสูงสุดในรอบ 10 ปีมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงที่ได้จะทำให้ทราบค่าบริเวณที่คาดว่าจะได้รับความเสียหายกับองค์พระพุทธรูป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเครื่องมือและกระบวนการที่ใช้ในงานวิศวกรรมย้อนรอยเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ขององค์พระพุทธรูป
2. เพื่อศึกษาถึงวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูป

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิศวกรรมย้อนรอยที่จะนำมาใช้ในการสร้างไฟล์พระพุทธรูปจำลอง
2. สร้างและออกแบบรูปจำลองทางคอมพิวเตอร์ของพระพุทธรูปเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์และจัดเป็นข้อมูลในการสร้างองค์พระพุทธรูปในสถานที่จริง

ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการศึกษาวิธีการใช้วิศวกรรมย้อนรอยช่วยในการออกแบบ
2. เพื่อเป็นการนำเอาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมย้อนรอยมาประยุกต์ใช้ในการสร้างหรือคัดลอกงานต้นแบบเพื่อใช้ในการทดลองหาความแข็งแรงและเป็นข้อมูลในการจัดสร้างจริง
3. เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมย้อนรอย คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แก่ผู้ที่สนใจ

การตรวจเอกสาร

ฉัตรชัย (2547) ได้กล่าวถึงการแก้ปัญหาหลักในการทำวิศวกรรมย้อนรอยในอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนคือการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติ (3D CAD Model) ให้เหมือนกับชิ้นงาน ต้นแบบ เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานโดยทั่วไปจะมีความโค้งเว้าของพื้นที่ผิวที่มีรัศมีความโค้ง เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้การวาดแบบจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CAD ทั่วไปเป็นไปได้ยากเนื่องจากไม่สามารถวัดมิติของชิ้นงานได้อย่างถูกต้องด้วยเครื่องมือวัดทั่วไป แบบจำลอง คอมพิวเตอร์ที่วาดได้จึงมีความคลาดเคลื่อนซึ่งส่งผลกระทบต่อเนื่องไปในขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ การใช้เทคโนโลยีสแกน 3 มิติสามารถช่วยแก้ไขปัญหการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติของ ชิ้นงานต้นแบบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว และยังสามารถใช้ตรวจสอบมิติเปรียบเทียบระหว่าง ชิ้นงานด้วยกันหรือเปรียบเทียบกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (CAD File) โครงการนี้เป็นการนำ เทคโนโลยีสแกน 3 มิติ มาแทนขั้นตอนการวาดแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในกระบวนการวิศวกรรม ย้อนรอยและได้ทดลองทำวิศวกรรมย้อนรอยของชิ้นงาน 5 ชิ้น ได้แก่ เมาส์คอมพิวเตอร์หัวไม้กอล์ฟ กันชนรถยนต์ แม่พิมพ์คุ่มือ EDM และหน้ากากโทรศัพท์มือถือ โดยผลผลิตสุดท้ายคือต้นแบบ และแม่พิมพ์ ซึ่งได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจ

ศุภสิทธิ์ (2549) ได้ศึกษาว่าในปัจจุบันมีการเริ่มนำเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยมาช่วยใน การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดในการลงทุนทั้งด้านอุปกรณ์และ ซอฟต์แวร์ที่ใช้ร่วมกับงานวิศวกรรมย้อนรอยที่มีมูลค่าที่สูง และเทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่มีให้เลือก หลายประเภท ทำให้ผู้ที่นำเอาระบบเหล่านี้เข้าไปใช้งานจำเป็นต้องเลือกความเหมาะสมกับงานที่ จะใช้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเปรียบเทียบและนำเสนอแนวทางการใช้งานที่เหมาะสมของ เครื่องเก็บค่าพิกัดสามมิติระบบเลเซอร์และเครื่องเก็บค่าพิกัดสามมิติระบบออปติค โดยตัวแปรที่ใช้ ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความแม่นยำในการเก็บพิกัดของชิ้นงาน ความผิดพลาดเนื่องจาก การเก็บพิกัดสามมิติในส่วนที่เป็นร่องลึก ความสามารถในการเก็บพิกัดสามมิติบนสีผิววัสดุ ระยะเวลาในการเตรียมเครื่องเก็บค่าพิกัดระบบเลเซอร์และออปติค ก่อนทำการใช้งาน การ เปรียบเทียบระยะเวลาและความเหมาะสมที่ใช้ในการเก็บพิกัดสามมิติในชิ้นงานตัวอย่างจากกลุ่ม ชิ้นงานประเภทต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าเครื่องเก็บค่าพิกัดสามมิติระบบเลเซอร์จะเหมาะกับชิ้นงาน ที่มีรูปทรงซับซ้อนไม่ราบเรียบ เช่น กังหันต้นกำลัง แม่พิมพ์ กระดุกมนุษย์ ส่วนเครื่องเก็บค่าสาม มิติระบบออปติค นั้นเหมาะสำหรับงานที่มีผิวเรียบและสะท้อนแสงน้อยเช่น กันชนรถยนต์ กันชนรถยนต์ กระโปรงหน้ารถยนต์ เป็นต้น

ศุภฤกษ์ (2537) ได้นำเอาวิศวกรรมย้อนรอยมาทำการการลอกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่สร้างจากผลิตภัณฑ์เซรามิก โมเดลรูปปั้นหรือไม้แกะสลักนั้น สามารถใช้เครื่องเลเซอร์ 3 มิติ ทำการวัดขนาดและตำแหน่งพิกัดผิวได้อย่างเที่ยงตรงแม่นยำ รวมทั้งการสร้างโมเดลในคอมพิวเตอร์ก็สามารถทำได้ใกล้เคียงกับขนาดของชิ้นงานจริง แต่ในการผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแบบ CNC ยังมีปัญหาในการขึ้นรูปในบริเวณที่เป็นหลุมที่มีขนาดเล็กกว่าดอกกัด (Cutter) ที่มีขายตามท้องตลาด รวมทั้งในบางบริเวณที่คมตัดไม่สามารถเข้าไปตัดเนื้อชิ้นงานได้ (Undercut) ซึ่งก็ทำให้รูปทรงและขนาดของชิ้นงานคลาดเคลื่อนไปจากต้นแบบ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปลงรูปทรงของชิ้นงานให้เหมาะสมกับการผลิต

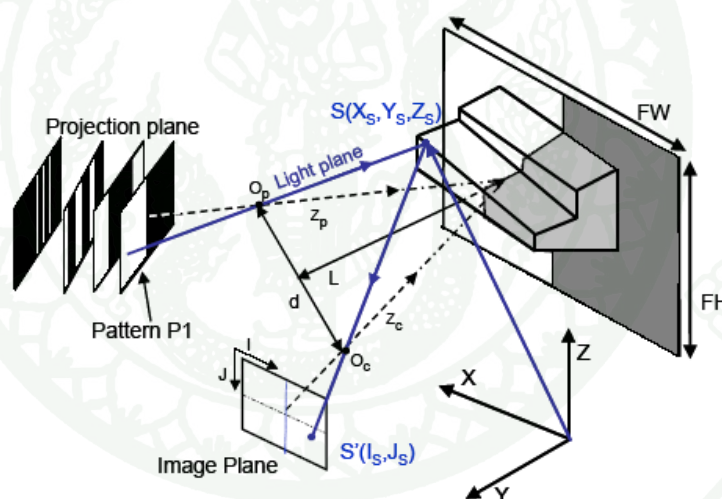
ศุภฤกษ์ (2537) ได้นำวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกข้อหัวเข่าของมนุษย์ในขณะยืนตรงด้วยขาทั้งสองข้างและในขณะนั่งของ เพราะเชื่อกันว่าสาเหตุของโรคกระดูกข้อเข่าเสื่อมเป็นผลมาจากการเกิดความเค้นขึ้นสูงในบริเวณสัมผัส ในการทดลองครั้งนี้ แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในทั้งสองกรณีจะได้ออกมาจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ มาทำการสแกนกระดูกต้นขาและกระดูกหน้าแข้งที่มีสภาพสดสมบูรณ์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์ 3 มิติ ก็จะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในระบบ 2 มิติ (ระนาบความเครียด) ด้วยเช่นกัน ความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดูกอ่อนผิวข้อคำนวณได้จากการวิเคราะห์ในระบบ 2 มิติและระบบ 3 มิติ จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงสูงสุดที่กระดูกอ่อนผิวข้อทนได้

Giovanna Sansoni และ Franco Docchio (2004) ได้ทำการสรุปขั้นตอนกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยในการเก็บค่าพิกัดจุดของชิ้นงานยานยนต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้ คือเริ่มจากการเก็บค่ากลุ่มพิกัดจุด (Cloud Points) ของชิ้นงานด้วยเครื่องมือเก็บค่า 3 มิติแบบ 3D-Optical Scanner และทิศทางของมุมที่เครื่องทำการเก็บค่าพิกัดต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการตกแต่งโครงพื้นผิวรูป 3 เหลี่ยม (Triangle) พร้อมจัดเส้นโครงร่าง (NURB) ให้สวยงามจนกระทั่งเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายคือได้แบบรูปร่างชิ้นงาน 3 มิติ (Final 3D Model) ออกมา

การศึกษาวิศวกรรมย้อนรอยนี้เป็นการสร้างแบบชิ้นงานขึ้นมาโดยการเก็บพิกัดจากรถยนต์จริงโดยการใช้วิธีดังกล่าวข้างต้นจากนั้นจะไปสู่ CAD Model ซึ่งมีขนาดสเกลเท่ากับ 1:1



ภาพที่ 1 OPL-3D: Optical digitizer แสดงลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้

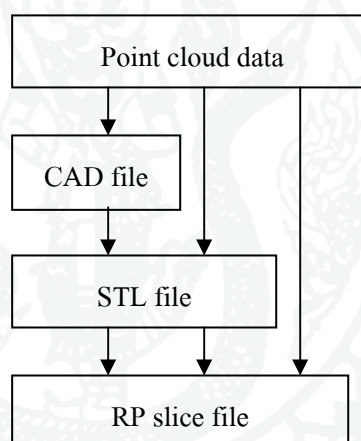


ภาพที่ 2 Optical Layout แสดงทิศทางของแนวลำแสงของอุปกรณ์

Kwan H. Lee และ H. Woo (2000) ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยทำให้สามารถสร้าง CAD จากผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ หรือที่มีอยู่แล้วโดยการเก็บค่าพิกัดจากพื้นผิวของชิ้นงาน Rapid Prototype เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่เป็นที่รู้จัก ซึ่งเป็นการสร้างตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ใหม่โดยใช้เทคนิคการผลิตแบบเป็นชั้นต่อชั้น (Layer) ขึ้นมา ในงานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างวิธีการใหม่ในการเชื่อมทั้งสองเทคโนโลยีนี้เข้าด้วยกัน ด้านวิศวกรรมย้อนรอยนั้นจะมีจำนวนจุดพิกัดเกาะกลุ่มกันเป็นจำนวนมหาศาลในระหว่างขั้นตอนการเก็บค่าสแกนชิ้นงาน สิ่งนี้จะนำไปสู่

การมีขนาดของไฟล์ที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการประมวลผลค่อนข้างช้าและเสียเวลามาก การทำแบบจำลองของพื้นผิวโดยใช้ข้อมูลจุดเหล่านี้จะต้องใช้เวลานานและต้องใช้ทักษะด้านการทำแบบจำลองอย่างเชี่ยวชาญ ทั้งนี้นักวิจัยบางท่านแนะนำให้ใช้การสร้างไฟล์แบบ .stl จากจุดเหล่านี้เพื่อหลีกเลี่ยงภาระในการสร้างพื้นผิว อย่างไรก็ตามไฟล์ STL ก็ยังมีข้อด้อยอยู่มาก ดังนั้นในการวิจัยนี้ค่าตัวแปร อัลกอริทึมและสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการประมวลผลได้ถูกทำการพัฒนาให้มีขนาดของไฟล์ที่เล็กลง ซึ่งทั้งนี้ประสิทธิภาพของตัวแปร อัลกอริทึมและสมการดังกล่าวจะวัดได้จากการเปรียบเทียบกับของเดิมที่มีอยู่แล้ว นอกจากนี้แผนภาพสรุปขั้นตอนต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ภาพที่ 3 แสดงลำดับขั้นตอนจากวิศวกรรมย้อนรอยจนกระทั่งถึงกระบวนการ Rapid Prototype



L.Li, N. Schemenauer, X. Peng, X.Peng และ P.Gu (2002) ได้ทำการสรุปงานวิจัยเรื่องนี้ไว้ว่า วิธีการนำเอาวิศวกรรมย้อนรอยเข้ามามีส่วนร่วมในการตรวจสอบชิ้นงานสร้างแบบและการคัดลอกรูปทรงของชิ้นงานที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการออกแบบ โดยหลักการทั่วไปแล้วจะต้องมีการทำการเก็บพิกัดข้อมูล (Digitizing) สร้างและตกแต่งผิวด้วยโปรแกรมเฉพาะ และท้ายสุดคือการแปลงไฟล์ให้เป็น CAD เพื่อทำการผลิตชิ้นงานจริงต่อไป โดยที่การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องนั้น ทางคณะผู้วิจัยได้หยิบประเด็นเกี่ยวกับ Marching Cubes Algorithm ซึ่งเป็นการพัฒนาในด้านของการจัดเรียงตัวของตาข่าย (Grid) ในช่วงที่ทำการตกแต่งและปรับสภาพพื้นผิวของชิ้นงานจากจุดที่ได้จากการสแกนมาเป็นพื้นผิวที่สวยงาม

A.J. McEvily (2005) ได้ทำการศึกษาระบบเครื่องยนต์ของรถยนต์ 4 ที่นั่ง, เครื่องบินส่วนตัว, ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบเครื่องยนต์ ทำให้ทราบว่าระบบดังกล่าวถูกควบคุมโดย Carburetor Butterfly Valve ซึ่งตัววาล์วนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะกลมบางที่ติดอยู่กับแกนโลหะซึ่งติดอยู่ในบุช (Bush) โกลักับปลายแต่ละด้านของแกน ทั้งนี้นักบินทำการปรับตำแหน่งของ butterfly valve เพื่อควบคุมการเปิดปิด เมื่อถึงเวลา Overhaul เครื่องส่วนแกนและบุช (Bush) จึงมีการสึกหรอทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยน แต่ในกรณีนี้พบว่าบริษัทผู้ผลิต butterfly valve นั้นได้ปิดกิจการไปแล้ว บริษัทผู้ผลิตอีกรายจึงจำเป็นต้องใช้วิศวกรรมย้อนรอยเข้ามาใช้ในการผลิตชิ้นส่วน โดยการลอกรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ของวาล์ว อย่างไรก็ตามความสำคัญของการกำจัดและควบคุมด้านความร้อนได้ถูกมองข้ามไป และเป็นผลทำให้ butterfly valve ทำงานผิดปกติในขณะทำการบิน ในกรณีศึกษาครั้งนี้ได้สรุปว่า การใช้วิศวกรรมย้อนรอยนั้นมีส่วนช่วยทำให้เราสามารถถอดแบบจากชิ้นงานจริงได้ถึงแม้ว่าเราจะไม่มีความรู้แบบ CAD มาก่อนก็ตาม และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นมิได้เกิดจากการถอดแบบแต่อย่างใด หากว่าการประกอบและติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ จะต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆ ด้านที่อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบเครื่องจักรกลต่างๆ ได้

Kwan H. Lee และ Hyun-pung Park (2000) ได้ทำการตรวจวัดสำหรับการผลิตขนาดใหญ่และความสำคัญของการควบคุมคุณภาพมาสามารถเน้นย้ำได้ในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากการพัฒนาของเทคโนโลยีด้านเครื่องเลเซอร์ และความแม่นยำของขั้นตอนการสแกนนั้นจะต้องมีการปรับปรุงอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ 100% อย่างไรก็ตามเครื่องเลเซอร์นั้นใช้ความรวดเร็วในการเก็บค่าพิกัดมากกว่าเครื่อง CMM การใช้เทคโนโลยีเครื่องเลเซอร์สแกนสามารถเก็บรายละเอียดได้ค่อนข้างครบถ้วนของชิ้นงาน ทั้งนี้เพราะลำแสงสามารถเข้าถึงทุกซอกทุกมุมของชิ้นงานได้ดีกว่าอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดแบบอื่น ในงานวิจัยเรื่องนี้จะเน้นในการนำอัลกอริทึมไปใช้ในการวัดแบบอัตโนมัติสำหรับเลเซอร์สแกน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ขั้นแรก การสแกนต้องคว้าวาล์วของเลเซอร์สแกนสามารถเข้าถึงชิ้นงานได้ครบถ้วนหรือไม่ หมายความว่ามีการมีระยะมุมกล้องที่เหมาะสม ความลึกของรูและมุมต่างๆ และหลีกเลี่ยงการชนด้วย Probe ขั้นที่สอง จำนวน Cloud Points ต้องเพียงพอต่อการคำนวณและสร้างพื้นผิวชิ้นงาน ขั้นตอนที่สาม คือการทำการสแกนด้วยจำนวนครั้งที่น้อยที่สุด

ทฤษฎีของวิศวกรรมย้อนรอย

วิศวกรรมย้อนรอย เป็นกระบวนการผลิตชิ้นส่วน ผลิตภัณฑ์ และอุปกรณ์ต่างๆ โดยอาศัย การตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ หรืออุปกรณ์ ต้นแบบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสืบค้นข้อมูลทางเทคนิค การย้อนรอยขนาดและรูปร่างของต้นแบบ วัสดุและกรรมวิธีการผลิต รวมทั้งการตรวจสอบสมบัติและสมรรถนะของผลิตภัณฑ์

การนำวิศวกรรมย้อนรอยไปประยุกต์ใช้

1. วัตถุโบราณที่ไม่สามารถทำการวัดขนาดและออกแบบเพื่อที่จะทำแม่พิมพ์ ด้วยวิธีการ CAD/CAM ได้ ทั้งนี้เพราะอาจเกิดความเสียหายต่อวัตถุนั้นๆ
2. วัตถุที่ได้รับการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงขนาดแต่ไม่ได้มีการจดบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นไว้
3. ในกรณีที่ต้องการออกแบบวัตถุใหม่วิศวกรรมย้อนรอยสามารถสร้างรูปแบบของวัตถุ เป็นลักษณะ 3 มิติได้ และสามารถนำแบบนั้นมาใช้ซ้ำ เพื่อเป็นการประหยัดเวลา และเงินอีกด้วย
4. สำหรับวัตถุที่ถูกนำเข้ามาจากต่างประเทศ และข้อมูลต่างๆ อาทิ ขนาด ความกว้าง ความ ยาว ของวัตถุไม่ได้แนบมาด้วย
5. การเปรียบเทียบมาตรฐานของวัตถุในเชิงคุณภาพ กล่าวคือผลิตภัณฑ์จากบริษัทที่มี คุณภาพโดยวัดจาก รูปทรง ขนาด หรือแม้กระทั่งความสวยงามของสินค้าที่ดีกว่า บริษัทก็จะได้รับ ความพึงพอใจของลูกค้า วิศวกรรมย้อนรอยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในทางการผลิตได้
6. การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังจากการทำวัตถุต้นแบบ (Prototype) แล้ว
7. การสร้างชิ้นส่วนของมนุษย์ อาทิ ขี้ออกกระดูกสันหลัง

ชนิดของเลเซอร์สแกน 3 มิติ (3d Scanner)

ในการสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ด้วยวิศวกรรมย้อนรอยนั้น อุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งก็คือสแกนเนอร์ 3 มิติ ซึ่งใช้ในการวัด และเก็บตำแหน่งพิกัดจุดของพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบ สำหรับชนิดของสแกนเนอร์นั้นอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สแกนเนอร์แบบสัมผัส และแบบไม่สัมผัส ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีรายละเอียด และหลักการทำงานดังนี้

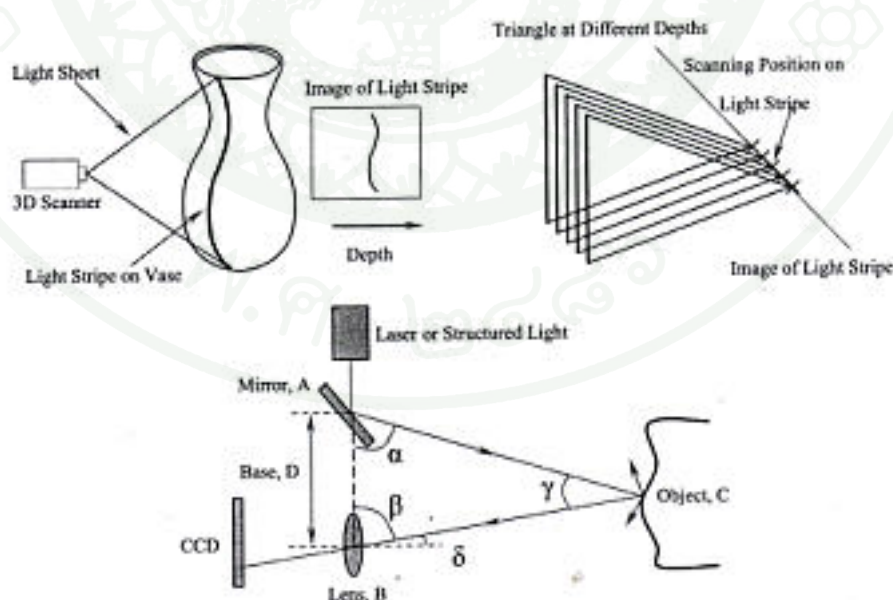
สแกนเนอร์แบบสัมผัส

สแกนเนอร์แบบสัมผัส หรือ (Coordinate Measuring Machine, CMM) เป็นอุปกรณ์ในการเก็บพิกัดจุดของชิ้นงานที่ต้องการ ด้วยการใช้หัววัด (Probe) และลงไปบนผิวงาน ตรงตำแหน่งที่ต้องการเมื่อเกิดการสัมผัสสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการแตะกันจะถูกส่งไปประมวลผลเป็นจุดพิกัด ซึ่งอ้างอิงตำแหน่งกับจุดอ้างอิงที่กำหนด (ในที่คือ Reference Ball) ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนได้กลุ่มจุดของพิกัด เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองต่อไป

สำหรับสแกนเนอร์แบบไม่สัมผัสนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมนำไปใช้ในงานตรวจสอบ (Inspection) ผลิตภัณฑ์มากกว่าการนำไปใช้ในการเก็บกลุ่มพิกัดจุด เพื่อสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ แม้ว่าความแม่นยำที่ได้จาก สแกนเนอร์แบบสัมผัส จะสูงมากก็ตาม เนื่องจากความเร็วในการสแกนงานจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ และความไวของตัวจับสัญญาณที่หัววัดเป็นสำคัญ อีกทั้งการแตะแต่ละครั้งจะได้ตำแหน่งของพิกัดจำนวนไม่มากนัก ทำให้การเก็บกลุ่มพิกัดจุดของกลุ่มจุดให้พอเพียงกับการนำไปสร้างแบบจำลอง ต้องใช้เวลามากกว่าการสแกนเนอร์แบบไม่สัมผัสอยู่พอสมควร รวมถึงพื้นที่ที่ติดตั้งต้องไม่มีการสั่นสะเทือนและมีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อป้องกันค่าความผิดพลาด ที่เกิดจากการขยายตัวหรือหดตัวของอุปกรณ์การวัด และตัวชิ้นงานเอง นอกจากนี้ยังไม่สามารถสแกนงานที่มีความอ่อนตัวสูง เช่น ชิ้นงานต้นแบบที่ผลิตขึ้นจากยาง รวมไปถึงต้นแบบที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของหัววัด หรือมีขนาดใหญ่เกินไปกว่าขนาดของโต๊ะทำงาน/ระยะทำงานของหัววัด

สแกนเนอร์ 3 มิติแบบไม่สัมผัส

สแกนเนอร์ 3 มิติแบบไม่สัมผัส เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บกลุ่มพิกัด เพื่อนำไปใช้ป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถพกพาไปในสถานที่ต่างๆ ได้สะดวก (ในกรณีของ CMM ส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่เฉพาะที่ และไม่มีเคลื่อนย้าย) รวมถึงการสแกนงานแต่ละครั้งจะเก็บจำนวนกลุ่มจุดพิกัดได้ค่อนข้างมาก ซึ่งกฎและความสำเร็จของสแกนเนอร์ 3 มิติแบบไม่สัมผัสจะอยู่ที่หลักการการทำงานของสแกนเนอร์ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนของแสงที่ส่งลงไปยังชิ้นงาน รวมถึงขีดความสามารถของอุปกรณ์รับสัญญาณการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบชิ้นงานนั้น การทำงานโดยรวมของสแกนเนอร์ 3 มิติแบบไม่สัมผัสนั้นจะอาศัยหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์และเทคนิคที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละผู้ผลิต แต่ที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่า Triangulation Principle ซึ่งเป็นหลักการคำนวณหาตำแหน่งความลึกของพิกัดจุดของวัตถุที่ต้องการ วิธีการนี้จะเริ่มจากการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีลักษณะเป็นแนวยาว ฉายลงไปยังวัตถุ เพื่อให้ลำแสงสะท้อนกลับมาที่อุปกรณ์รับสัญญาณตำแหน่งของลำแสง (CCD) โดยแต่ละตำแหน่งในแนวลำแสงที่ตกกระทบ และสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์รับสัญญาณตำแหน่งของลำแสงจะเป็นหนึ่งพิกัดจุดที่ได้จาก Triangulation Principle ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นจุดพิกัดบนหน้าจอคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 4 แสดงหลักการทำงานของสแกนเนอร์ 3 มิติแบบไม่สัมผัส

หากพิจารณาที่ตำแหน่งใดๆ (C) บนแนวลำแสงที่ตกกระทบบนวัตถุ และสะท้อนกลับไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณตำแหน่งของลำแสง จะสามารถแสดงให้เห็นหลักการคำนวณของ Triangulation Principle ได้ ดังภาพที่ 3 เมื่อ D เป็นระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเลนส์รับภาพ (ตัวกล้อง) และมุม α เป็นมุมการวางตัวของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งทั้งสองค่าเป็นค่าที่ผู้ผลิตได้ออกแบบไว้ การคำนวณในมุมการวางตัวของลำแสงที่สะท้อนจากวัตถุไปที่อุปกรณ์รับสัญญาณตำแหน่งของลำแสง (β) สามารถกระทำด้วยการลากแนว BC เริ่มจากแนวกึ่งกลางของเลนส์ ไปยังจุดที่ลำแสงตกกระทบบนวัตถุ (C) ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดจะอยู่ในลักษณะของสามเหลี่ยม ABC เมื่อได้สามเหลี่ยม ABC และทราบค่าของระยะ D ค่าของมุม α และมุม β ก็จะสามารถหาค่าความลึกของตำแหน่งพิกัด และมุม γ ซึ่งใช้คำนวณหาความแม่นยำของความลึกในการสแกนชิ้นงานได้ โดยในส่วนของมุม γ นั้นหากมุมดังกล่าวมีค่าน้อยๆ (ระยะ D มีค่าน้อย) ความแม่นยำของการวัดค่าความลึกจะต่ำ ส่วนกรณีที่มุม γ มีค่าเท่ากับ 0 จะไม่สามารถคำนวณค่าระดับความลึกได้ เนื่องจากความลึกมีค่าเป็นอนันต์ ส่วนกรณีที่มุม γ มีค่ามาก ความแม่นยำของการวัดค่าความลึกก็จะมีค่ามากตามไปด้วย

สแกนเนอร์ 3 มิติแบบออปติค

เป็นสแกนเนอร์ 3 มิติแบบไม่สัมผัสที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงความถี่สูงในการสแกนชิ้นงาน องค์ประกอบของสแกนเนอร์ประเภทนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ตัวสแกนเนอร์ 3 มิติ และชุดประมวลผล ที่ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์และ โปรแกรมคำนวณพิกัดจุดสำหรับบันทึก และแสดงผลของกลุ่มพิกัดจุดที่ได้จากการสแกน หลักการทำงานของสแกนเนอร์แบบใช้แสง โดยทั่วไปนั้น จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า “White Light” ในการสร้างแนว หรือแถบของแสงซึ่งมีลักษณะเป็นแถบมืดสลับกับแถบสว่างฉายลงไปยังพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบเพื่อให้ CCD ทำการจับตำแหน่งของแสงสะท้อน และคำนวณตำแหน่งจุดพิกัด

สแกนเนอร์ 3 มิติแบบเลเซอร์

เป็นสแกนเนอร์แบบไม่สัมผัสที่ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ลำแสงสีแดง) เพื่อสแกนชิ้นงาน สแกนเนอร์ประเภทนี้จะมีส่วนประกอบเหมือนสแกนเนอร์ 3 มิติแบบใช้แสงคือ ตัวสแกนเนอร์ 3 มิติ และชุดประมวลผล ที่ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ และ โปรแกรมคำนวณพิกัดจุดสำหรับบันทึก และแสดงผลพิกัดจุดที่ได้จากการสแกน

รูปแบบของสแกนเนอร์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน จะมีด้วยกันอยู่ 2 รูปแบบได้แก่แบบตาราง (2D Array) ซึ่งเป็นการยิงลำแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะเป็นแนวกริดในระนาบลงไปบนพื้นผิว และกระทำการสร้างจุดพิกัดจากการสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ ส่วนใหญ่สแกนเนอร์รูปแบบนี้จะใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเป็นหลัก เช่นใช้ในการตรวจสอบความโค้งของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือความเรียบของพื้นผิว อีกแบบหนึ่งจะใช้กับการสแกนชิ้นงานต้นแบบ เพื่อสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เรียกว่าแบบ แนวเส้น สแกนเนอร์แบบนี้ สามารถสแกนเก็บพิกัดได้ด้วยการฉายแนวเลเซอร์ที่เป็นแถบเล็กๆ ลงไปบนชิ้นงานและทำการคำนวณตำแหน่งจุดพิกัด จากการสะท้อนเหมือนในสแกนเนอร์ 3 มิติแบบออปติคเช่นกัน ในส่วนของเลเซอร์สแกนเนอร์ แบบแนวเส้นเมื่อเริ่มทำการสแกน ลำแสงเลเซอร์จะถูกฉายออกมาในรูปของแนวเส้นพาดผ่านลงไปบนวัตถุ เมื่อมีการสะท้อนของแสงเลเซอร์กลับเข้าไปที่อุปกรณ์รับตำแหน่งสัญญาณตำแหน่งของลำแสงแบบ Charge Coupled Device (CCD Camera) สัญญาณจากอุปกรณ์รับสัญญาณตำแหน่งของลำแสงจะถูกส่งไปประมวลด้วยวิธี Triangulation Principle บนโปรแกรมคำนวณพิกัดจุด และแสดงผลของจุดพิกัดนั้นให้เห็นบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อขยับสแกนเนอร์ไปในทิศทางใดก็จะได้พิกัดจุดตามแนวของ เส้นของเลเซอร์ ด้วย

ปัจจุบันสแกนเนอร์ 3 มิติแบบเลเซอร์ได้ถูกพัฒนารูปแบบของเครื่องให้มีขนาดกระทัดรัด และปรับปรุงสมรรถนะให้สามารถสแกนงานให้มีสีสันทันเหมือนชิ้นงานจริง ได้เช่นเดียวกับสแกนเนอร์แบบออปติค

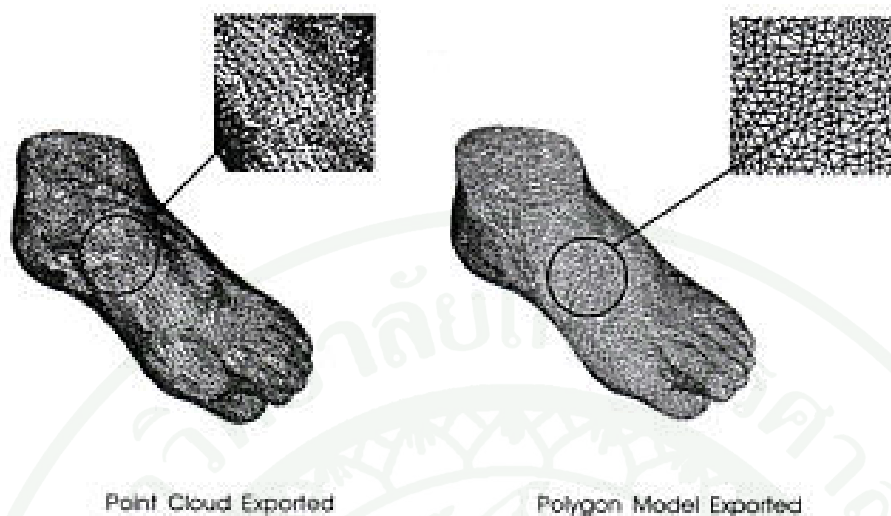
โปรแกรมคำนวณพิกัดจุด หรือ Digitizing Software มีหน้าที่ในการเปลี่ยนค่า และคำนวณสัญญาณความเข้มของแสงจาก CCD ให้กลายเป็นตำแหน่งของกลุ่มพิกัดจุด และแปลงกลุ่มพิกัดจุดเหล่านี้ให้กลายเป็นแบบจำลองโพลิกอน รวมถึงใช้ในการสร้างข้อมูลหน้าตัดของชิ้นงาน ส่งข้อมูลแบบจำลองออกเป็นไฟล์ต่างๆ เช่น STL Format และตรวจสอบคุณภาพ ด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่สแกนได้ กับข้อมูลต้นแบบ หรือข้อมูลที่สแกนไว้ก่อนหน้านี้ โดยความสามารถ ตลอดจนลักษณะการใช้งานของโปรแกรมคำนวณพิกัดจุด อาจแตกต่างกันออกไปขึ้นกับการพัฒนาของผู้ผลิตสแกนเนอร์นั้นๆ เป็นหลัก

สำหรับรูปแบบการทำงานนั้น โปรแกรมคำนวณพิกัดจุดจะใช้งานร่วมกับ สแกนเนอร์ 3 มิติโดยมีหน่วยประมวลผลกลาง หรือคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งการ์ดแปลงสัญญาณจาก CCD Camera เป็นสื่อกลางในการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างสแกนเนอร์ กับซอฟต์แวร์ เมื่อมีสัญญาณส่งมาจาก CCD

ตัว Frame Grabber จะทำการแปลงสัญญาณ และประมวลผลร่วมกับหน่วยประมวลผลเพื่อเปลี่ยนสัญญาณดังกล่าวให้เป็นพิกัดจุด และแสดงผลลงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งกรณีของสแกนเนอร์ 3 มิติแบบออปติค โปรแกรมคำนวณพิกัดจุดยังทำหน้าที่ในการประกอบ กลุ่มพิกัดจุดที่ได้จากการสแกนในแต่ละครั้งเข้าด้วยกัน ในส่วนของการทำงานภายในโปรแกรมคำนวณพิกัดจุดเองนั้น หลังจากได้จุดพิกัดทั้งหมดแล้วตัวโปรแกรมสามารถส่งข้อมูลดังกล่าวออกไปใช้งานกับโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอย ได้โดยตรง หรือปรับเปลี่ยนกลุ่มพิกัดจุดดังกล่าวให้กลายเป็นแบบจำลองโพลิกอน รวมถึงสามารถตรวจสอบความเบี่ยงเบนของชิ้นงานสแกนแต่ละชิ้น ด้วยการเปรียบเทียบตำแหน่งการวางตัวของกลุ่มพิกัดจุดของชิ้นงานต้นแบบแต่ละชิ้นได้อีกด้วย โดยกรณีของการส่งข้อมูลจากการสแกนงานออกไปนั้น สามารถกระทำได้ 2 แบบคือ

แบบที่หนึ่ง เป็นการส่งกลุ่มพิกัดจุดชิ้นงานต้นแบบออกไปใช้งานโดยตรง ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ในรูปแบบของไฟล์มาตรฐานเช่น ASCII File (*.ASC) หรือ Data File (*.DAT)

แบบที่สอง เป็นการส่งข้อมูลในรูปแบบจำลองโพลิกอน ซึ่งสร้างขึ้นโดยการลากเส้นเชื่อมต่อจุดพิกัดให้เกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมเล็กๆ ต่อกัน โดยมีพิกัดจุดดังกล่าวเป็นจุดมุมของสามเหลี่ยม แบบจำลองโพลิกอนอาจมีรูปร่างลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม หรือมากกว่าก็ได้ แต่ปกติจะเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangles) เนื่องจากมีรูปร่างคำนวณไม่ซับซ้อน ให้อยู่ละเอียดของแบบจำลองค่อนข้างดี และใช้ระยะเวลาในการคำนวณไม่นานนัก



ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างนำพิกัดจุด (ซ้าย) และแบบจำลองโพลิกอน(ขวา) ของชิ้นงานต้นแบบไปใช้งาน

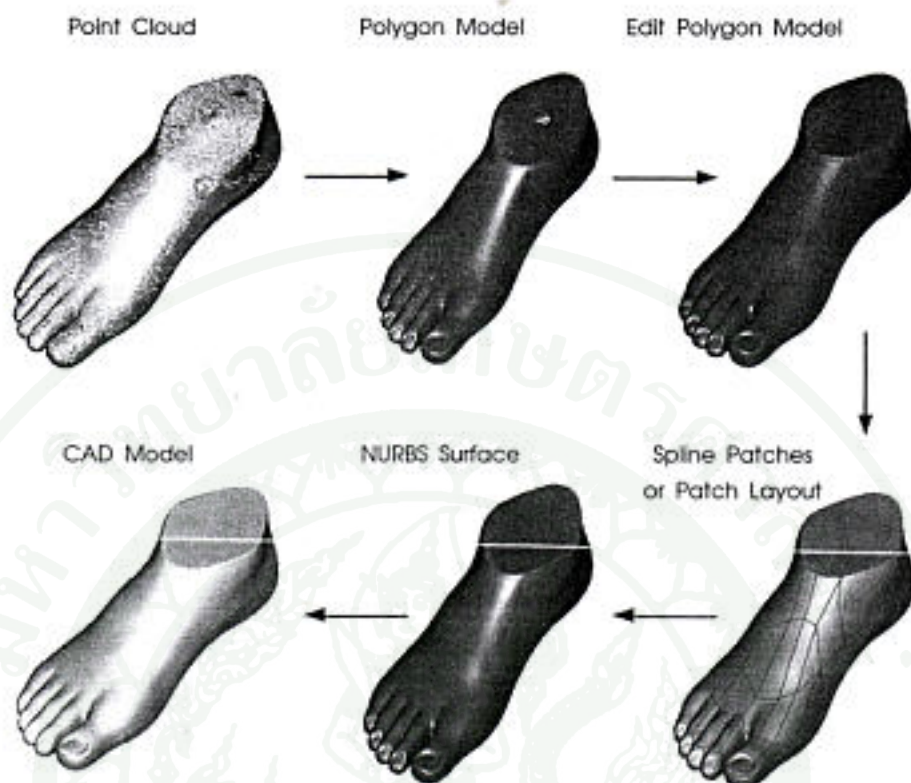
หลังจากได้แบบจำลองโพลิกอนแล้ว ผู้ใช้สามารถส่งข้อมูลดังกล่าวออกไปในรูปแบบของ STL File(แบบจำลองโพลิกอน ที่เกิดจากการเชื่อมต่อพิกัดจุดเป็นโพลิกอนแบบสามเหลี่ยม) เพื่อใช้ในการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototype) หรือส่งออกไปในฟอร์แมตของเครื่องสแกน เช่น GOM File (*G3D) เพื่อนำไปใช้งานต่อบนโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอย ส่วนกรณีที่มีการสร้างแนวตัดขวางในแนวเนต่างๆ (Section) บนแบบจำลองโพลิกอน เพื่อนำไปใช้เป็นแนวโครงในการขึ้นรูปพื้นผิวด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบก็สามารถส่งไฟล์ออกเป็นรูปแบบมาตรฐานเช่น IGES File (*IGS) ได้เช่นกัน

โปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering Software)

โปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอย เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนพิกัดจุด หรือแบบจำลองโพลิกอนให้กลายเป็นแบบจำลองพื้นผิวที่นิยามได้ด้วย Isoparametric Function หรือเรียกว่า NURBS Surface (Non-Uniform Rational B-Splines Surface) และสามารถนำไปใช้ในโปรแกรมช่วยออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) อื่นๆ ได้ตามปกติ

ปัจจุบันโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอย ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถใช้งานได้ในวงกว้าง มีความหลากหลาย และง่ายต่อการใช้งาน แม้ว่าโปรแกรมลักษณะดังกล่าวจะมีให้เลือกใช้เป็นจำนวนมาก แต่แนวคิดหรือหลักการในการพัฒนาโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยยังคงดำเนินไปในทิศทางเดียวกันซึ่งอาจแบ่งได้เป็นสองแนวทางคือ โปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยที่กระทำกับแบบจำลองโพลีกอนโดยตรง และโปรแกรมที่สามารถที่จะอธิบายแนวทางการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติจากแบบจำลองโพลีกอนได้

ประเภทที่ 1 โปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยที่กระทำกับแบบจำลองโพลีกอนโดยตรง มักจะเป็นโปรแกรมเดี่ยวที่ไม่มีการผนวกเข้ากับโปรแกรมช่วยออกแบบอื่นๆ ลักษณะที่เห็นได้อย่างเด่นชัดของโปรแกรมประเภทนี้ก็คือ กระบวนการเปลี่ยนแบบจำลองจะกระทำกับแบบจำลองโพลีกอนที่รับเข้ามาโดยตรง ขั้นตอนการดำเนินงาน จะเริ่มจากการนำพิกัดจุด หรือแบบจำลองโพลีกอนที่ได้จากโปรแกรมคำนวณพิกัดจุดเข้ามาใช้งาน ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวผู้ใช้สามารถทำการลดจำนวนพิกัดจุดเพื่อลดข้อมูล หรือขจัด Noise ที่เกิดขึ้น รวมถึงการปรับขนาด หรือจำนวนของโพลีกอน จากนั้นจึงทำการคำนวณการสร้างแบบจำลองโพลีกอนใหม่ เมื่อได้แบบจำลองโพลีกอนที่มีจำนวนหรือขนาดที่ต้องการแล้ว จึงทำการปรับแต่งรายละเอียด เช่นการลดพื้นผิวที่ซ้อนเหลื่อมกัน การปิดผิวรูเจาะ การสร้างแนวเส้นเพื่อแสดงตำแหน่งของรูเจาะต่างๆ การสร้างระนาบ หรือแกนอ้างอิง การตัดแต่งขอบ การสร้างแนวตัดขวาง การปรับความคมชัดของขอบแบบจำลองโพลีกอน รวมถึงการปรับผิวให้ตึง และการเกลี่ยผิวเป็นต้น หลังจากปรับแบบจำลองโพลีกอนจนได้รูปร่างตามต้องการ จึงเข้าสู่กระบวนการกำหนดเส้นขอบเขตของพื้นผิวที่จะมาปิดบนแบบจำลองนั้น (Spline Patches) วิธีการก็คือสร้างเส้น Spline by Points ลงไปบนแบบจำลองโพลีกอนเพื่อแบ่งแบบจำลองโพลีกอนออกเป็นแผ่นย่อยๆ สำหรับใช้สร้าง NURBS Surface ขั้นตอนดังกล่าวค่อนข้างมีความสำคัญ เพราะจำนวนแผ่นย่อยมีผลโดยตรงกับรูปร่าง และความแม่นยำของแบบจำลองของแบบจำลอง ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการปู NURBS Surface ลงในแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่กำหนดขึ้นบนแบบจำลองโพลีกอน พื้นผิวแต่ละแผ่นจะเชื่อมต่อ และสัมผัสกับพื้นผิวที่อยู่ติดกันไปตลอดทั้งแบบจำลองแบบจำลองพื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้งานต่อบนโปรแกรมช่วยออกแบบ โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม หรือโปรแกรมช่วยในการผลิต ทั่วไปได้โดยตรง ด้วยการส่งผ่านไฟล์รูปแบบมาตรฐาน เช่น IGES หรือ STEP เป็นต้น



ภาพที่ 6 แสดงกระบวนการทำงานของโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยที่กระทำกับแบบ
โพลีกอนโดยตรง

เนื่องจากขั้นตอนทั้งหมดไม่สามารถดำเนินการย้อนกลับแบบ หรือมีลำดับขั้น ความสัมพันธ์ของขั้นตอนการทำงานที่เกี่ยวข้องกัน (Parametric) ดังนั้นการแก้ไขแบบจำลองใน ขั้นตอนใดๆ จะต้องลบขั้นตอนหลังจากนั้นทิ้งไปให้หมดก่อน ทำให้การแก้ไขปรับแต่ง หรือปรับเปลี่ยนแบบจำลอง ค่อนข้างใช้เวลา และกระทำไม่ได้สะดวกนัก อีกทั้งหากผู้ใช้โปรแกรมไม่มีความชำนาญมากพอ พื้นผิวแบบจำลองที่ได้ อาจไม่ตรงตามความต้องการ หรืออาจเกิด ความผิดพลาดเช่น ผิวไม่ราบเรียบสม่ำเสมอ ผิวเป็นรอยขรุขระ หรือแนวขอบคม อยู่เลยไปจากตำแหน่งที่ กำหนดเป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการสร้างแบบจำลองพื้นผิวจากโปรแกรมลักษณะดังกล่าว เป็นการอ้างอิงข้อมูลจากแบบจำลองโพลีกอน ที่ได้จากพิกัดจุดของชิ้นงานโดยตรง ดังนั้น แบบจำลองจึงได้มีความแม่นยำสูง เพราะไม่มีการสูญเสียข้อมูลในระหว่างการปรับแต่ง ตัวอย่าง ของโปรแกรมลักษณะนี้ได้แก่โปรแกรม Geomagic Studio เป็นต้น

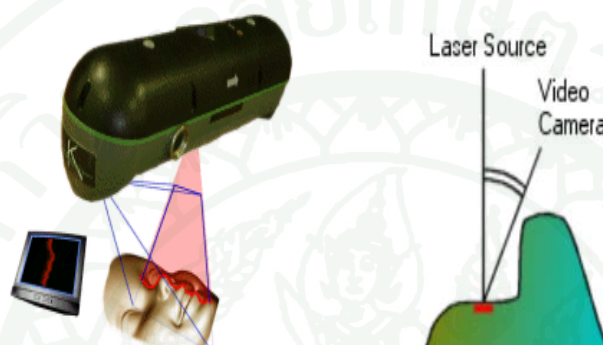
ประเภทที่ 2 โปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยที่ผนวกรวมเข้ากับโปรแกรมช่วยออกแบบ การปรับเปลี่ยนแบบจำลองโพลิกอนให้กลายเป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติ อีกรูปแบบหนึ่งก็คือ การประยุกต์ใช้โปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอยที่ผนวกรวมอยู่กับโปรแกรมออกแบบ ลักษณะการทำงานของโปรแกรม จะแตกต่างไปจากแบบแรกเล็กน้อย กล่าวคือ รูปแบบการทำงานจะเป็นการสร้างหรือนำ Geometry ต่างๆ บนแบบจำลองโพลิกอนมาใช้เป็นแนวโครงสร้างในการสร้างผิวใหม่ ด้วยการอาศัยความสามารถของโปรแกรมในการคำนวณพื้นผิวจากข้อมูลของแบบจำลองโพลิกอนบริเวณนั้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเสมือนกับการสร้างแบบจำลองพื้นผิวขึ้นมาใหม่ โดยอาศัยเส้นโครงร่างต่างๆ ที่เกิดจากการกระทำ Parametric Features กับแบบจำลองโพลิกอนร่วมกับความสามารถของกลุ่มคำสั่งในการขึ้นรูปพื้นผิวของส่วนโปรแกรมช่วยในการออกแบบนั้น สำหรับขั้นตอนการทำงานโดยสรุป จะเริ่มจากการลอกเส้นขอบเขต การสร้างแนวตัดขวาง ในทิศทางที่ต้องการ หรือการสร้าง Geometry ด้วยกรรมวิธีต่างๆ บนแบบจำลองโพลิกอน จากนั้นจึงปรับความสม่ำเสมอของ Geometry เหล่านั้นด้วยชุดคำสั่งของส่วนโปรแกรมออกแบบที่ถูกผนวกเข้ากับโปรแกรมวิศวกรรมย้อนรอย จนกระทั่งได้ Geometry ที่มีลักษณะตามต้องการ ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นโครงสร้างสำหรับการออกแบบพื้นผิว จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปพื้นผิวด้วยการใช้ข้อมูล Geometry ดังกล่าว และชุดคำสั่งในส่วนของโปรแกรมช่วยในการออกแบบ กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินไปเป็นวัฏจักรจนกระทั่งได้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติที่มีรูปร่างลักษณะตามต้องการ

อุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติในระบบเลเซอร์ (3D Laser Scanner)

1. เป็นเทคโนโลยีที่มีพื้นฐานมาจากการฉายแสงเป็นแนวทแยงสามเหลี่ยม (Triangulation) ลงบนวัตถุ
2. ภาพที่ได้นั้นจะมีลักษณะเหมือนจริงทั้งขนาดและรูปทรง โดยสามารถเก็บรายละเอียดของภาพได้มากกว่าล้านจุด ทำให้ความถูกต้องแม่นยำของรูปทรงที่ได้นั้นมีมากกว่าวิธีเดิมที่ใช้กันมา
3. นอกจากนี้ขนาดของมุมที่เกิดจากการฉายแสงเลเซอร์ก็มีผลต่อการจัดเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติลงในโปรแกรมด้วยเช่นกัน
4. โดยที่ขนาดมุม 0 องศา ก็คือจะไม่สามารถเก็บข้อมูลของวัตถุที่ถูกสแกนได้เลย

5. ขนาดมุม 90 องศา เป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดในการฉายแสงลงบนวัตถุ

6. แต่ทั้งนี้การฉายแสงเคลื่อนที่ไปมามากเกินไป ก็อาจจะไม่สามารถจับทิศทางของเส้นแสงเลเซอร์ที่ฉายแนวลงบนวัตถุได้



ภาพที่ 7 การทำงานของอุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติในระบบเลเซอร์

7. นอกจากนี้ก่อนทำการสแกนวัตถุอุปกรณ์เสริมที่จำเป็นคือ “สเปรย์แป้ง” ใช้เพื่อลดการสะท้อนของแสงที่มากเกินไปจนทำให้กล้องไม่สามารถจับรายละเอียดของภาพได้

8. ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแขนเครื่องเลเซอร์สแกน ตัวเซนเซอร์ และตำแหน่งของระบบขณะทำการสแกนวัตถุ ที่จะนำไปทำการแก้ไข โดยวัดขนาดจากต้นแบบจริง จากนั้นจึงนำไปแก้ไขในต้นแบบที่ได้ในคอมพิวเตอร์ต่อไป

หลักการทำงานของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ

เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ จะใช้เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) กำลังต่ำมาใช้ในการวัดระยะความสูงต่ำของพื้นผิว โดยทำการยิงแถบแสงเลเซอร์ (Laser Stripe) ลงบนผิวของวัตถุที่ต้องการวัด และอาศัยการสะท้อนกลับของเลเซอร์กับผิววัตถุมาโฟกัสเข้าไปในกล้อง CCD (Charge-Coupled device) โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นสัญญาณแบบพัลส์ (Pulse) และจะเป็นฟังก์ชันกับ

ระยะการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ ทำให้ข้อมูลที่อ่านได้มีปริมาณสูงถึง 10,000 จุดต่อวินาที จากนั้นก็จะส่งข้อมูลเข้าไปยัง อินเตอร์เฟซการ์ด (Interface Card) ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อแปลงข้อมูลแบบอนาล็อกเป็นดิจิทัลและส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้โปรแกรมทำการแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นพิกัดตำแหน่งของจุดต่างๆ ต่อไปโดยทั่วไปแล้วจะต้องมีการพ่นสีขาวลงบนวัตถุ เพื่อให้การสะท้อนของแสงเลเซอร์ดียิ่งขึ้น ระยะห่างระหว่างหัวเลเซอร์และผิววัตถุก็จะมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อความเที่ยงตรงในการวัดเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วระยะห่างระหว่างหัวเลเซอร์และผิววัตถุจะอยู่ที่ประมาณ 50-200 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดของหัวเลเซอร์

เส้นโค้งและพื้นผิวแบบบี-สไปล์ (B-Spline Curve and Surfaces) ที่ได้จากเครื่องเลเซอร์ 3 มิติ (3D Laser Scanner)

เส้นโค้งแบบบี-สไปล์ (B-Splines) ก็คือการต่อเส้นโค้งเบซีเยอร์ (Bezier) เข้าด้วยกัน ซึ่งเส้นโค้งแบบบี-สไปล์ นี้จะเป็นเส้นโค้งที่มีความซับซ้อนด้วยวิธีการควบคุมแบบเฉพาะพื้นที่ (Local Control) โครงสร้างพื้นฐานของเส้นโค้งแบบบี-สไปล์จะคล้ายคลึงกับเส้นโค้งแบบเบซีเยอร์ ซึ่งจะใช้ฟังก์ชันผสม (Blending Function) เป็นตัวกำหนดรูปร่างของเส้นโค้ง ตัวอย่างเช่นถ้าจำนวนของจุดควบคุมมีค่าเป็น $N+1$ จุด โดยมีพิกัดตำแหน่งเป็น $(X_0, Y_0), (X_1, Y_1), \dots, (X_N, Y_N)$ เส้นโค้งแบบบี-สไปล์ จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$Y(t) = \sum Y_i \cdot B(t)_{i,k}$$

$$X(t) = \sum X_i \cdot B(t)_{i,k}$$

โดยที่ $B(t)_{i,k}$ คือฟังก์ชันผสมของเส้นโค้งโดยที่ k เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมความราบเรียบของเส้นโค้ง ซึ่งถ้าค่า k มีค่าน้อยเส้นโค้งที่ได้จะใกล้เคียงกับข้อมูลแบบจุด แต่ถ้าค่า k มีค่ามากเส้นโค้งที่ได้จะมีความราบเรียบดีกว่าแต่เส้นโค้งที่ได้อาจเบี่ยงเบนออกไปจากข้อมูลแบบจุดมากกว่า ค่า k น้อยๆ สำหรับเส้นโค้งแบบบี-สไปล์ ค่าพารามิเตอร์ t จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง $N-k+2$ จากการศึกษารูปแบบต่างๆ ของเส้นโค้งพบว่าการสร้างเส้นโค้งแบบพารามетริกด้วยวิธีบี-สไปล์ จะให้รูปร่างของเส้นโค้งใกล้เคียงกับพิกัดตำแหน่งของจุดข้อมูลดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นในการทดลองนี้ จะใช้วิธีการสร้างเส้นโค้งแบบบี-สไปล์ ซึ่งมีลำดับชั้นกำลังสาม โดยมีชื่อที่นิยมเรียกกันว่า C^2 Cubic B-Spline ในการสร้างเส้นโค้งจากข้อมูลแบบจุดที่ได้จากเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ เพื่อนำไปสร้างพื้นผิว (Surface) ของวัตถุแบบพื้นผิวแบบบี-สไปล์ต่อไป ซึ่ง

พื้นผิวแบบบี-สไปล์นี้สามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของจุดควบคุมบางตำแหน่งโดยไม่ทำให้รูปร่างของพื้นผิวโดยรวมเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จุดควบคุมในการกำหนดพื้นผิวจะเป็นลักษณะของโครงตาข่าย (Mesh) ซึ่งแบ่งจำนวนออกเป็น $M \times N$ โดยพิกัดตำแหน่งของจุดควบคุม (Control Points) ในแกน X,Y,Z จะกำหนดเป็น CP_x, CP_y, CP_z พื้นผิวแบบบี-สไปล์จะมีรูปแบบของสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} X(u,v) &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n CP_x(i, j) \cdot N(u)_{i,k} \cdot N(v)_{j,k} \\ Y(u,v) &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n CP_y(i, j) \cdot N(u)_{i,k} \cdot N(v)_{j,k} \\ Z(u,v) &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n CP_z(i, j) \cdot N(u)_{i,k} \cdot N(v)_{j,k} \end{aligned}$$

โดยที่ $N(u)_{i,k}$ คือฟังก์ชันผลฐานและ k คือลำดับชั้น (Degree) ของฟังก์ชันผลฐานซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$N(u)_{i,k} = \frac{(u-t)N(u)_{i,k-1}}{(t_{i+k-1}-t_i)} + \frac{(t_{i+k}-u)N(u)_{i+1,k-1}}{(t_{i+k}-t_{i+1})}$$

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่าเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ จะมีความสะดวกในการวัดลอกแบบและให้ความละเอียดในการวัดสูงกว่าเครื่องมือวัดแบบสัมผัส รวมทั้งปริมาณข้อมูลที่ได้จากการวัดก็มีเพียงพอต่อการสร้างพื้นผิวของโมเดลในคอมพิวเตอร์ให้ใกล้เคียงกับพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยอันนี้ จะนำเอาเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 3 มิติ มาใช้ลอกแบบวัดชิ้นงานต้นแบบที่สร้างจากเซรามิกส์ เพื่อสร้างโมเดลในซอฟต์แวร์ CAD/CAM ด้วยวิธีการสร้างแบบ B-Spline Surface และสร้างข้อมูลเส้นทางการเดินของคมตัด เพื่อการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่น ให้ผลิตชิ้นงานอลูมิเนียมแผ่น ได้ใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุด

ทฤษฎีของคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

การวิจัยและพัฒนา ระบบ CAD ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องเป็นเวลากว่า 40 ปี โดยจุดมุ่งหมายของการพัฒนาเพื่อช่วยให้การออกแบบเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็ว นอกเหนือจากความสามารถในการแสดงภาพเป็น 3 มิติให้เห็นได้อย่างถูกต้องแล้ว ข้อมูลของชิ้นงานที่ออกแบบ

ต้องมีคุณสมบัติเป็นเสมือนวัตถุจริงที่มีน้ำหนักด้วย ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ของวัตถุรูปทรง 3 มิติที่ใช้เป็นฐานข้อมูลในโปรแกรม CAD มีอยู่ 3 แบบ คือ

แบบจำลองรูปโครงลวด (Wireframe model)

แบบจำลองรูปแผ่นผิว (Surface model)

แบบจำลองรูปวัตถุแข็งตัน หรือ โซลิดโมเดล (Solid model)

1. แบบจำลองรูปโครงลวด (Wire frame model)

Wire frame modeling คือการใช้เส้นโครงลวดกำหนดรูปร่างลักษณะของวัตถุ 3 มิติ รูปโครงลวดจะไม่มีพื้นผิวหน้า แต่มีเพียงเส้นขอบของโครงลวดประกอบขึ้นเป็นวัตถุ 3 มิติ การสร้างเส้น 3 มิติ จะคล้ายกับ 2D Drafting โดยจะมีคำสั่งที่ช่วยในการวาด แสดงผลและอื่นๆ เหมือนกันทั้งหมด แบบจำลองจะมีลักษณะเป็นโครงเส้นซึ่งประกอบขึ้นจากเส้นต่างๆ ที่วางตัวอยู่ในระบบพิกัดแบบ 3 มิติ โดยจะมีกลุ่มคำสั่งช่วยในการแสดงมุมมอง และการกำหนด Drawing View เพิ่มเติมขึ้นมา ข้อดีของเทคโนโลยีในการการสร้างเส้น 3 มิติจะอยู่ที่สามารถแสดงรูปร่างของแบบจำลองใน 3 มิติได้ และไม่มี ความซับซ้อนในการใช้งาน เนื่องจากไม่สามารถซ่อนเส้นในรูปทรง 3 มิติที่มองไม่เห็นไว้ได้ ทำให้ไม่ทราบว่ามีเส้นใดอยู่ด้านหน้า หรือด้านหลัง รวมถึงไม่สามารถคำนวณคุณสมบัติเฉพาะของแบบจำลอง (Specification) เช่น พื้นที่ ปริมาตร มวล ได้

2. แบบจำลองรูปแผ่นผิว (Surface Modeling)

แบบจำลองคอมพิวเตอร์แบบ รูปแผ่นผิว เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัตถุ 3 มิติ โดยเป็นการจำลองของแผ่นผิวที่มีเส้น (หรือโครงลวด) เป็นขอบหรือกรอบล้อมรอบ ความหนาของแผ่นไม่มีหรือเป็นศูนย์ แบบจำลองรูปแผ่นผิวจึงเปรียบเสมือนอาคารที่มีผ้าบางเป็นผนังและและหลังคาปิดโดยอิงเข้ากับเสาและคาน

แบบจำลองรูปแผ่นผิว เป็นวิธีการที่ซับซ้อนกว่าแบบจำลองรูปโครงลวดเนื่องจากมีการกำหนดขอบและพื้นผิวของวัตถุ 3 มิติ การสร้างแบบจำลองพื้นผิว เป็นการสร้างแบบจำลองทาง

เรขาคณิต (Geometric Model) ที่มีการนิยามพื้นผิวครอบคลุมบนจุดยอด และขอบของรูปทรง ซึ่งก็คือแบบจำลอง 3D Wireframe ที่มีการกำหนดพื้นผิวด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ลงไปบนขอบของแบบจำลองรูปโครงลวด สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวซ้อน และการนำผิวที่สร้างขึ้นไปใช้ในการจำลองการผลิตด้วย CAM หรือนำไปวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อใช้คำสั่งในการซ่อนรูปกับวัตถุ 3 มิติที่ขึ้นรูปด้วย แบบจำลองรูปแผ่นผิว

แบบจำลองรูปแผ่นผิว เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป 3 มิติ ที่มีพื้นผิวเป็นส่วนโค้งส่วนเว้าหรือพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบผิดปกติ เช่น แก้ว โซฟา รถยนต์ เรือ เครื่องบินและอื่นๆ เป็นต้น

ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองแผ่นผิว 3 มิติมีความซับซ้อนและมีขนาดของข้อมูลที่มากกว่าแบบโครงลวดโดยแบบจำลองแผ่นผิวประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของแบบโครงลวดที่เป็นตัวกำหนดขอบเขตของพื้นผิวทั้งหมด และสมการของผิวในรูปแบบสมการ $z = f(x, y)$ นอกจากนี้ค่า slope, tangent, normal, และ curvature ของทุกตำแหน่งบนผิวเป็นข้อมูลเสริมที่สามารถคำนวณได้จากสมการของผิวและแสดงค่าได้ เพื่อตรวจสอบความต่อเนื่องและความเรียบของผิว

สมการของแผ่นผิวมีหลายประเภท เช่น Bezier, B-Spline และ NURBS (Non Uniform Rational B-spline) เป็นต้น แต่ละประเภทมีความเหมาะสมเฉพาะตัว เช่น สมการผิวประเภทหนึ่งสามารถใช้ได้สวยกับผิวของรถยนต์และเครื่องบิน แต่ไม่อาจให้ผลที่สวยงามเมื่อนำไปใช้ผิวของใบหั่นหมู เป็นต้น

3. แบบจำลองรูปวัตถุแข็งตัน หรือ โซลิดโมเดล (Solid Modeling)

เทคโนโลยีล่าสุดของซอฟต์แวร์ CAD, CAD/CAM และ CAD/CAM/CAE เป็นการออกแบบวัตถุ 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ รูปวัตถุแข็งตัน หรือเรียกทับศัพท์ตามภาษาอังกฤษว่า “โซลิดโมเดล”

แบบจำลองคอมพิวเตอร์แบบโซลิดโมเดล ใช้หลักการของแผ่นผิวหลายแผ่นต่อขอบติดกันมิดชิด หรือเป็นผิวต่อเนื่อง (Boundary surface) ล้อมรอบครอบคลุมเป็นรูปทรงวัตถุ 3 มิติ ดังนั้น โซลิดโมเดลจึงมีฐานข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมดของแบบจำลองรูปโครงลวด และแบบจำลอง

รูปแผ่นผิว แต่มีคุณสมบัติเป็นวัตถุ 3 มิติที่แข็งตัน และมีน้ำหนักตามค่าความหนาแน่นของวัสดุที่จะกำหนดให้จริง

(Solid Modeling) เป็นการสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการสร้างรูปทรงเลขาคณิตพื้นฐาน เช่น สี่เหลี่ยม, ทรงกลม, ทรงกระบอก, กรวย จากนั้นรวมวัตถุเหล่านั้นเข้าด้วยกัน เพื่อสร้างวัตถุ 3 มิติรูปทรงแบบใหม่ที่มีความสลับซับซ้อนกว่าเดิม โดยการรวมวัตถุ 3 มิติเข้าด้วยกัน (union) หักลบวัตถุ 3 มิติออกจากกัน (subtract) และหาส่วนของวัตถุ 3 มิติที่ตัดกัน (intersection)

การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีความคล้ายคลึงกับ Surface Model ที่มีการนิยามจุดยอด ขอบ และพื้นผิวให้กับรูปทรง แต่จะต่างกันตรงที่ Solid Model สามารถรู้ได้ว่าตำแหน่งใดคือ ช่องว่าง (Space) พื้นผิว (Surface) หรือเนื้อตัน (Solid Material) ทำให้ทราบปริมาตร (Volume) มวล (Mass) ศูนย์กลางของปริมาตร (Centroid) โมเมนต์แรงเฉื่อย (Moments of inertia) ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าลักษณะจำเพาะ จำลองการผลิต หรือวิเคราะห์ทางวิศวกรรมอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการศึกษาวิศวกรรมย้อนรอยช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูปจำลอง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการสร้าง CAD ไฟล์ มาใช้ในขั้นตอนของการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆดังนี้คือ

1. เครื่องมือทางวิศวกรรมย้อนรอย

เครื่องมือทางวิศวกรรมย้อนรอยที่ช่วยในการเก็บรายละเอียดและข้อมูลซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

1.1 ชุด Portable Arm CMM



ภาพที่ 8 ชุด Portable Arm CMM

ข้อมูลเกี่ยวกับตัวเครื่อง

ตารางที่ 1 ข้อมูลเกี่ยวกับตัวเครื่องเลเซอร์สแกน

Cimcore 3000i	
Measuring Envelope	1.8 m (6 ft.)
Measuring Volume	3 m ³ (113 ft ³)
Single Point Sphere Test	+ 0.010 mm (0.0004 in.)
Point Repeatability	+ 0.010 mm (0.0007 in.)
Volumetric Length Accuracy	+ 0.010 mm (0.0004 in.)
Arm Weight	5.8 kg (12.7 lbs.)

2.2 ชุดหัวเลเซอร์สแกน Kreon รุ่น KZ-50



ภาพที่ 9 ชุดหัวเลเซอร์สแกน Kreon รุ่น KZ-50

ข้อมูลเกี่ยวกับหัวตรวจจับฟักัดสามมิติระบบเลเซอร์

ตารางที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับหัวจับฟักัดสามมิติ

ความสามารถในการเก็บกลุ่มฟักัดจุด (Cloud of point)	30,000 จุดต่อวินาที
ระดับความคมชัด (Ressolution)	10 ไมครอน
ความยาวแสงเลเซอร์	50 มิลลิเมตร
ระยะฉายของแสงเลเซอร์	100 มิลลิเมตร
น้ำหนักของหัวจับ	400 กรัม

2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยมีดังนี้

1. โปรแกรมยูนิกราฟฟิกส์ เอ็นเอ็กซ์ 5 (Unigraphics NX 5)
2. โปรแกรมโพลีโกเนีย 5 (Polygonia version 5)
3. โปรแกรมจีโอเมจิกสตูดิโอ 8 (Geomagic Studio version 8)

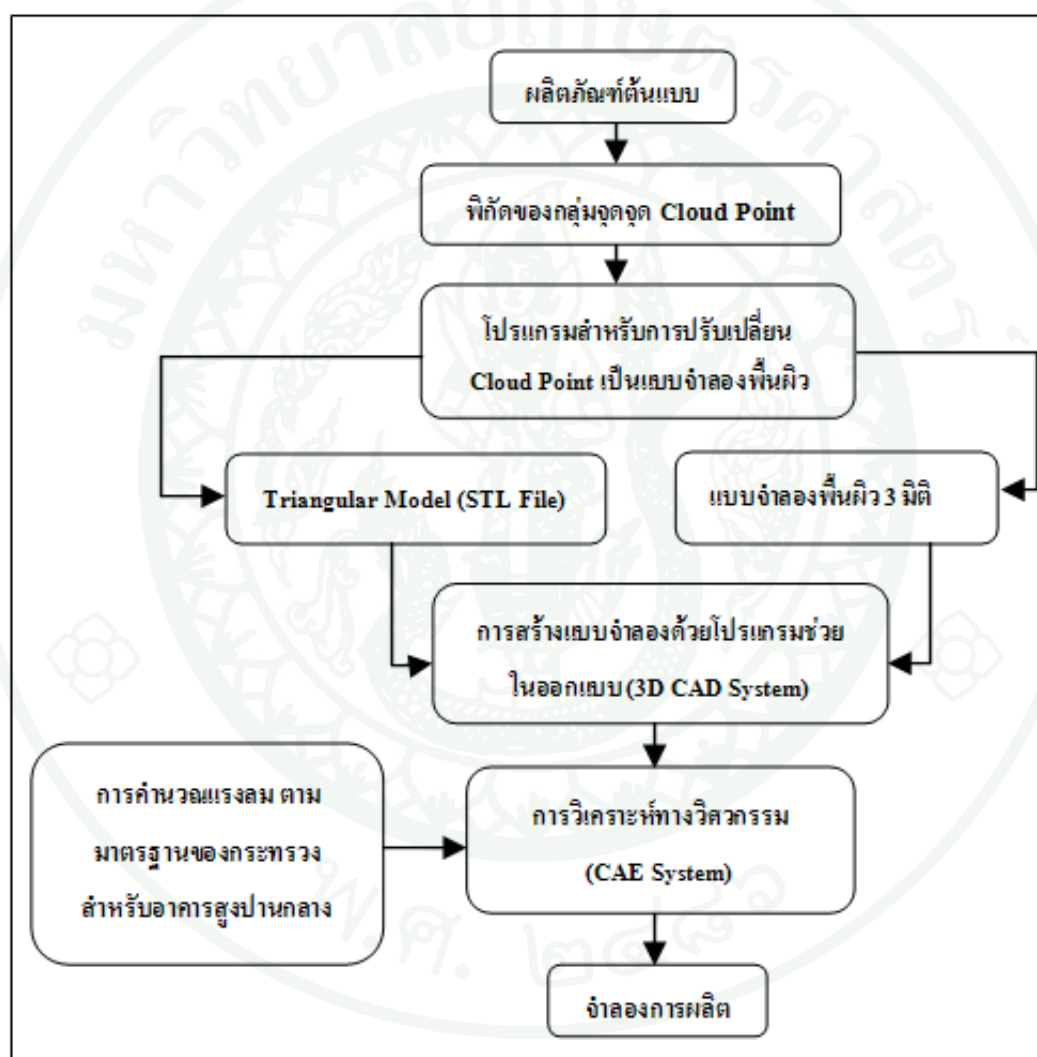
3. อุปกรณ์อื่น ๆ

อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

1. สเปร์ยผงแป้ง
2. ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีการ

วิธีการเก็บรายละเอียดและข้อมูลของพระพุทธรูป เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการวิจัย
หาค่าแรงที่มากระทำต่อองค์พระพุทธรูป เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างนั้น
มีรายละเอียดและวิธีการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 10 แสดงรายละเอียดผังกระบวนการทำงานของวิศวกรรมย้อนรอย

1. ขั้นตอนการใช้วิศวกรรมย้อนรอยช่วยในการเก็บข้อมูล

1.1 ขั้นตอนการวางแผนการเริ่มต้นในการสแกนเก็บข้อมูล เนื่องจากองค์พระพุทธรูปองค์ต้นแบบนี้มีขนาดค่อนข้างจะใหญ่จึงจำเป็นต้องมีการแบ่งองค์พระพุทธรูปนั้นให้เป็นสัดส่วนเพื่อง่ายต่อการนำไฟล์ หรือข้อมูลที่ได้มาประกอบเข้าด้วยกัน ในที่นี่ได้ประยุกต์ใช้วัตถุวงกลมคิดไว้ที่องค์พระพุทธรูปเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการประกอบไฟล์งานที่ได้จากการสแกนเข้าไว้ด้วยกัน



ภาพที่ 11 องค์พระพุทธรูปองค์ต้นแบบที่นำมาสแกน

ในขั้นตอนการเตรียมงานนี้ต้องมีการตรวจเช็ครายละเอียดให้พร้อมก่อน เช่น

1. ขอบเขตการเคลื่อนที่ของชุดหัวเลเซอร์สแกนว่าสามารถสแกนถึงตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่
2. ผิวของวัตถุที่จะนำมาสแกนนั้นสะท้อนแสงหรือไม่ ถ้าผิวที่นำมาสแกนนั้นสะท้อนแสงจะใช้ผงแป้งสเปรย์มาพ่นเพื่อช่วยลดการสะท้อนของแสง แต่ในกรณีขององค์พระพุทธรูปนี้นั้นได้มีสีทาทับบนองค์พระอยู่แล้ว จึงทำให้ลดการสะท้อนของแสงได้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 12 แสดงการกำหนดจุดอ้างอิงก่อนการทำงาน

หลังจากที่ได้ทำการแบ่งสัดส่วนขององค์พระพุทธรูปเป็น 6 ส่วน ได้แก่ ศีรษะด้านหน้า ศีรษะด้านหลัง ช่วงอกด้านหน้า ช่วงแผ่นหลัง ช่วงท่อนขาด้านหน้า และท่อนขาด้านหลัง และได้ตรวจเช็คขอบเขตของพื้นที่ที่เราสแกนแล้ว จึงเริ่มขั้นตอนในการสแกนเก็บข้อมูลด้วย เครื่องเลเซอร์

สแกน 3 มิติ ในกระบวนการทำการสแกนองค์พระพุทธรูปโดยใช้ โปรแกรม Polygonia ไฟล์ที่ได้มานั้นจะเป็น กลุ่มของกลุ่มพิกัดจุด ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อเข้าสู่การทำงานของโปรแกรม Polygonia ทำการตั้งค่าต่างๆของเครื่อง 3D Laser Scan โดยการตั้งค่าหัวเลเซอร์สแกน รุ่น KZ50-118



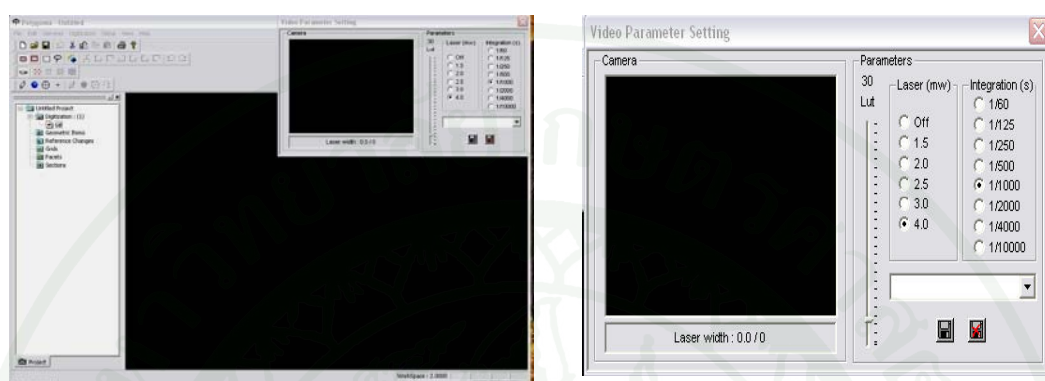
ภาพที่ 13 โปรแกรม Polygonia

ขั้นตอนที่ 2 ทำการตั้งค่าของแกนสแกนชุดแกนกล คือการเซ็ตแกนของชุด แกนเลเซอร์สแกน

ขั้นตอนที่ 3 ทำการตั้งค่าของแสงเลเซอร์ (Video Parameter Setting)

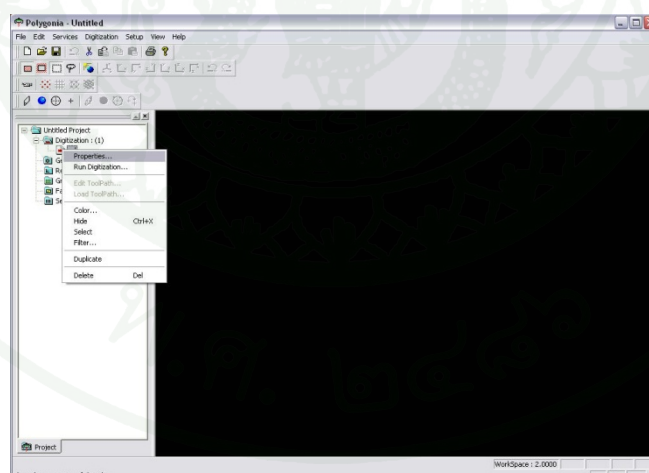
ตั้งค่า Integration ที่ 1/2000 (ถ้าต้องการสแกนชิ้นงานที่มีความละเอียดผิวน้อยควรใช้ค่า ค่า Integration มาก แต่ถ้าต้องการความละเอียดผิวมาก ควรใช้ค่าค่า Integration น้อย) ในกรณี การสแกนองค์พระพุทธรูปนี้ ใช้ค่า Integration ที่ 1/1000 เพราะว่าการต้องการความละเอียดค่อนข้างสูง

ตั้งค่า Laser (mw) ไว้ที่ 4.0 (ค่า Laser เป็นค่าที่บอกถึงกำลังของแสงเลเซอร์ที่จะสามารถทำการเก็บ Point ในขณะที่ทำการสแกน) ในกรณี การสแกนองค์พระพุทธรูปนี้ จึงควรใช้ค่า 4.0 เพราะต้องการกำลังของแสงเลเซอร์มาก เพราะชิ้นงานต้องการความละเอียดสูง



ภาพที่ 14 แสดงการตั้งกำลังของแสงเลเซอร์

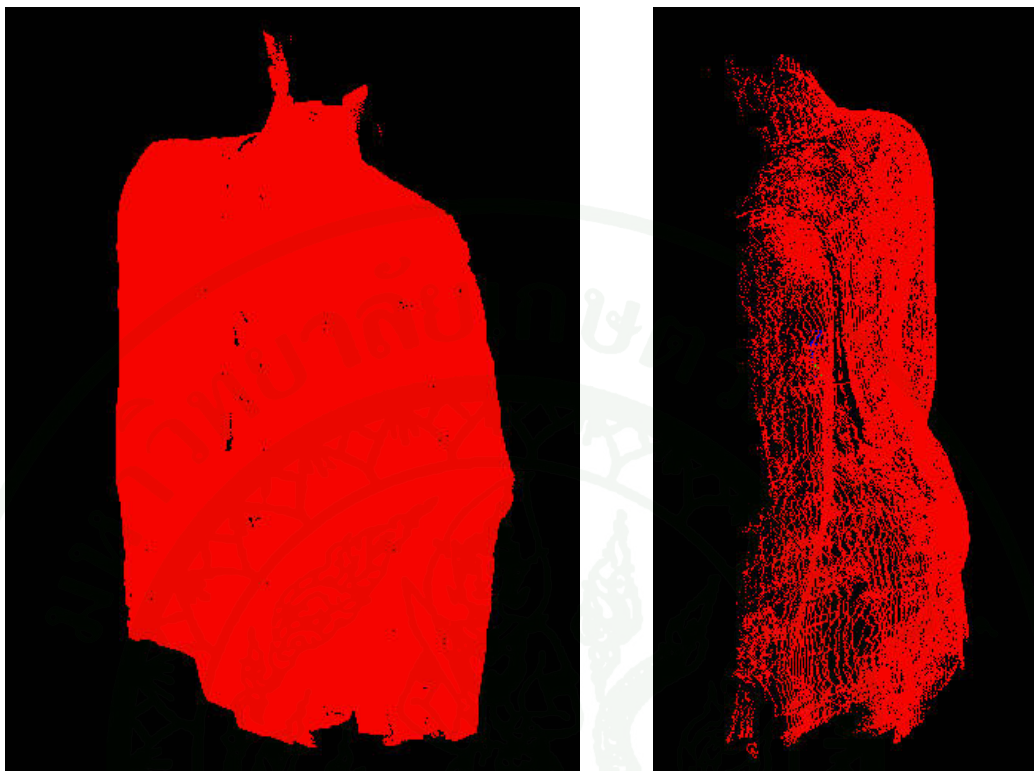
ขั้นตอนที่ 4 ทำการตั้งชื่อไฟล์ก่อนทำการสแกนองค์พระพุทธรูปและทำการ RUN โปรแกรม



ภาพที่ 15 การตั้งชื่อไฟล์งานก่อนสแกน

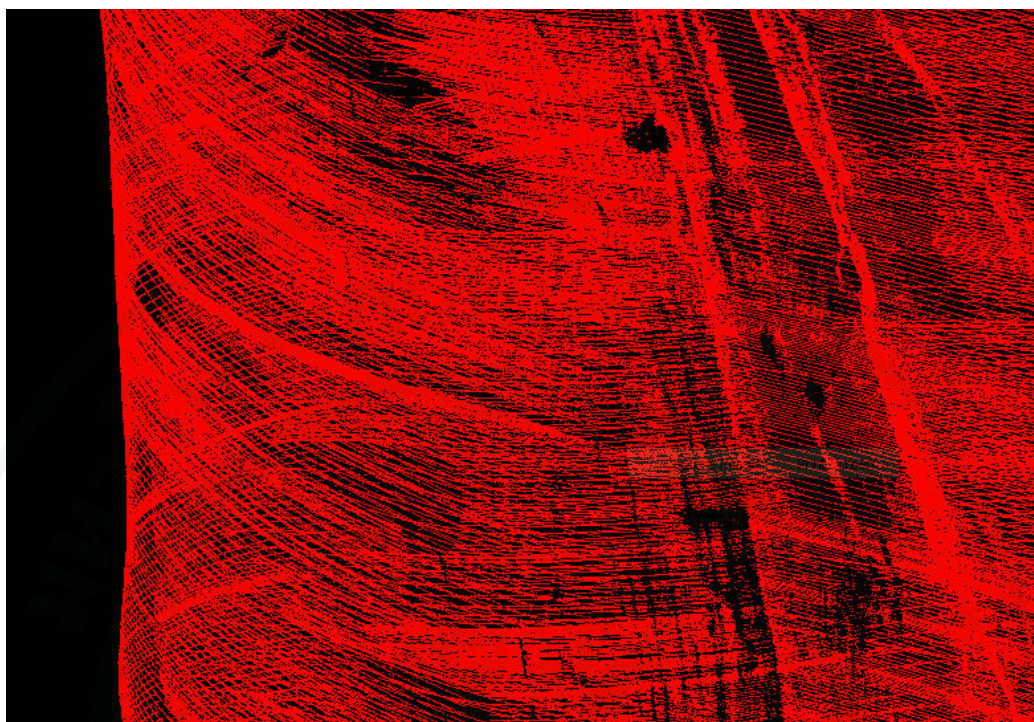
ขั้นตอนที่ 5 ทำการสแกนพระพุทธรูปองค์ต้นแบบ

1. เลือกตำแหน่งการเตรียมงานให้เหมาะสมก่อนทำการสแกนองค์พระพุทธรูป เพราะถ้าวางชิ้นงานในการสแกนไม่เหมาะสมหรือไกลเกินไปจะไม่สามารถทำการสแกนองค์พระตามที่ได้แบ่งขอบเขตได้ เนื่องจากเซนเซอร์มี Encoder ที่ควบคุมการปิดของแสงเลเซอร์เมื่อทำการดึงเซนเซอร์ไปเกินระยะทำงานได้
2. สแกนชิ้นงานให้มีทิศทางเดียวกัน และพยายามให้ ตั้งฉากกันกับผิวของชิ้นงานให้ทั่วทั้งบริเวณที่ต้องการสแกนเก็บข้อมูลเพื่อที่จะให้ กลุ่มพิกัดจุด มีความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งชิ้นงาน
3. การสแกนงานเมื่อผู้สแกนต้องนั่งและทำการสแกนช้าๆ เพราะถ้ามือของผู้ที่ทำการสแกนไม่นิ่งในขณะที่ทำการสแกนงานหรือสแกนเร็วไปนั้นจะส่งผลกระทบต่องานที่ทำให้มี Noise รบกวน
4. แสงสว่างในขณะที่ทำการสแกน ไม่ควรมีความสว่างมากเกินไปเพราะแสงสว่างมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่องานทำให้มี Noise รบกวน
5. ถ้าชิ้นงานมีความมันวาวหรือสามารถสะท้อนแสงได้ ต้องมีการใช้สเปรย์แป้งฉีดยาเพื่อลดการสะท้อนของเลเซอร์(ถ้ามีการสะท้อนกลับของเลเซอร์จะส่งผลกระทบต่องานทำให้มี Noise รบกวน)
6. ขณะทำการสแกนนั้นห้ามเคลื่อนย้าย ห้ามขยับ หรือกระแทกกับโต๊ะที่วางองค์พระพุทธรูปโดยเด็ดขาดเนื่องจากจะทำให้ตำแหน่งอ้างอิง ของชิ้นงานมีการคลาดเคลื่อนจะทำให้เกิดผิดพลาดได้



ภาพที่ 16 แสดงกลุ่มพิภักจุดที่ได้จากการสแกน

7. สแกนงานให้มีกลุ่มพิภักจุด เพียงพอ (กลุ่มพิภักจุดที่ได้จะแสดงผลออกมาที่คอมพิวเตอร์ เป็น แนวเส้นสีแดง ถ้ามีแนวเส้นสีแดงเต็มส่วนของพระพุทธรูปที่แบ่งขอบเขตเอาไว้ จนไม่เห็น ช่องว่างที่เป็นสีดำแล้วแสดงว่ามี กลุ่มพิภักจุด เพียงพอที่จะนำไปสร้างพื้นผิวต่อไป)



ภาพที่ 17 ภาพขยายกลุ่มพิกัดจุดที่ได้จากการสแกนองค์พระพุทธรูป

ขั้นตอนที่ 6 ทำการกรองกลุ่มพิกัดจุดขององค์พระพุทธรูป โดยการเข้าสู่ขั้นตอน Filter ซึ่งในกระบวนการ Filter จะทำให้ Point มีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอและทำการลด กลุ่มพิกัดจุดของชิ้นงานให้มีขนาดเล็กลงและมีการจัดเรียงกลุ่มพิกัดจุดใหม่ ให้มีความสม่ำเสมอของแนวเส้น ทุกๆชิ้นงาน

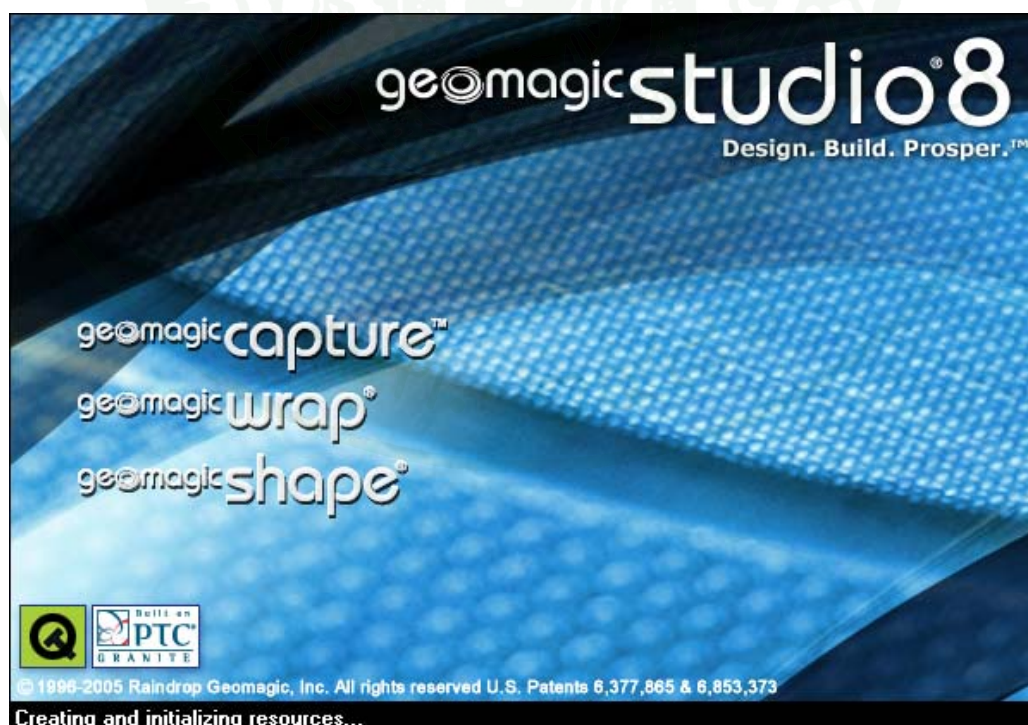
การเลือกค่า Chord เป็น 0.05 (ค่า Chord ที่ใส่ไปนั้นหมายถึง ระยะห่างระหว่าง จุดต่อจุดไม่ถึง 0.05 จะถูกทำการ Filter ออกไป และค่า Distance Max หมายความว่าถึงระยะระหว่าง จุดต่อจุด ที่ยอมรับได้จะต้องไม่เกินค่า Distance Max ในที่นี้ใช้เป็น 3.00)

ขั้นตอนที่ 7 ทำการ Export File *.knp เป็น File *.ckw เพื่อนำเข้าสู่ โปรแกรม Geomagic 8



ภาพที่ 18 กลุ่มพิกัดจุดที่จะได้หลังจาก Export มาที่โปรแกรม Geomagic

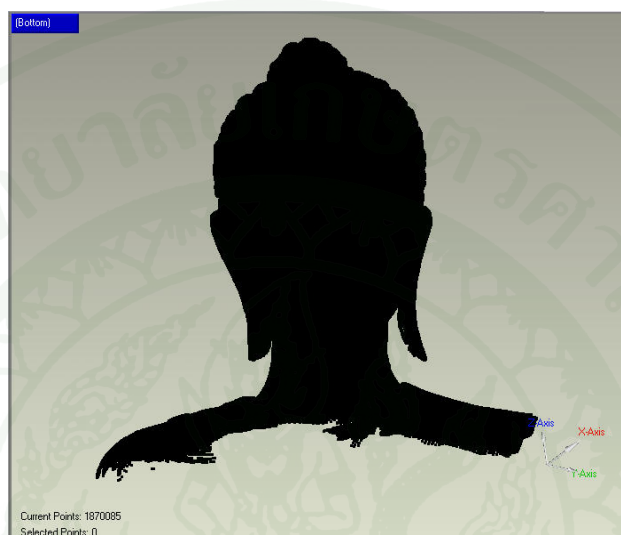
หลังได้ กลุ่มพิกัดจุด (Cloud Point) ที่ได้มาจากโปรแกรม Polyginia แล้วทำการ Import File *.ckw เข้าสู่โปรแกรม Geomagic Studio version 8



ภาพที่ 19 โปรแกรม Geo Magic Studio 8 ที่นำมาใช้ในกระบวนการแปลงกลุ่มพิกัดจุด

การ Import กลุ่มพิกัดจุด

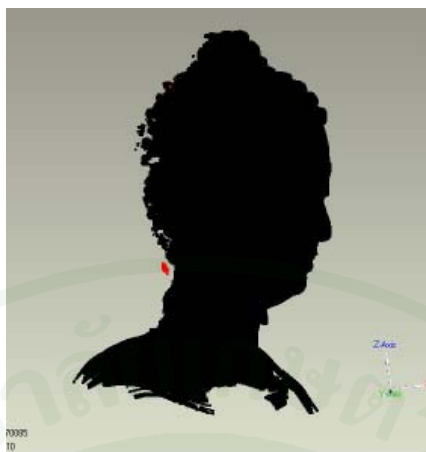
ขั้นตอนที่ 1 เข้าสู่การทำงานของโปรแกรม Geomagic และทำการ Open File *.cwk จะได้เป็น Cloud Point ดังรูปที่



ภาพที่ 20 กลุ่มพิกัดจุดที่นำเข้าโปรแกรม Polygonia

ทำการปรับแต่งกลุ่มพิกัดจุดโดยจะมีกระบวนการทั้งหมด 4 แบบ

1. เลือก Select Disconnected Component หมายถึง การจำกัดกลุ่มพิกัดจุด ที่อยู่ห่างจากกลุ่มพิกัดจุดหลักขององค์พระพุทธรูป

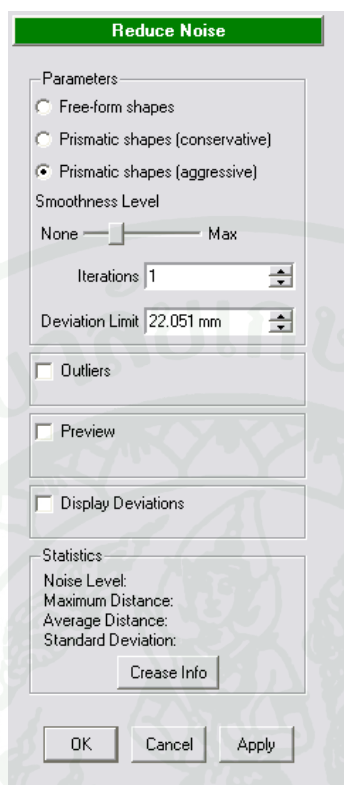


ภาพที่ 21 แสดงถึงกลุ่มพิกัดจุดที่อยู่ห่างจาก กลุ่มพิกัดจุดหลัก

2. เลือก Select Outliers หมายถึง การจำกัดกลุ่มพิกัดจุดที่ทับซ้อนอยู่ในกลุ่มพิกัดจุด หลักขององค์พระพุทธรูป

3. เลือก Reduce Noise หมายถึง การกำจัดกลุ่มพิกัดจุด ที่อยู่บนผิวขององค์พระพุทธรูป (จะคล้ายกับ Select Outliers แต่จะสามารถปรับค่าต่างๆได้มากกว่า) เป็นการกรองกลุ่มพิกัดจุดที่เกินความจำเป็นออกจากกลุ่มพิกัดจุด ดังแสดงในภาพที่ 17

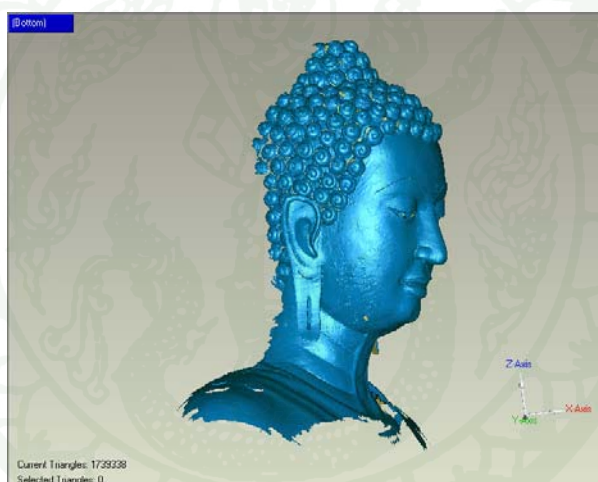
4. เลือก Uniform Sample หมายถึงการจัดการวางตัวของ กลุ่มพิกัดจุดให้มีการเรียงตัวที่สม่ำเสมอและง่ายต่อการสร้างพื้นผิว



ภาพที่ 22 แสดงคำสั่งที่ใช้ในการ Reduce Noise

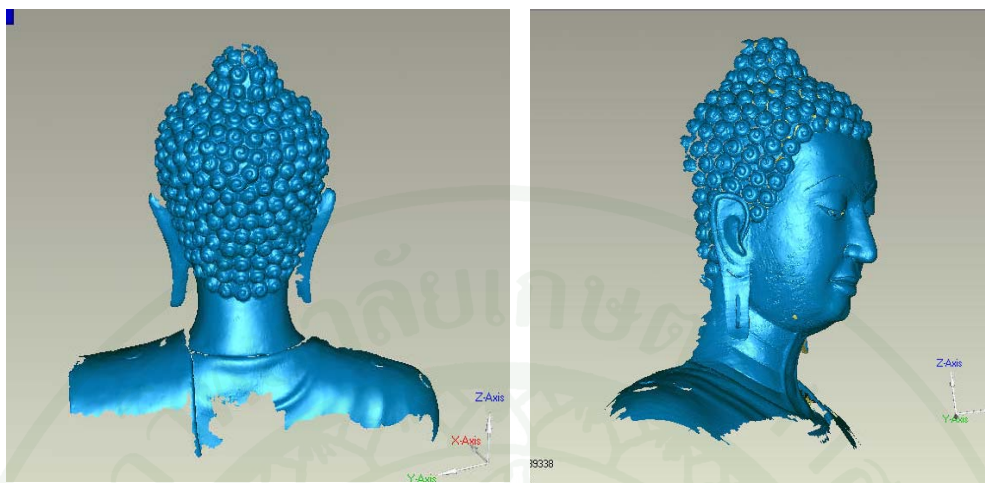
- ในขั้นตอนการทำ Uniform Sample นี้สามารถกำหนดจำนวนของ Point ได้เองว่าต้องการให้งานนั้นมี Point เท่าไหร่
- สามารถทำการกำหนด Curvature Priority ที่ค่า MAX (Curvature Priority เป็นค่าที่จะเก็บ กลุ่มพิกัดจุดบริเวณส่วนที่เป็น แนวเส้นหรือขอบของชิ้นงาน ถ้าเลือกค่า Max โปรแกรมจะทำการลดกลุ่มพิกัดจุดบริเวณที่เป็นแนวเส้นหรือขอบคมของชิ้นงานซึ่งทำให้ความคมชัดของเส้นขอบนั้นมีความชัดเจนของแนวเส้นหรือขอบของชิ้นงาน นั้นจะเกิดความผิดพลาดน้อย แต่ถ้าเลือกค่า Min โปรแกรมจะทำการลดกลุ่มพิกัดจุดบริเวณที่เป็นแนวเส้นหรือขอบคมของชิ้นงานมากทำให้ความคมชัดของแนวเส้นหรือขอบชิ้นงานนั้นเกิดผิดพลาดมาก ส่งผลโดยตรงต่อการ ประกอบงาน เนื่องจากส่วนที่เป็นตำแหน่งอ้างอิง มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง)

- ให้เลือกที่ Boundary (เพื่อเป็นการ Fix Point ที่บริเวณขอบเขตของชิ้นงานไม่ให้ถูกลดพิกัดจุด มากเกินไป ซึ่งถ้าไม่เลือกที่ Boundary แล้วบริเวณขอบเขตของชิ้นงานจะไม่สมบูรณ์หรือเกิด ความคลาดเคลื่อนที่ชิ้นงานบริเวณนั้น)
- เมื่อกด OK โปรแกรมจะทำการแสดงผลการ Uniform Sample
- หลังจากที่เราทำการ Uniform Sample แล้ว ให้ทำการ Wrap Point เพื่อให้ กลุ่มพิกัดจุด แปลงไปเป็นแบบจำลองแผ่นผิว กลุ่มพิกัดจุดก็จะเปลี่ยนเป็นแบบจำลองแผ่นผิว ดังที่แสดงในภาพที่19

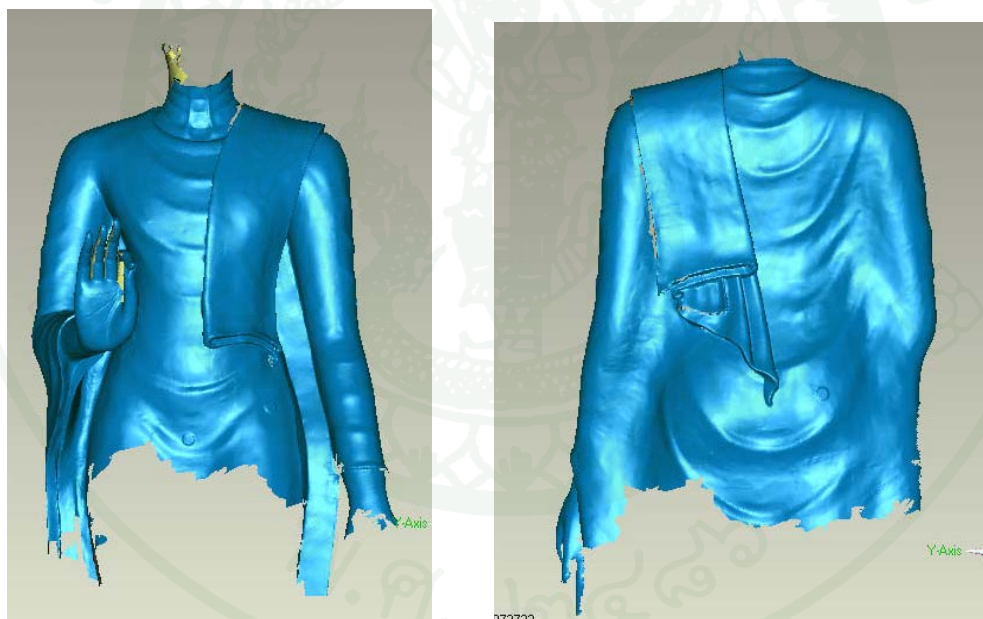


ภาพที่ 23 แสดงกลุ่มพิกัดจุดที่เปลี่ยนเป็นแบบจำลองแผ่นผิว

เมื่อทำการ Wrap เสร็จสมบูรณ์แล้วจะให้เห็นแบบจำลองแผ่นผิว ที่เกิดขึ้นตามที่ได้สแกนเก็บข้อมูลไว้ เพราะผิวชิ้นงานเหล่านี้จะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งหลังจากนั้นจะต้องทำการปรับแต่งผิวของชิ้นงาน ให้มีความสมบูรณ์ใกล้เคียงกับงานจริงให้มากที่สุด แต่เนื่องจากการสแกนชิ้นงาน บางครั้งอาจจะมี Noise เข้ามา หรืออาจจะต้องการการปรับแต่งบางส่วน of ชิ้นงาน ซึ่งก็สามารถตกแต่งได้ในโปรแกรม Geo Magic Studio



ภาพที่ 24 ภาพแสดงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap เคียร์ส่วนด้านหน้าและด้านหลัง



ภาพที่ 25 ภาพแสดงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap ในส่วนหน้าอกและแผ่นหลัง



ภาพที่ 26 ภาพแสดงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap ในช่วงพระบาทด้านหน้าและพระบาทด้านหลัง

1. ซึ่งจาก Surface ที่ได้ทั้ง 6 ส่วนย่อยนี้จะนำมาประกอบเข้าด้วยกันดังนี้เสียด้านหน้ากับเสียด้านหลัง ช่วงลำตัวด้านหน้ากับช่วงแผ่นหลัง ช่วงท่อนขาด้านหน้าและท่อนขาด้านหลัง โดยจะประกอบกันให้ได้พื้นผิว 3 ส่วน เพื่อที่จะประกอบทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกันเป็นส่วนเดียวกันอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงทำการตกแต่งรายละเอียด เช่น การปิดช่องว่าง หรือรอยโหว่ ของพื้นผิวที่ได้จากการสแกนทั้งหมด เพื่อที่จะนำผิวชิ้นงานมาใช้งานในการเป็น แบบจำลองรูปวัตถุแข็งตัน หรือ โซลิดโมเดล (Solid model)

กระบวนการประกอบ (Assembly)

คือกระบวนการประกอบชิ้นส่วนที่เราแบ่งขอบเขตในการสแกนและปรับให้เป็นแบบจำลองพื้นผิวนั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน ในการประกอบเข้าด้วยกันนี้สามารถประกอบงานเข้าด้วยกันทั้งที่เป็นแบบลักษณะกลุ่มพิกัดจุดและ แบบจำลองพื้นผิวก็ได้

การประกอบกันของชิ้นงานทั้งสองส่วนนั้น จำเป็นต้องมีจุดอ้างอิงในการประกอบชิ้นงานที่เป็นตำแหน่งเดียวกัน เพื่อที่จะสามารถกำหนดจุดอ้างอิงให้กับโปรแกรมได้ว่า จุดๆนี้ในสองส่วนเป็นจุดเดียวกัน เหตุผลในกระบวนการทำประกอบเข้าด้วยกันนี้ เนื่องจากลักษณะของชิ้นงานนั้นมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถสแกนเก็บข้อมูลหมดได้ในคราวเดียว อีกทั้งปริมาณกลุ่มพิกัดจุดที่ได้นั้นจะมีปริมาณที่มากเกินไปจนเกินความจำเป็นซึ่งส่งผลให้การทำงานของโปรแกรมนั้นทำงานได้ช้าลงเพราะต้องประมวลผลมากขึ้น

ขั้นตอนหลักของกระบวนการประกอบนั้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำชิ้นงานที่จะทำการประกอบเข้ามา ในโปรแกรม ซึ่งขั้นตอนนี้สามารถ นำชิ้นงานเข้ามาประกอบรวมกันได้มากกว่า 2 ชิ้น ในกรณีที่ส่วนชิ้นงานหลักถูกแบ่งชิ้นส่วนย่อยๆซึ่งมีมากกว่า 2 ชิ้น
2. Manual registration เป็นการประกอบโดยการเลือกประกอบด้วยตัวผู้ใช้โปรแกรมเอง โดยการใช้สายตาเป็นตัวกำหนดจุดอ้างอิง ซึ่งในขั้นตอนนี้เราจะทำการประกอบคร่าวๆให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด
3. Global registration เป็นการใช้โปรแกรม Geomagic เป็นตัวประมวลผลแล้วตัดสินใจว่า ชิ้นส่วนย่อยต่างๆควรจัดวางในรูปแบบใด ซึ่งเป็นการปรับแต่งการประกอบชิ้นส่วนทั้ง 2 ให้ประกอบกันอย่างถูกต้องมากที่สุด โดยอ้างอิงจากขอบหรือจุดอ้างอิงจากชิ้นงานทั้ง 2 ส่วนว่า ต้องมีความต่อเนื่องกันแต่ชิ้นงานทั้งสองส่วนแต่ยังไม่เป็นชิ้นเดียวกัน สังเกตได้จากเวลาที่เรานำชิ้นงานเพื่อทำการ Registration กันแล้วเพื่อที่จะทำการลบหรือตกแต่งซึ่งจะสามารถเลือกได้เพียงชิ้นส่วนเดียว โดยชิ้นส่วนที่ผ่านการ Registration มาแล้วจะอยู่ในแฟ้มที่มีชื่อว่า Group ซึ่งอยู่ในแถบทางด้านซ้าย (Model Manager) ในหน้าต่างโปรแกรม
4. Merge เป็นขั้นตอนการรวมชิ้นงานสองชิ้นส่วนให้เป็นชิ้นส่วนเดียวกัน โดยชิ้นส่วนที่ผ่านการ Merge มาแล้วนั้นจะอยู่ในแฟ้มที่มีชื่อ Merge ซึ่งอยู่ในแถบทางด้านซ้าย (Model Manager) ในหน้าต่างโปรแกรม โดยสามารถลบทิ้งได้ถ้าไม่ต้องการ

ขั้นตอนการ Import Triangles Surface

เลือก File Open ไฟล์ตัวแรกที่เป็นชิ้นส่วนที่ต้องนำมาประกอบในชิ้นงานหลักออกมาชิ้นส่วนใดก่อนก็ได้ ในกรณีนี้เราได้ประกอบจากส่วนเศียรจนถึงส่วนพระบาท (ลำดับการเลือกก่อนหรือหลังไม่มีความสำคัญ)



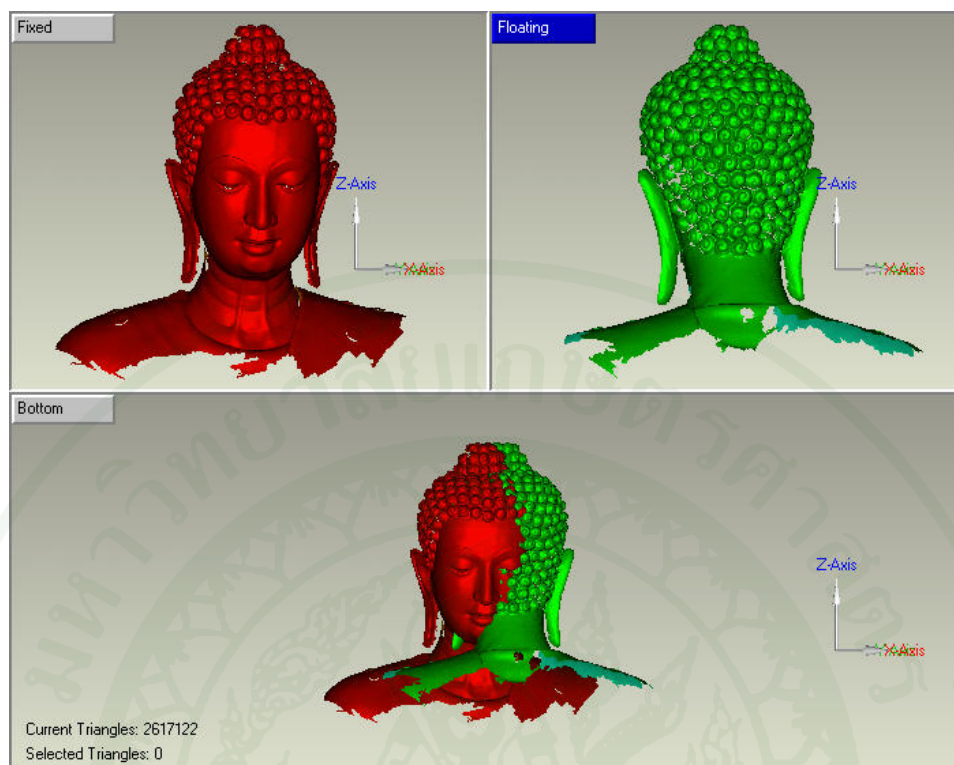
ภาพที่ 27 แสดงการนำไฟล์ Import ชิ้นงานทั้งส่วนเพื่อทำการประกอบ

เมื่อเปิดไฟล์ หรือ นำไฟล์เข้ามาแล้วควรเลือกคลิกขวาที่ชื่อไฟล์ที่เป็น Cloud Point จากนั้นเลือกคำสั่ง Hide ซ่อนชิ้นส่วนย่อยที่เป็นกลุ่มพิคัดจุดนั้นไว้ เพราะไม่ได้มีการใช้งานชิ้นส่วนย่อยที่

จะนำมาใช้ในการประกอบนั้น จะเลือกชิ้นส่วน Wrap ซึ่งมีข้อดีกว่าการใช้กลุ่มพิกัดจุดตรงที่สามารถมองเห็นพื้นที่ผิวหรือเหลี่ยมมุมได้ชัดเจนกว่า

Manual Registration

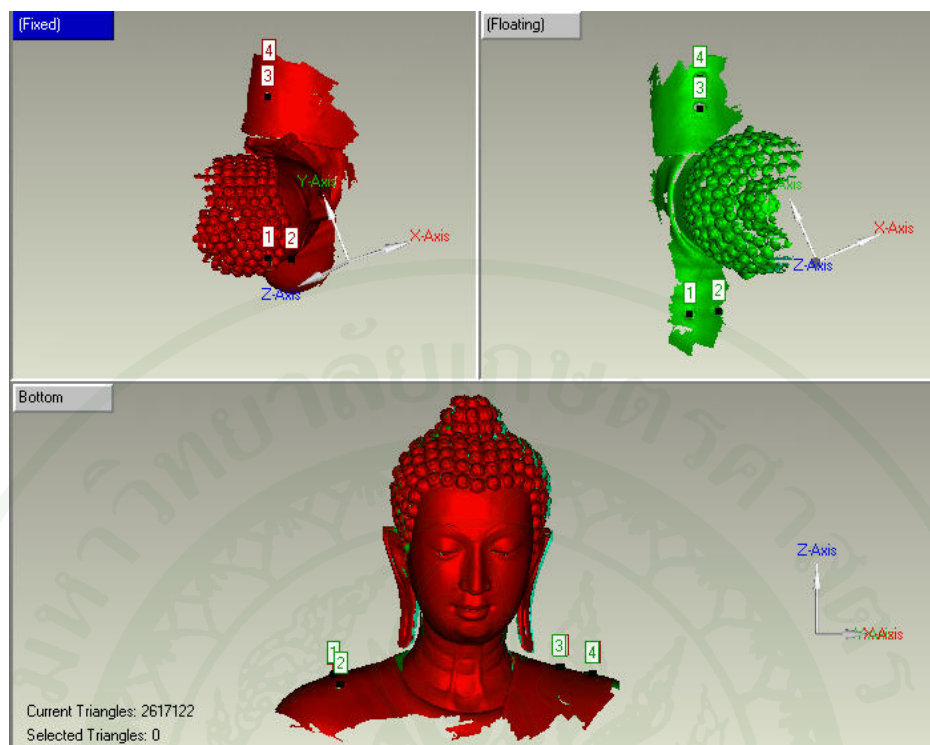
1. เลือกชิ้นงาน Wrap ที่จะทำการประกอบกันโดยเลือกที่แถบ Model Manager วิธีเลือกโดยกด Ctrl ค้างไว้แล้วเลือกทุกชิ้นที่ต้องการจะทำการประกอบกัน
2. เมื่อคลิกเลือก Manual Registration แถบคำสั่งด้านขวาจะปรากฏในหน้าต่างโปรแกรมในช่อง Mode เลือก N Point registration เป็นการใส่จุดจำนวน N จุดตามที่เรต้องการเป็นจุดอ้างอิงในการประกอบชิ้นงาน
3. ในช่อง Define Sets เลือกชิ้นงานที่จะให้เป็นชิ้น Fixed และเลือกชิ้นงานที่จะให้เป็นชิ้น Floating ชิ้น Fixed คือ ชิ้นงานที่อยู่กับที่ไม่มีการเคลื่อนย้าย Coordinate ชิ้น Floating คือชิ้นงานที่จะเข้าหาชิ้น Fixed เพื่อประกอบโดย Coordinate จะเปลี่ยนแปลงไปใช้ตามชิ้น Fixed



ภาพที่ 28 แสดงรายละเอียดก่อนการกำหนดจุด Fixed

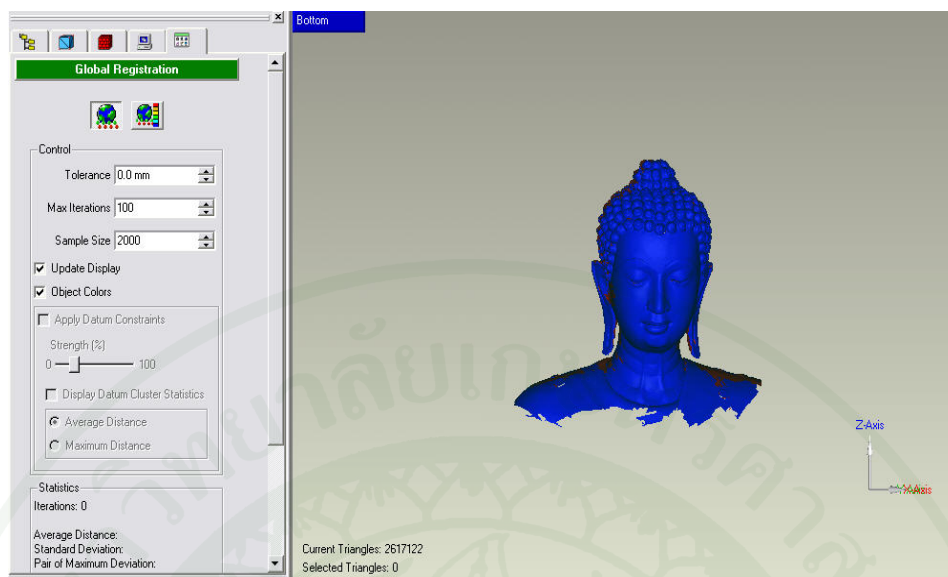
เลือกจุดในชิ้นงาน Fixed อย่างน้อย 3 จุด โดยจุดแรกที่เราเลือกจะขึ้นหมายเลขบอกลำดับการเลือกตามตำแหน่งที่เราเลือก ซึ่งจำนวนจุดที่เราเลือกนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับชิ้นงานถ้างานใหญ่เราอาจจะเลือกหลายจุดก็ได้

หลังจากที่เลือกจุดจาก Fixed แล้วเลือกจุดในชิ้นงาน Floating ตามจำนวนจุดที่ได้เลือกไว้ในชิ้นงาน Fixed โดยจุดทุกจุดต้องเลือกเป็นจุดเดียวกันกับชิ้นงาน Fixed ทำซ้ำเหมือนเดิมจนครบทุกจุด



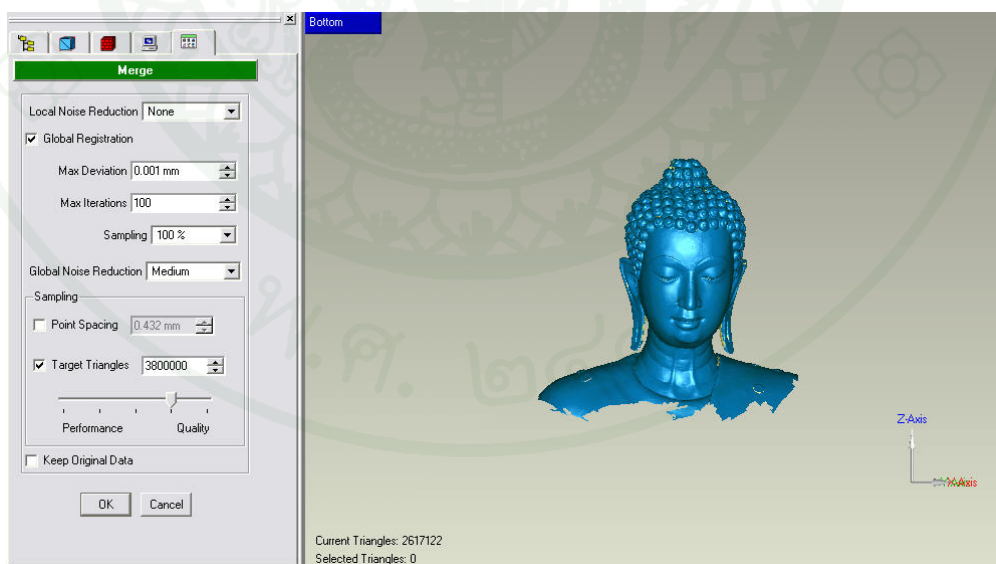
ภาพที่ 29 แสดงรายละเอียดหลังจากประกอบจุดทุกจุดเข้าด้วยกันเรียบร้อยแล้ว

หลังจากที่เลือกจุดเพื่อทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว จะเห็นว่าชิ้นงานยังมีการเหลื่อมล้ำกันอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำให้ชิ้นงานสองผิวหรืออาจจะมากกว่านั้นให้ประสานและตรงกันมากที่สุด โดยต้องทำผ่านกระบวนการ Global Registration ก่อน เพื่อที่โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าความกลมกลืนของผิวชิ้นงาน เพื่อให้รายละเอียดของงานตรงกันมากที่สุด โดยโปรแกรมจะให้เรานั้นกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของตัวงานหรือค่า Max Deviation และจำนวนครั้งของการคำนวณหรือค่า Max Iterations ซึ่งในโปรแกรมจะคำนวณตามขอบเขตที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งหลังจากที่ให้โปรแกรมคำนวณเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณในลักษณะผิวสองสีที่วางซ้อนกัน



ภาพที่ 30 แสดงรายละเอียดหลังจากที่โปรแกรมคำนวณผิวงานสองผิวที่ประสานกัน

ซึ่งในกระบวนการนี้โปรแกรมจะคำนวณความกลมกลืนของผิวโดยการอ้างอิงจากจุดยึด ที่กำหนดและผิวบริเวณใกล้เคียงซึ่งคิดว่าจะเป็นตำแหน่งเดียวกัน



ภาพที่ 31 แสดงรายละเอียดหลังจากที่โปรแกรมคำนวณความกลมกลืนของผิวแล้ว

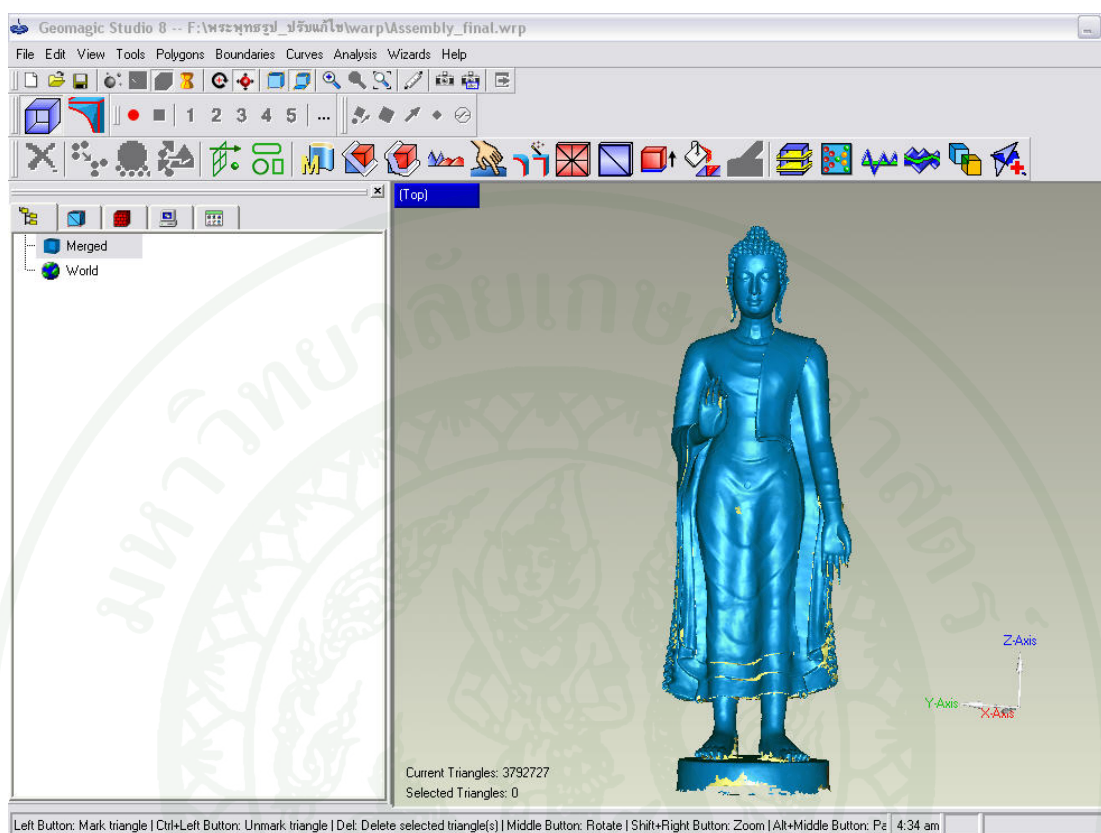


ภาพที่ 32 แสดงรายละเอียด หลังจากที่ได้คำนวณความกลมกลืนของผิว และเชื่อมทั้งสองผิวให้เป็นผิวงานเดียวกันแล้ว



ภาพที่ 33 แสดงลักษณะงานช่วงลำตัวและช่วงล่างของพระพุทธรูป

ซึ่งจะทำซ้ำตามกระบวนการดังกล่าวซ้ำอีกเพื่อประกอบในช่วงลำตัวและช่วงล่างของพระพุทธรูป เพื่อที่จะนำมาประกอบ และประสานผิวงานทั้งหมดให้เป็นผิวงานเดียวกัน ก่อนทำการตกแต่ง ช่องว่างหรือรูโหว่ที่องค์พระพุทธรูป รวมทั้งการตกแต่งความเรียบของผิวของพระพุทธรูป เพื่อให้ผิวของพระพุทธรูปมีความเรียบเสมอกันทั่วทั้งองค์



ภาพที่ 34 แสดงพระพุทธรูปจำลองหลังจากประกอบและประสานผิวเรียบร้อยแล้ว

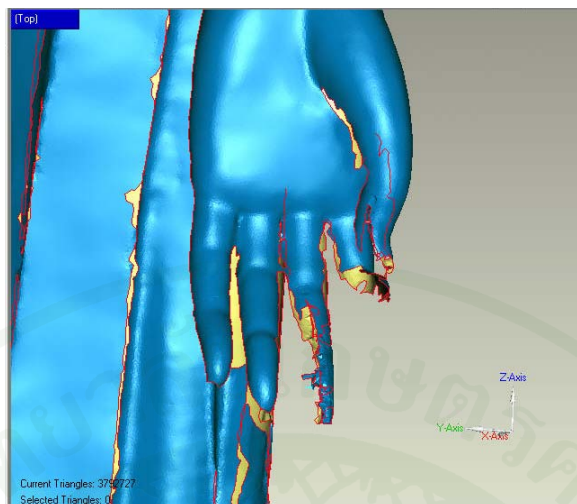
หลังจากที่ได้ทำการประกอบผิวเข้าด้วยกัน จะเห็นว่าผิวของพระพุทธรูปจะรอยโหว่ เนื่องจากการสแกนที่ไม่สามารถเก็บรายละเอียดได้หมดเช่น บริเวณหลังมือด้านซ้าย ตามบริเวณ ซอกนิ้ว บริเวณชายจีวร และบริเวณพระบาท จำเป็นต้องปิดช่วงโหว่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยใช้คำสั่ง Fill Hole การปิดแบบจำลองพื้นผิวลักษณะสามเหลี่ยม (Triangle Surface) ซึ่งในขั้นตอนนี้ เป็นขั้นที่ใช้เวลาในการตกแต่งรายละเอียดมากที่สุด เนื่องจากพระพุทธรูปที่ได้จาก กระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอย ด้วยระบบเลเซอร์สแกนนี้มีจุดที่อับแสงหลายตำแหน่ง และ รายละเอียดของพระพุทธรูปนั้นค่อนข้างมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการตกแต่งขั้นตอนนี้ค่อนข้างที่ จะนาน



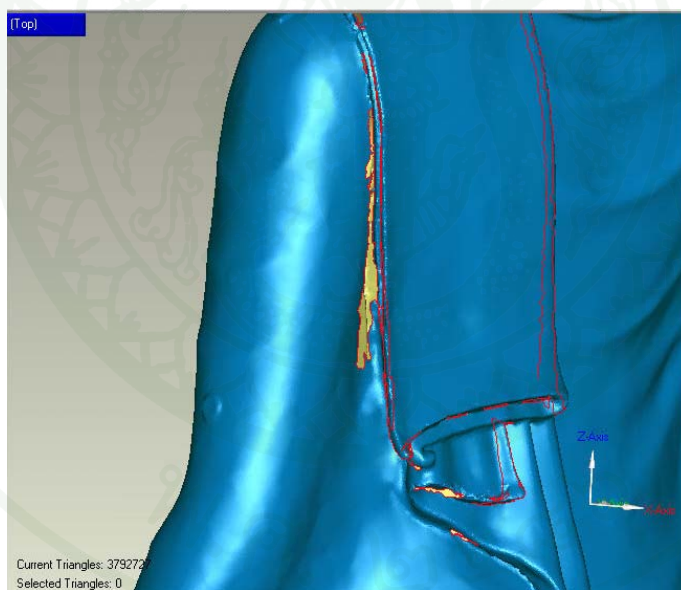
ภาพที่ 35 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของแบบจำลองพื้นผิว



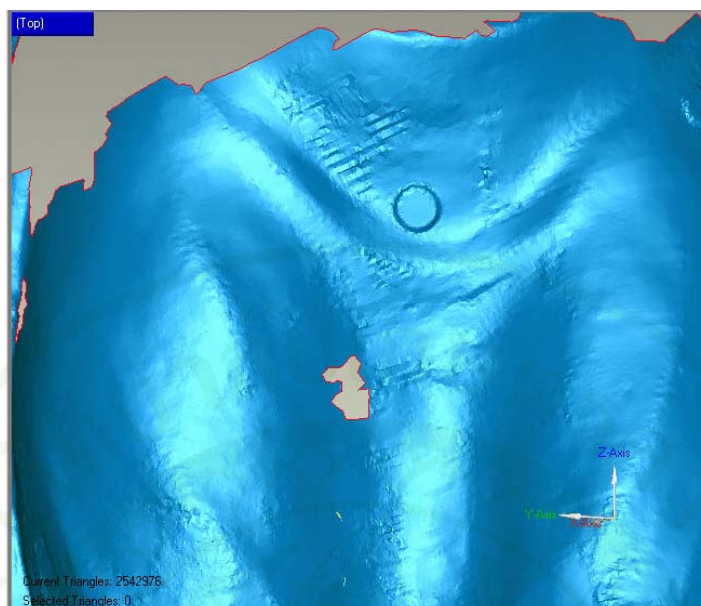
ภาพที่ 36 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณศีรษะ



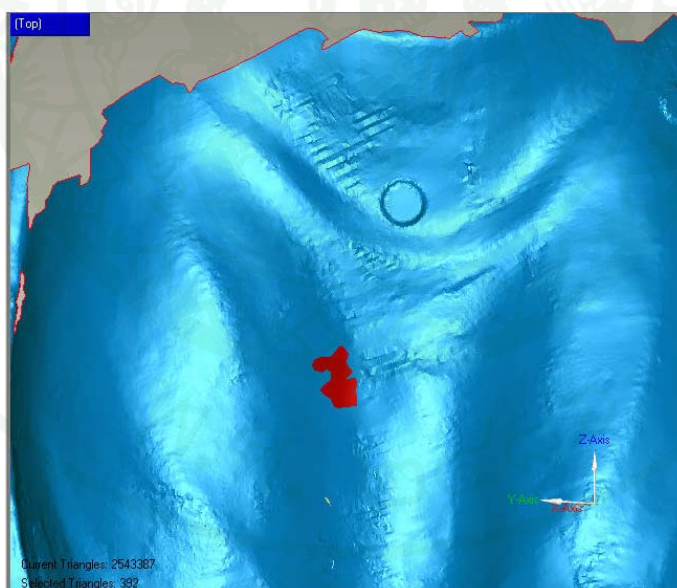
ภาพที่ 37 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณมือและแนวขายจีวร



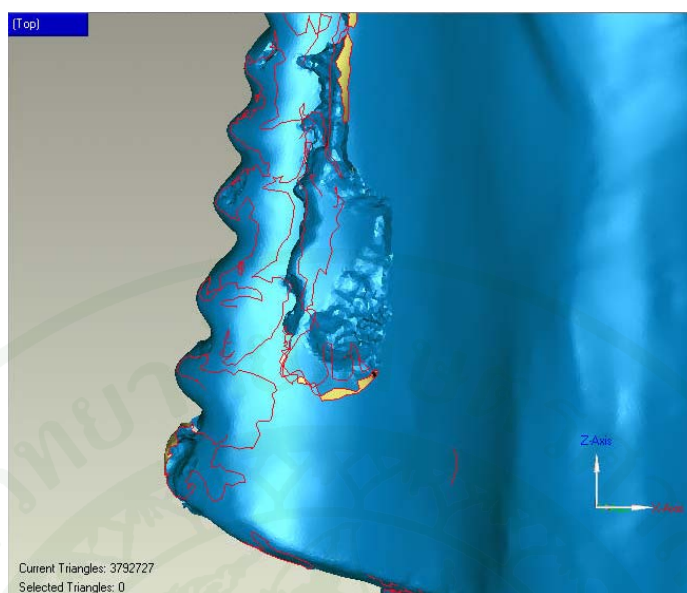
ภาพที่ 38 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณแนวซอกชายสังฆาฏี



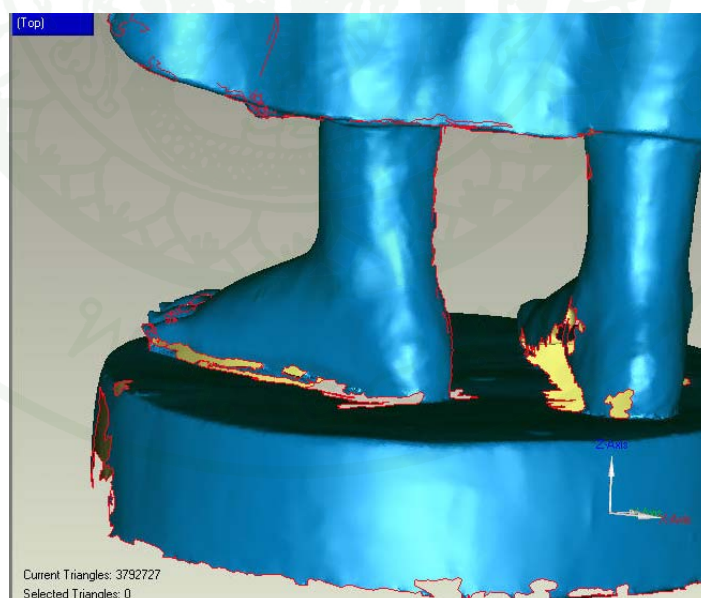
ภาพที่ 39 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณต้นขา



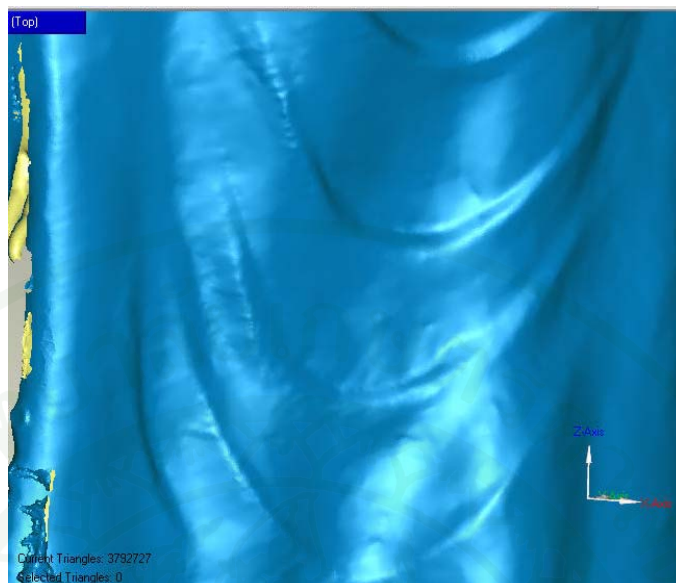
ภาพที่ 40 แสดงถึงรายละเอียดการใช้คำสั่ง Fill Hole รูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณต้นขา



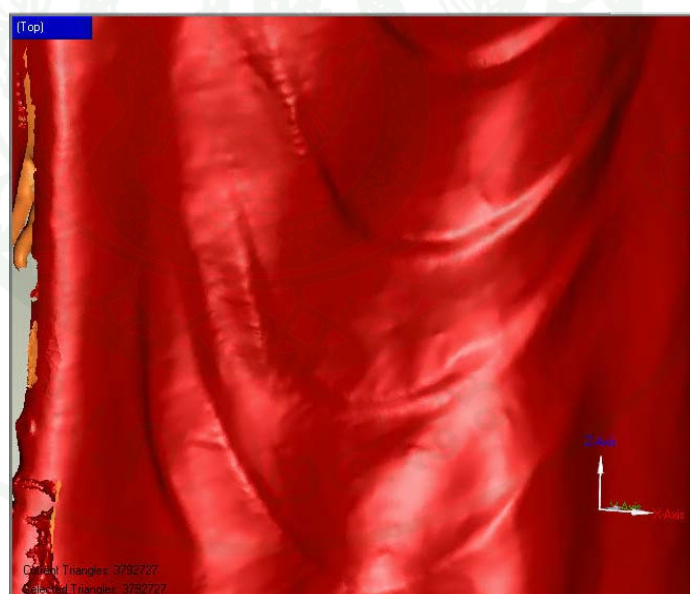
ภาพที่ 41 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณขาจร
ที่ผลิตจากการประกอบ



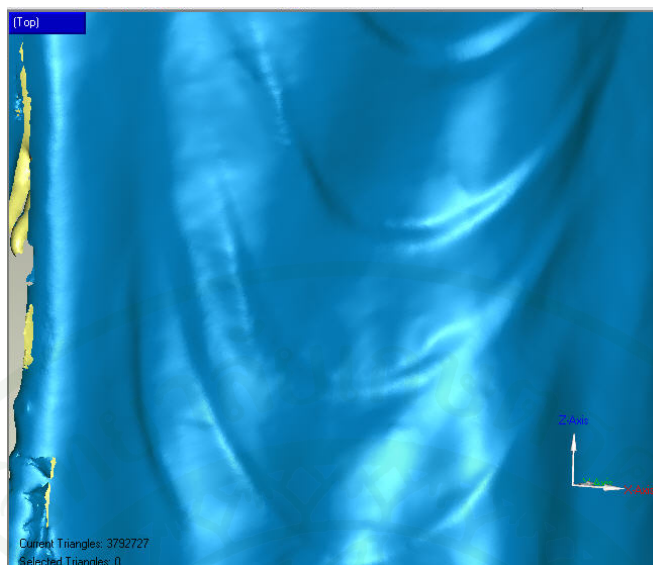
ภาพที่ 42 แสดงถึงรายละเอียดของรูโหว่ของ Triangle Surface บริเวณพระบาท
Relax เป็นการทำให้ผิวมีความเรียบ (Relax สามารถเลือกเป็นบริเวณได้)



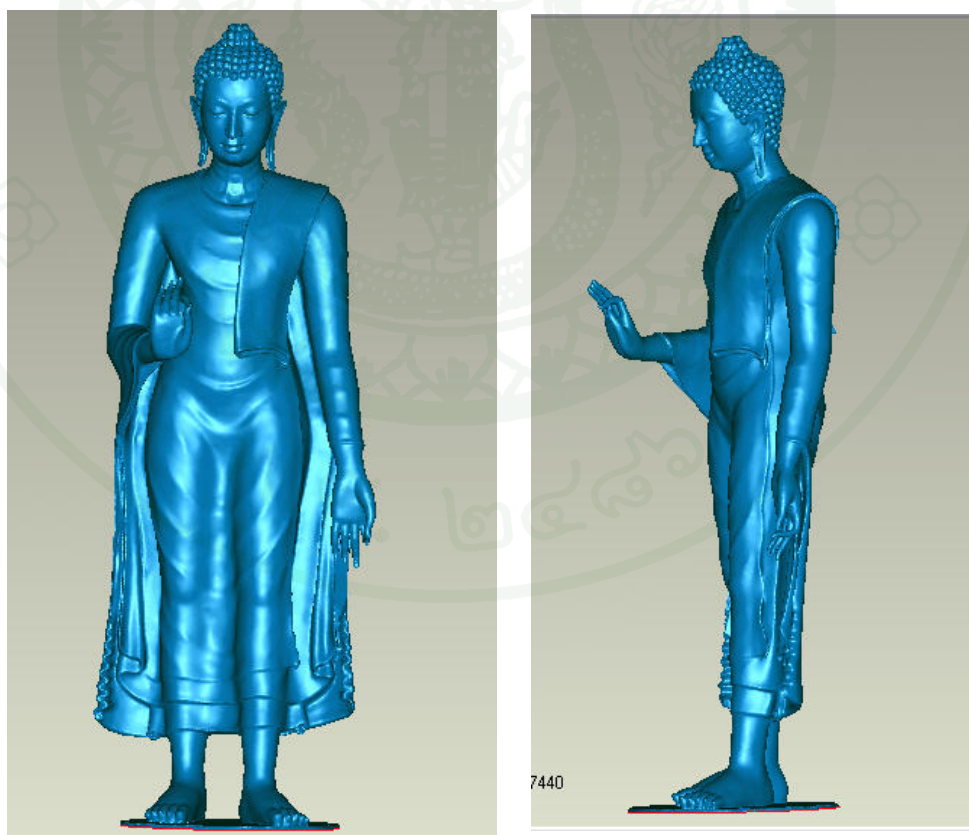
ภาพที่ 43 ก่อนใช้คำสั่ง Relax



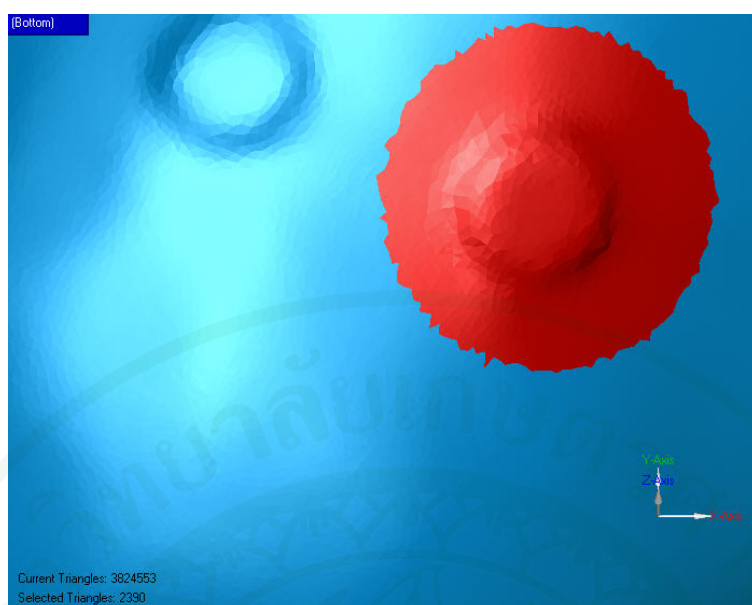
ภาพที่ 44 การเลือกบริเวณที่จะทำการ Relax



ภาพที่ 45 หลังการใช้คำสั่ง Relax

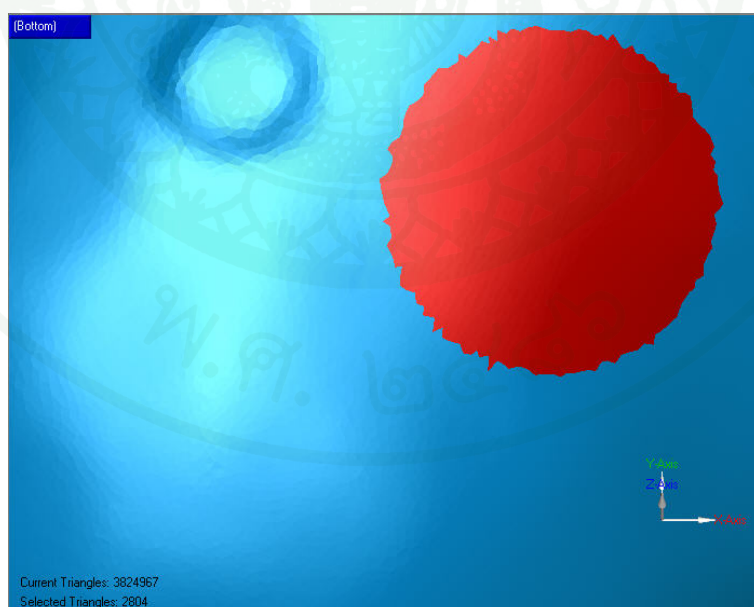


ภาพที่ 46 แสดงรายละเอียดภาพหลังจากทำการใช้คำสั่ง Fill Hole และ การใช้คำสั่ง Relax

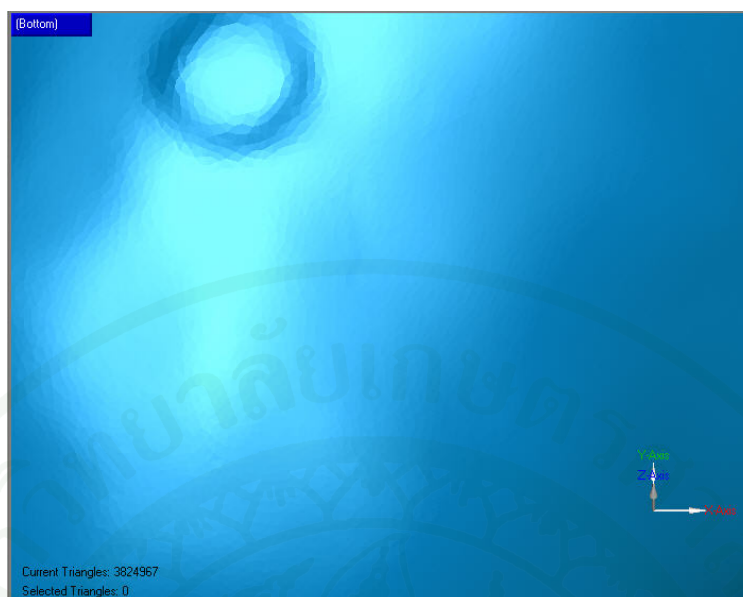


ภาพที่ 47 แสดงรายละเอียดก่อนทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิง

ทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิงที่ทำการวางตำแหน่งในการอ้างอิงเพื่อใช้ในการประกอบ
ดังแสดงดังภาพที่ 44

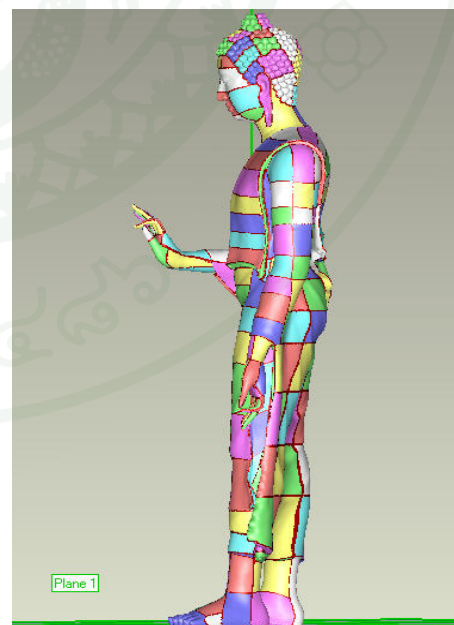


ภาพที่ 48 แสดงรายละเอียดหลังทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิง



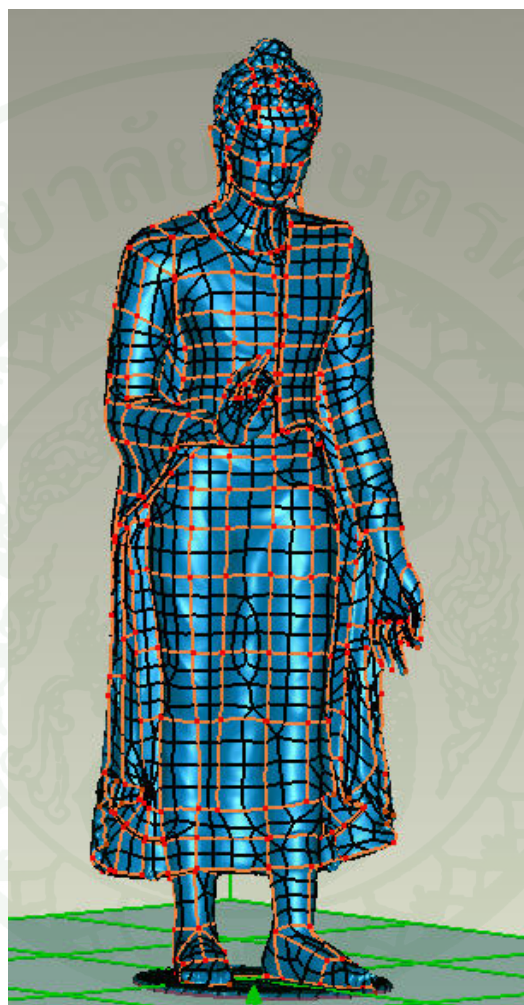
ภาพที่ 49 แสดงรายละเอียดหลังทำการใช้คำสั่ง Relax บริเวณจุดอ้างอิง (หลังจากออกจากคำสั่ง)

ทำร่างแนว Patch โดยการใช้คำสั่ง Shape Phase ซึ่งมีกระบวนการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 50 แสดงรายละเอียดภาพหลังจากทำสร้างเส้นแนว Patch

- เลือก Construct Patches เพื่อทำการกำหนด Patch ให้เหมาะสมกับรูปร่างของพระพุทธรูป ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 51 แสดงแนวการสร้าง Patch

- เลือก Edit Patch เป็นการปรับแต่ง Patch ให้เหมาะสมกับรูปทรง และทำให้แต่ละช่องมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน
- เลือก Shuffle Patches ใช้ในการจัดเรียงตัว Patch
- เลือก Promote Constrain เป็นการแบ่ง Patch ให้เป็นส่วนย่อยตามเส้นสีส้มเพื่อใช้ใน

คำสั่ง Shuffle Panel

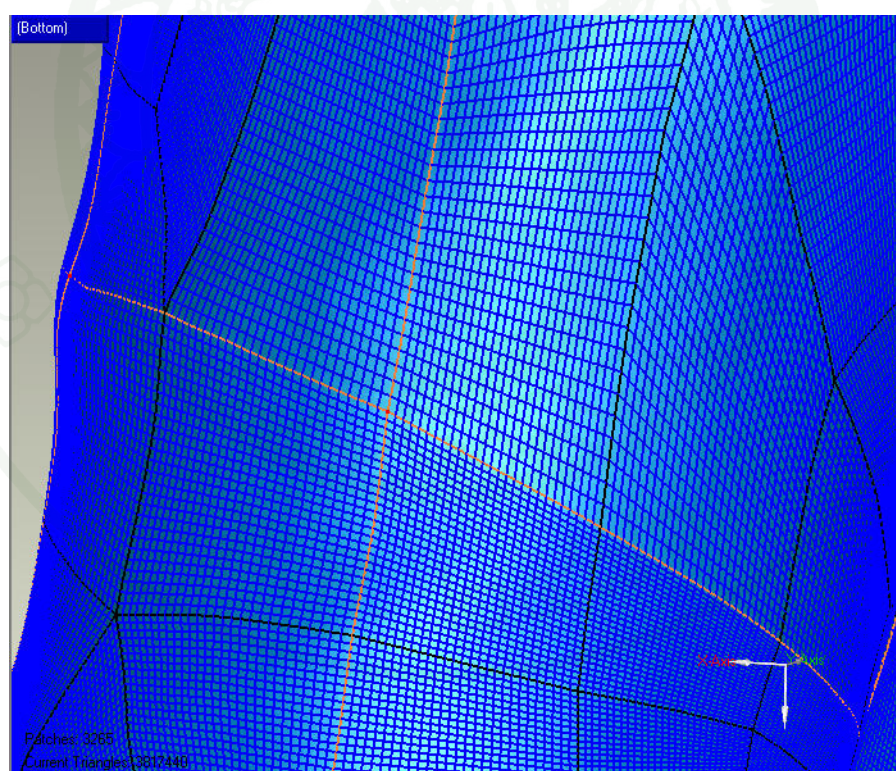
- เลือก Shuffle Panel เป็นการจัด Patch ให้เป็นระเบียบตามเส้น Constrain ตามขอบเขตที่กำหนด



ภาพที่ 52 การกำหนดการแบ่งโครงร่างตาข่าย ที่เหมาะสมทำการ Fit Surface

การกำหนดการแบ่งโครงร่างตาข่าย (Grids) โดยใช้คำสั่ง Construct Grid ให้เหมาะสมกับพื้นผิวย่อย (Patches) บนพระพุทธรูปจำลอง เพราะ ถ้าแบ่งความละเอียดที่ไม่เหมาะสมจะทำให้พื้นผิวที่ได้นั้นเกิดความผิดพลาดในการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์จากชิ้นงานต้นแบบ เช่น แบ่งความละเอียดของโครงร่างตาข่ายน้อยไปจะมีผลในการหาค่า Average Deviation ทำให้เกิดความผิดพลาดจากชิ้นงานต้นแบบ คือพื้นผิวที่ได้จะมีรอยย่น ซึ่งพื้นผิวที่มีรอยย่นนี้ไม่สามารถนำไปทำการขึ้นรูปชิ้นงานได้ และ ถ้าแบ่งความละเอียดของโครงร่างตาข่ายมากไปจะทำให้พื้นผิวที่ได้มีค่า Average Deviation สูงทำให้เกิดพื้นผิวชิ้นงานตั้งเรียบแต่จะทำให้รูปร่างของชิ้นงานต้นแบบผิดเพี้ยนไป

ดังนั้นในการแบ่งโครงร่างตาข่าย ให้เหมาะสม เพื่อพื้นผิวที่ได้จะมีความเรียบที่สามารถนำไปปรับแต่งด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบต่อไป

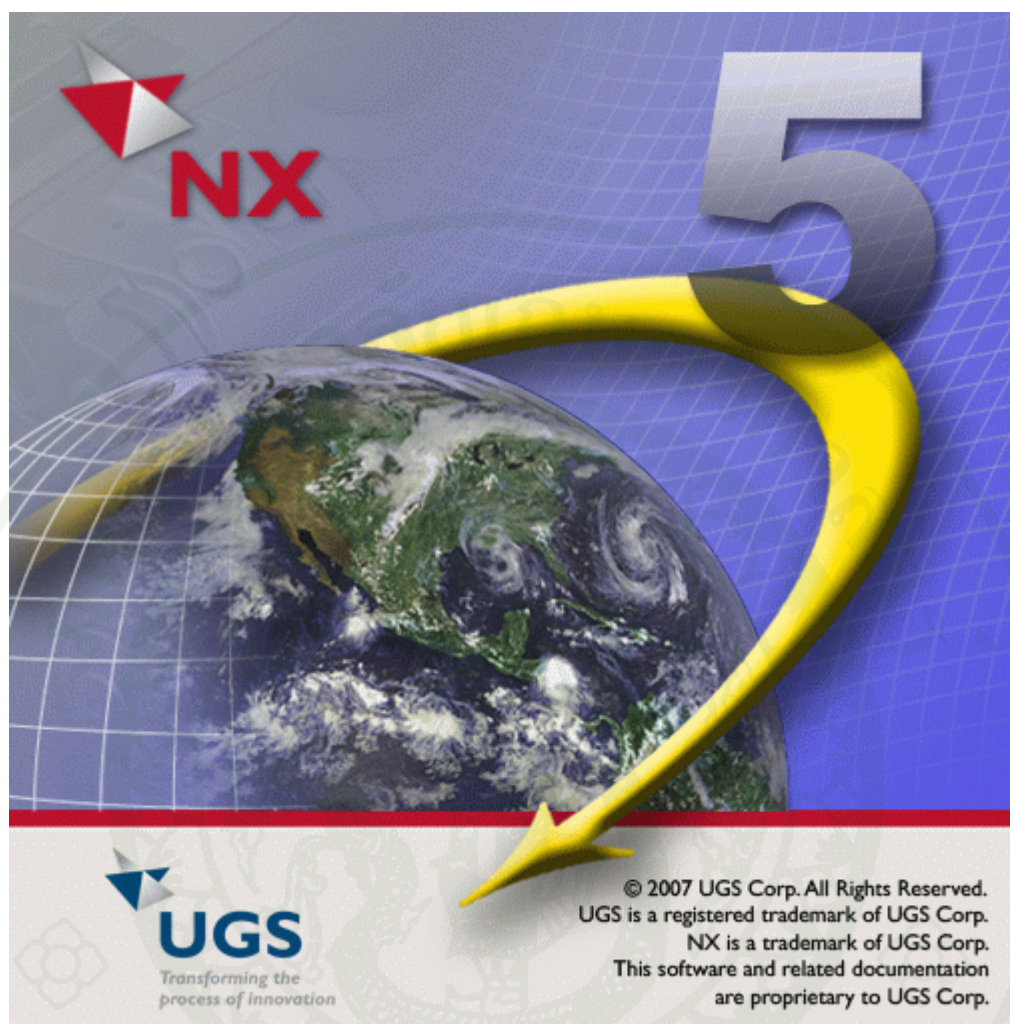


ภาพที่ 53 ภาพขยายการกำหนดการแบ่งโครงร่างตาข่าย ที่เหมาะสมทำการ Fit Surface



ภาพที่ 54 แสดงรายละเอียดองค์พระพุทธรูป ที่ผ่านกระบวนการตกแต่งแบบพื้นผิว

หลังจากนั้นทำการแปลงไฟล์จากโปรแกรม Geomagic Studio Version 8 ซึ่งเปลี่ยนจาก File Warp โดยนามสกุลของ Warp คือ *.wrp เป็น File Step โดยนามสกุลคือ *.stp เพื่อเตรียมนำเข้าโปรแกรม Unigraphics NX 5

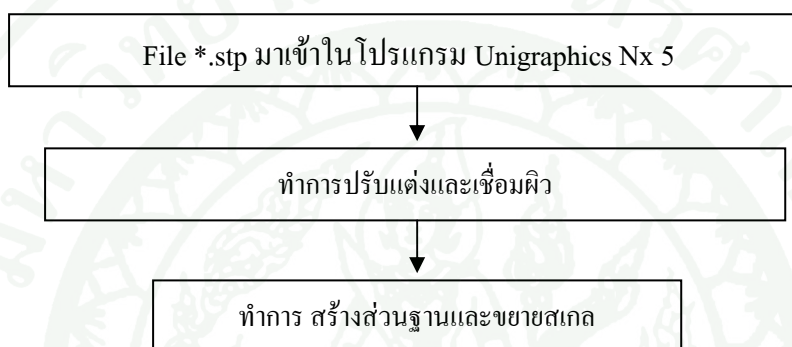


ภาพที่ 55 โปรแกรม Unigraphics NX 5

โปรแกรม Unigraphics NX 5 ที่ใช้เป็นโปรแกรมช่วยในการผลิตและจำลองการทดลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม Unigraphics NX 5 นี้ใช้ในการแปลงแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากโปรแกรม Geomagic Studio Version 8 เป็นวัตถุทรงตันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยจะอธิบายในส่วนต่อไป

ขั้นตอนของกระบวนการออกแบบรูปทรง 3 มิติโดยใช้โปรแกรม Unigraphics NX 5

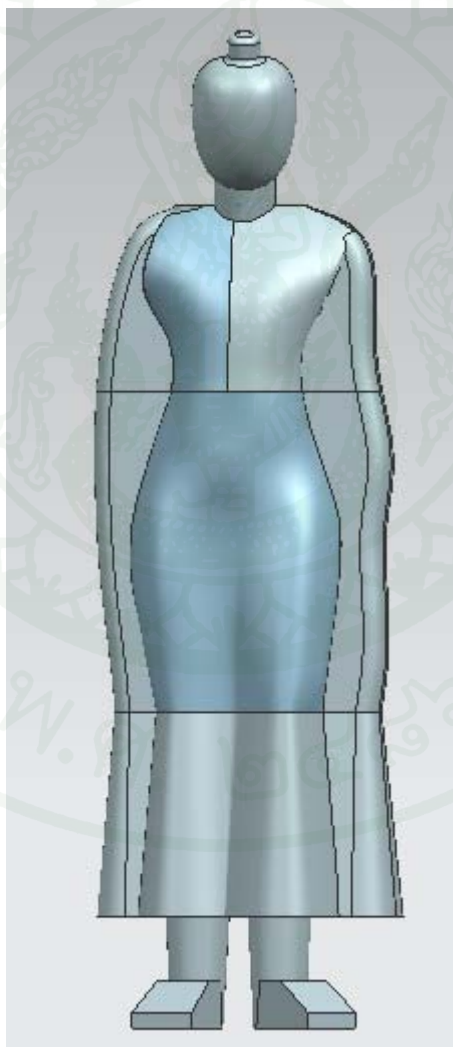
ในกระบวนการใช้ โปรแกรม Unigraphics NX 5 เพื่อช่วยให้การออกแบบรูปทรง 3 มิติเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็ว นอกเหนือจากความสามารถในการแสดงภาพเป็น 3 มิติให้เห็นได้อย่างถูกต้องแล้ว ข้อมูลของชิ้นงานที่ออกแบบต้องมีคุณสมบัติเป็นเสมือนวัตถุจริงสามารถให้น้ำหนักได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 56 ภาพพระพุทธรูปในลักษณะเป็นแบบจำลองทรงตันด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 5

หลังจากที่ทำการแปลงแบบพื้นผิว ที่ได้จากโปรแกรม Geo Magic Studio Version 8 แปลงเป็น ชิ้นงานทรงตัน แล้ว จึงทำการเขียนพระพุทธรูปจำลองขึ้นมาใหม่ โดยการตัดรายละเอียดส่วนผม และส่วนแขนออก แต่ยังคงอ้างอิงขนาดเช่นเดียวกับองค์ต้นแบบ โดยเหตุผลที่ตัดออกนั้นเพราะรายละเอียดที่ได้จาก โปรแกรม Geo Magic Studio Version 8 นั้นมีรายละเอียดของ ช่องผิวที่ละเอียดทำให้ไม่สามารถใส่แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ จึงสร้างแบบจำลอง ขึ้นมาใหม่และตามขั้นตอนในการจำลองการวิเคราะห์โดยทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การสร้างแบบจำลองของพระพุทธรูปขึ้นมาใหม่

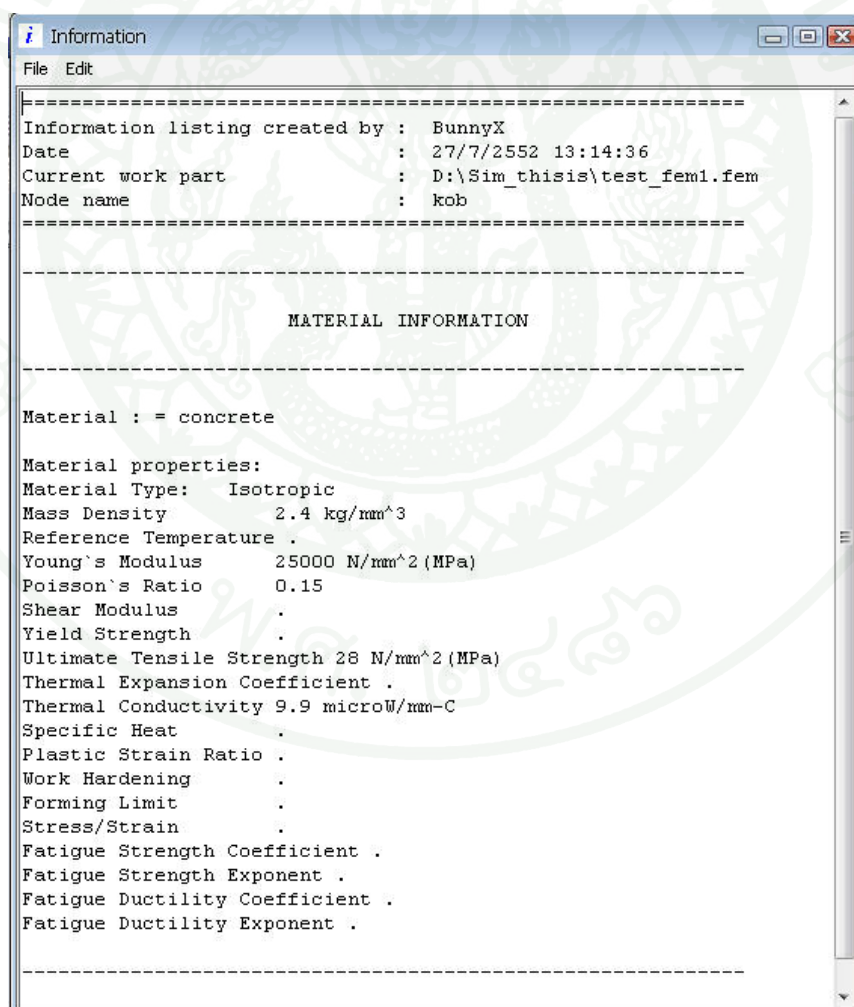


ภาพที่ 57 ภาพแบบจำลองพระพุทธรูปที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองการวิเคราะห์ความแข็งแรง

- การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ในที่นี้ใช้วัสดุคือ คอนกรีต ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

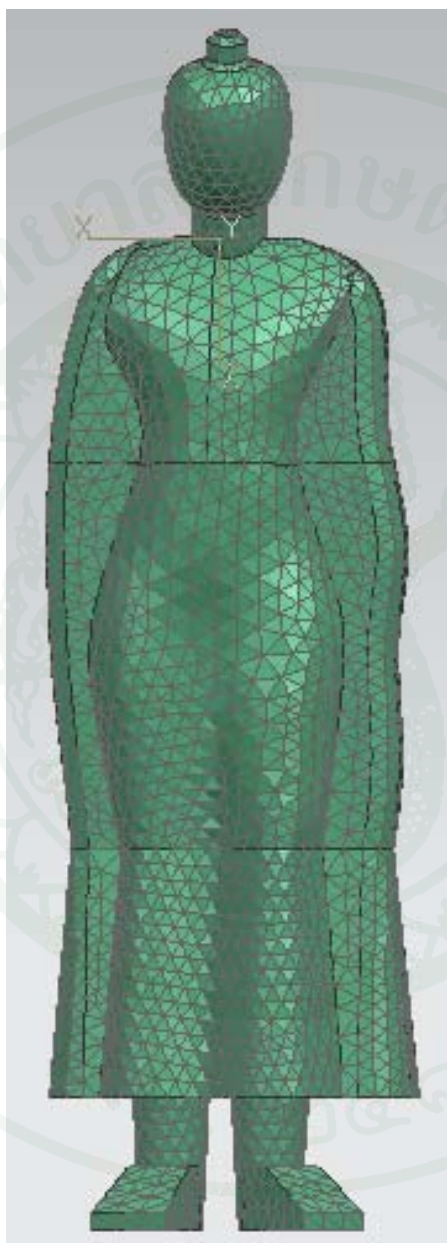
Density	$2.32 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Ultimate Stress	28 Mpa
Poisson's Ratio	0.15
Young's Modulus	25 Gpa
Thermal Coefficient	$9.9 \cdot 10^{-6}/\text{C}$

โดยอ้างอิงจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ จากหนังสือเรื่องการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 58 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- การสร้าง 3D Tetrahedral Mesh หลังจากที่ได้ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุแล้ว
จึงทำการสร้าง 3D Tetrahedral Mesh โดยทำการกำหนด Element Size ที่ขนาด 750 mm.



ภาพที่ 59 พระพุทธรูปจำลองที่ผ่านการสร้าง 3D Tetrahedral Mesh แล้ว

ขั้นตอนการใส่แรงตามเงื่อนไขของการคำนวณแรงลม โดยอ้างอิงจากกรมโยธาธิการและ
ผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

ตารางที่ 3 ตารางคำนวณแรงลม

Model	Projected Area	H	H	Ce	p	p	p	p	P	M ที่ฐาน	M ที่ข้อเท้า
		องค์พระ	+Ground L.	$= (Z/10)^{0.28}$		ตามกฎกระทรวงล่าสุด	แบบ B	ใช้ออกแบบ	(กท.)		
Block	138.55	32.00	38.20	1.38	134.53	120.00	150.00	150.00	20,782.68	820,915.91	633,871.77
	115.46	20.00	26.20	1.21	117.94	80.00	135.00	135.00	15,587.01	428,642.80	288,359.70
	115.46	10.00	16.20	1.00	97.13	50.00	120.00	120.00	13,855.12	242,464.61	117,768.53
Cylinder	208.87	32.00	38.20	1.38	134.53	120.00	150.00	150.00	31,329.85	1,237,528.94	955,560.32
	174.06	20.00	26.20	1.21	117.94	80.00	135.00	135.00	23,498.03	646,195.83	434,713.56
	174.06	10.00	16.20	1.00	97.13	50.00	120.00	120.00	20,887.14	365,524.91	177,540.67
Model Buddha	98.07	32.00	38.20	1.38	134.53	120.00	150.00	150.00	14,710.23	581,054.26	448,662.15
	127.91	20.00	26.20	1.21	117.94	80.00	135.00	135.00	17,267.94	474,868.44	319,456.95
	115.52	10.00	16.20	1.00	97.13	50.00	120.00	120.00	13,861.92	242,583.64	117,826.34

โดยได้ทำตารางคำนวณแรงลมเพื่อใช้ในการจำลองการทดลอง โดยอ้างอิงแรงลมจากกรม
อุตุนิยมวิทยาในจังหวัดกาญจนบุรีแต่ละเดือนในรอบ 10 ปี

ตารางที่ 4 แสดงความเร็วลมในแต่ละเดือนในรอบ 10 ปี

สถานที่ จังหวัด	ปี	เดือน											
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
กาญจนบุรี	1998	20	28	28	30	35	25	22	25	25	20	18	25
กาญจนบุรี	1999	12	20	20	23	22	13	13	11	12	20	12	22
กาญจนบุรี	2000	15	20	20	18	18	15	35	21	13	15	13	13
กาญจนบุรี	2001	16	10	20	18	16	16	11	13	12	13	13	12
กาญจนบุรี	2002	11	15	14	18	16	35	22	18	32	20	40	15
กาญจนบุรี	2003	12	17	25	35	13	22	25	15	18	15	22	15
กาญจนบุรี	2004	13	16	15	20	14	15	15	15	15	12	10	11
กาญจนบุรี	2005	8	10	11	30	30	12	12	14	12	14	15	13
กาญจนบุรี	2006	8	10	12	12	11	10	8	20	20	8	8	13
กาญจนบุรี	2007	10	8	10	12	15	12	10	9	8	10	8	8

มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2550

วิธีการกำหนดค่าแรงลมสถิติเทียบเท่า

หน่วยแรงลมสถิติเทียบเท่า วิธีการคำนวณแรงลม 3 วิธี

1) วิธีการอย่างง่าย (Simple Procedure) ใช้สำหรับ

ก) ระบบโครงสร้างหลักด้านแรงลม ของอาคารเดี่ยวและอาคารสูงปานกลาง
ที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร.และมีความสูงไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด
ยกเว้น อาคารที่สั้นใหว่ง่าย ได้แก่อาคารที่มีน้ำหนักเบา และมีความถี่ธรรมชาติต่ำ มีคุณสมบัติ
ความหน่วงของ อาคารต่ำ ผนังภายนอก (cladding) ของอาคารที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนทุกประเภท

2) วิธีการอย่างละเอียด (Detail Procedure) ใช้สำหรับ

ก) ระบบโครงสร้างหลักด้านแรงลมของอาคารสูงเกิน 80 ม. หรือความสูงเกิน 3 เท่า
ของความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด

ข) อาคารที่สั้นใหว่ง่าย ได้แก่ อาคารที่มีน้ำหนักเบา มีความถี่ธรรมชาติต่ำ และมี
คุณสมบัติความหน่วงของอาคารต่ำ

3) วิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel Procedure) ใช้สำหรับอาคารสูงอาคาร
รูปทรงซับซ้อนอาคารที่ตั้งอยู่ ในสภาพภูมิประเทศที่มีอาคารสูงอยู่หนาแน่นสะพานช่วงยาว
(สะพานจิง, สะพานแขวน) และหลังคาขนาดใหญ่ เป็นต้นซึ่งวิธีการอย่างละเอียดในมาตรฐานไม่
สามารถใช้ได้หรือในกรณีที่ต้องการความถูกต้องสูง

รูปแบบการคำนวณแรงลมของมาตรฐานฉบับใหม่

$$p = qC_e C_g C_p$$

p = หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (นิวตันต่อตารางเมตร)

q = หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม $\frac{1}{2} \rho \bar{V}^2$

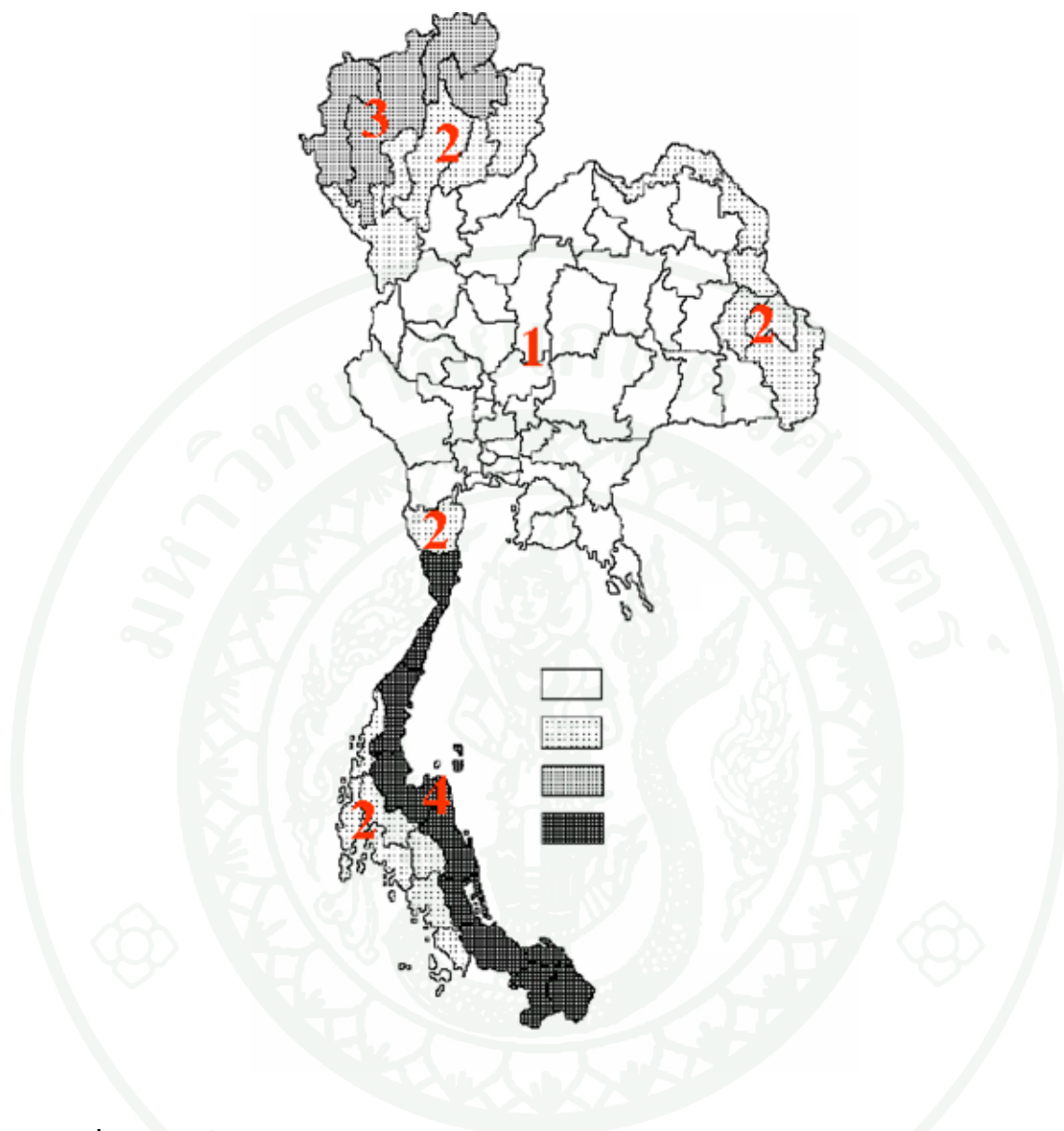
C_e = ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ

C_g = ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ = 1.25 กก/ม³

$\bar{V}$ = ความเร็วลมอ้างอิงมีหน่วยเป็น ม/วินาที คือความเร็วลมเฉลี่ยในช่วง 1 ชั่วโมงที่ความสูง 10 ม จากพื้นดินในสภาพภูมิประเทศโล่ง สำหรับคาบเวลากลับ (return period) 50 ปี



ภาพที่ 60 แผนที่ความเร็วอ้างอิง

หมายเหตุ: แผนที่ความเร็วอ้างอิง

กลุ่มที่ 1 $V = 25$ เมตร ต่อ วินาที

กลุ่มที่ 2 $V = 27$ เมตร ต่อ วินาที

กลุ่มที่ 3 $V = 29$ เมตร ต่อ วินาที

กลุ่มที่ 4 $V = 30$ เมตร ต่อ วินาที

ตารางที่ 5 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อย เมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วน โครงสร้างนั้นๆ เช่น - อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร - อาคารชั่วคราว - อาคารเก็บของเล็กๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ	น้อย
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภท ความสำคัญ น้อย มาก และสูงมาก	ปกติ
อาคารและส่วนโครงสร้างอื่นที่หากเกิดการพังทลาย จะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ และสาธารณชนอย่างมาก เช่น - อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในพื้นที่หนึ่งๆ มากกว่า 300 คน - โรงเรียนประถมหรือมัธยมศึกษาที่มีความจุมากกว่า 250 คน - มหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัย ที่มีความจุมากกว่า 500 คน - สถานรักษาพยาบาลที่มีความจุคนไข้มากกว่า 50 คน แต่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - เรือนจำและสถานกักกันนักโทษ	สูง
อาคารและส่วนโครงสร้างที่มีความจำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน เป็นอย่างมาก หรือ อาคารที่จำเป็นต่อการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุเป็นอย่างมาก เช่น - โรงพยาบาลที่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง และโรงเก็บรถฉุกเฉินต่างๆ - โรงไฟฟ้า - โรงผลิตน้ำประปา ถังเก็บน้ำ และสถานีสูบน้ำที่มีความดันสูง สำหรับการดับเพลิง - อาคารศูนย์สื่อสาร - อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย - ท่าอากาศยาน ศูนย์บังคับการบิน และโรงเก็บเครื่องบิน ที่ต้องใช้เมื่อเกิดกรณีฉุกเฉิน - อาคารศูนย์บัญชาการแห่งชาติ อาคารหรือส่วนโครงสร้างในส่วนของการผลิต การจัดการ การจัดเก็บ หรือการใช้สารพิษ เช่น เชื้อเพลิง หรือสารเคมี อันก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้	สูงมาก

ตารางที่ 6 แสดงค่าประกอบความสำคัญของแรงลม

ประเภทความสำคัญของอาคาร	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม	
	สภาวะจำกัดด้านกำลัง	สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน
น้อย	0.8	0.75
ปกติ	1	0.75
มาก	1.15	0.75
สูงมาก	1.15	0.75

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (q)

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2$$

โดยที่ q ที่คำนวณได้มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

ρ = ความหนาแน่นของมวลอากาศ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับความดันบรรยากาศปกติและอุณหภูมิของอากาศประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส

$\bar{V}$ = ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

g = อัตราเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 เมตรต่อวินาที²
ความเร็วลมอ้างอิง คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง (open exposure) สำหรับคาบเวลากลับ (return period) 50 ปี (V_{50})

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ เป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลมให้แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ

การคำนวณค่าแรงลมโดยวิธีการอย่างละเอียด คำนึงถึงสภาพภูมิประเทศเป็น 3 แบบ ดังนี้

ก. สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมีอาคาร ดันไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง กระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือเป็นบริเวณชายฝั่งทะเล ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ

$$C_e = \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.28}$$

โดยที่ ถ้า C_e ที่คำนวณจากสมการ $C_e = \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.28}$ มีค่าน้อยกว่า 1.0 หรือมากกว่า 2.5 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 1.0 หรือ 2.5 ตามลำดับ

ข. สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ

$$C_e = 0.5 \left(\frac{Z}{12.7} \right)^{0.5}$$

โดยที่ ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ มีค่าน้อยกว่า 0.5 หรือมากกว่า 2.5 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 0.5 หรือ 2.5 ตามลำดับ

ค. สภาพภูมิประเทศแบบ C เป็นสภาพภูมิประเทศของบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่ มีอาคารสูงอยู่หนาแน่น โดยที่อาคารไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ต้องมีความสูงเกิน 4 ชั้น ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ

$$C_e = 0.4 \left(\frac{Z}{30} \right)^{0.72}$$

โดยที่ ถ้า C_e ที่คำนวณได้จากสมการ มีค่าน้อยกว่า 0.4 หรือมากกว่า 2.5 ให้ใช้ค่า C_e เท่ากับ 0.4 หรือ 2.5 ตามลำดับ

อาคารที่ตั้งอยู่ในภูมิประเทศแบบ C ควรพิจารณาด้วยความรอบคอบ เนื่องจากอาจเกิดแรงลมที่สูงจากช่องลมที่เกิดจากการสร้างอาคาร และผลของระลอกลมที่เกิดจากอาคารสูงข้างเคียง สภาพภูมิประเทศใดๆ จะจัดอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบ B หรือ C ได้ก็ต่อเมื่อมีลักษณะภูมิประเทศในลักษณะนั้นๆ สม่่าเสมอในทิศทางต้นลม เป็นระยะทางไม่ต่ำกว่า 1 กิโลเมตรหรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า ซึ่งสภาพภูมิประเทศที่ใช้ในการคำนวณนี้ ควรสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศที่แท้จริงในทิศทางลมที่พิจารณา

ค่าประกอบเนื่องจากการกระโชกของลม (C_g)

อัตราส่วนระหว่างผลของแรงลมสูงสุดต่อผลของแรงลมเฉลี่ยเป็นค่าประกอบที่นำมาปรับค่าหน่วยแรงลม โดยรวมผลที่เกิดจาก

- 1) การแปรปรวนของความเร็วลม (random wind gusts) ที่พัดเข้าหาอาคาร
- 2) หน่วยแรงลมที่ผันผวนจากผลของของระลอกลม (wake-induced fluctuating pressure) โดยรอบอาคาร
- 3) การตอบสนองด้านพลศาสตร์ของอาคาร

สำหรับหน่วยแรงลมสถิติเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.0 ในการออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม ยกเว้น ฝ้าและกำแพงให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.35

สำหรับหน่วยแรงลมสถิติเทียบเท่าที่กระทำกับพื้นผิวภายนอกอาคาร ให้ใช้ค่า C_g เท่ากับ 2.5 ในการออกแบบโครงสร้างรองและผนังภายนอกอาคาร (cladding) ที่มีขนาดเล็ก (ประมาณขนาดของหน้าต่าง)

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p)

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำภายนอกอาคารสำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคารและระบบโครงสร้างหลักของอาคาร

กรณีที่ 1 ใช้ค่า $C_p = -0.15$ ถึง 0.0

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่ปราศจากช่องเปิดขนาดใหญ่ แต่อาจมีช่องเปิดเล็กๆกระจายสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดรวมน้อยกว่า 0.1% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ตัวอย่างได้แก่อาคารสูงทั่วไปที่มีผนังปิดล้อมทุกด้านและมีระบบระบายอากาศภายใน รวมทั้งอาคารเดี่ยวบางประเภท เช่น คลังสินค้าที่ไม่มีหน้าต่างหรือช่องเปิด โดยที่ประตูต้องออกแบบให้สามารถต้านพายุได้ และได้รับการปิดสนิทเมื่อเกิดพายุ

กรณีที่ 2 ใช้ค่า $C_p = -0.45$ ถึง 0.3

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่มีการรั่วซึมซึ่งกระจายไม่สม่ำเสมอ โดยที่อาจมีช่องเปิดขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่ต้องได้รับการปิดสนิท เมื่อเกิดพายุและมีความแข็งแรงเพียงพอตัวอย่างได้แก่ อาคารขนาดเล็กทั่วไป และอาคารสูงที่มีหน้าต่างซึ่งสามารถเปิด-ปิดได้ หรือมีระเบียงซึ่งมีประตูที่สามารถเปิด-ปิดได้

กรณีที่ 3 ใช้ค่า $C_p = -0.7$ ถึง 0.7

กรณีนี้ใช้กับอาคารที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยที่ความแปรปรวนของลมภายนอกอาคารสามารถส่งผลเข้าไปภายในได้ ตัวอย่างได้แก่ อาคารโรงงานอุตสาหกรรมและคลังสินค้าที่ประตูอาจจะเปิดในระหว่างเกิดพายุ หรือประตูไม่สามารถต้านพายุได้

ตารางที่ 7 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ

ความสูงจากพื้นดิน	สภาพภูมิประเทศ แบบ A	สภาพภูมิประเทศ แบบ B	สภาพภูมิประเทศ แบบ C
สูงไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.50	0.40
สูงเกิน 10 เมตรแต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.21	0.63	0.40
สูงเกิน 20 เมตรแต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.47	0.89	0.49
สูงเกิน 40 เมตรแต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.79	1.25	0.81
สูงเกิน 80 เมตรแต่ไม่เกิน 120 เมตร	2.01	1.54	1.09
สูงเกิน 120 เมตรแต่ไม่เกิน 160 เมตร	2.17	1.77	1.34
สูงเกิน 160 เมตรแต่ไม่เกิน 200 เมตร	2.31	1.98	1.57
สูงเกิน 200 เมตรแต่ไม่เกิน 250 เมตร	2.46	2.22	1.84
สูงเกิน 250 เมตรแต่ไม่เกิน 300 เมตร	2.50	2.43	2.10

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคารทิศทางลมและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามความสูงของอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างหลักของอาคาร แบ่งออกเป็น 3 หมวดดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับอาคารเดี่ยวที่มีความสูงต่อความกว้าง $\left(\frac{H}{D_s}\right)$ น้อยกว่า 1 และมีความสูงอ้างอิง น้อยกว่า 23 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมได้ถูกนำมารวมกับค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม
- ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยลมภายนอก สำหรับอาคารสูง
- ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับโครงสร้างพิเศษ

จากข้อมูลที่เก็บได้และนำมาใช้ในการคำนวณจากสูตร

หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม

$$p = qC_e C_g C_p$$

$\rho = 1.25$ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร)

$V = 33$ เมตรต่อวินาที (ความเร็วลมที่ใช้ในการคำนวณประมาณ 64 น็อต โดยกำหนด

ความเร็วลมเนื่องจากแรงลมที่เก็บได้จริงคือ 40 น็อต)

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$q = 0.5 \times 1.25 \times 33^2 \quad q = 680.625$$

ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e)

$$C_e = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.28} \text{ (การเลือกใช้ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิอากาศแบบ A นั้นเพราะต้องการเพื่อค่าแรงสำหรับการทดลอง)}$$

ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (C_g)

$$C_g = 2$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p)

$$C_p = 0.7 \text{ (การเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเท่ากับ 0.7 นั้นเพราะเพื่อสภาพความแปรปรวนของลมภายนอกอาคาร)}$$

จากข้อมูลงานที่นำมาจำลองการทดลองนั้นมีขนาดสูง จึงได้แบ่งองค์พระพุทธรูปจำลองเป็น 3 ส่วนเนื่องจากค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ที่กระทำกับองค์พระพุทธรูปได้แบ่งตามความสูงจากพื้นดินทำให้แรงที่ใช้การทดลองนั้นมีค่าแรงที่ไม่เท่ากัน

ดังนั้นหน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม ที่ได้จึงมี 3 ค่าดังนี้

1. หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลมที่ ความสูง(Z) ที่ 10 เมตร มีค่าเท่ากับ 97.13 โดยค่าตามกฎของกระทรวงต่ำสุดที่กำหนดไว้คือ 50 ซึ่งค่าที่ใช้ในการทดลองสูงกว่าค่าที่กระทรวงกำหนดไว้ถึง 94.6%

2. หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลมที่ ความสูง(Z) ที่ 20 เมตร มีค่าเท่ากับ 117.94 โดยค่าตามกฎของกระทรวงต่ำสุดที่กำหนดไว้คือ 80 ซึ่งค่าที่ใช้ในการทดลองสูงกว่าค่าที่กระทรวงกำหนดไว้ถึง 47.42%

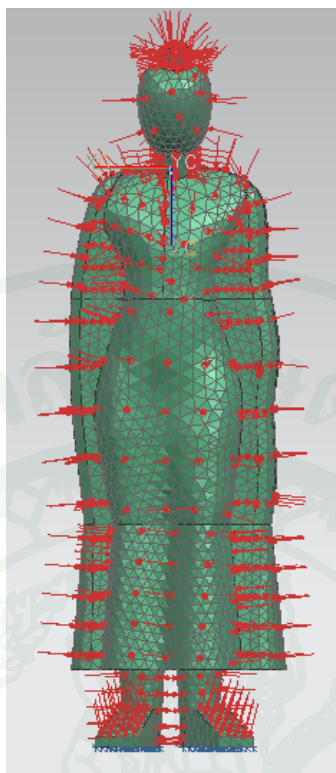
3. หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลมที่ ความสูง(Z) ที่ 32 เมตร มีค่าเท่ากับ 134.53 โดยค่าตามกฎของกระทรวงต่ำสุดที่กำหนดไว้คือ 120 ซึ่งค่าที่ใช้ในการทดลองสูงกว่าค่าที่กระทรวงกำหนดไว้ถึง 12.1%

แต่เนื่องจากภูมิประเทศที่สร้างองค์พระพุทธรูปจำลองเป็นภูมิประเทศแบบ B การคำนวณแรงลมสำหรับอาคารสูงไม่เกินสามชั้นหรือมีอาคารสูงอื่นๆ บังลมอยู่โดยรอบก็ไม่จำเป็นต้องคิดแรงลม แต่ในอาคารสูงมากนั้นแรงลมจะมีผลต่อโครงสร้างมาก สำหรับเมืองไทยตั้งแต่ภาคกลางขึ้นไปไม่ค่อยพบสภาวะลมแรงมากนักข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานครกำหนดแรงลมดังนี้

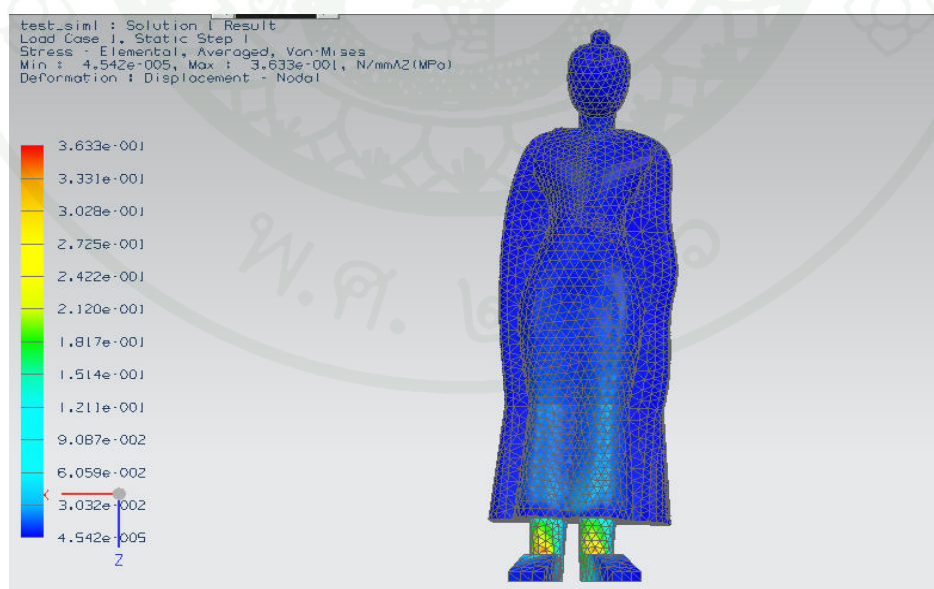
ตารางที่ 8 ข้อกำหนดแรงลมต่ำสุด

ความสูงจากพื้นดิน(เมตร)	หน่วยแรงลม,นิวตัน/ม. ²
0 - 10	50
10 - 20	80
20 - 40	120
40 - 60	160

หลังจากนั้นทำการใส่แรงลมในแต่ละช่วงความสูงโดยแบ่งองค์พระพุทธรูปจำลองออกเป็น 3 ช่วงโดยแต่ละช่วงมีความสูง 10 เมตร เพื่อใส่แรงในแต่ละช่วงความสูง โดยแรงลมที่เกิดขึ้นแต่ละช่วงนั้นมีความแรงของลมที่ต่างกัน โดยทำการใส่แรงในลักษณะเป็นแรงลมจากการคำนวณ จะได้เป็นแรงลมจากการคำนวณต่อพื้นที่ผิวหน้าสัมผัส จะได้เป็นค่าแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นขององค์พระพุทธรูปจำลอง โดยแรงที่ใส่จะเป็นลักษณะกระจายทั่วพื้นผิวสัมผัส



ภาพที่ 61 แสดงรายละเอียดแรงที่ใส่ในการทดลองขององค์พระพุทธรูป
หลังจากนั้นจำให้โปรแกรมทำการคำนวณ และได้ผลการจำลองการทดลอง



ภาพที่ 62 ผลที่ได้จากการจำลองการทดลองหาความแข็งแรงขององค์พระพุทธรูปจำลอง



ภาพที่ 63 ชิ้นงานจำลองที่ได้จากกระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอย และ Rapid Proto Type

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกแสดงในภาพที่ 58 จากรูปแสดงให้เห็นว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะปรากฏที่บริเวณข้อพระบาททั้งสองข้าง โดยมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณข้อพระบาทข้างขวามีค่าเท่ากับ 0.37 MPa และบริเวณข้อพระบาทข้างซ้ายมีค่าเท่ากับ 0.33 MPa ซึ่งจุดที่มีความเค้นสูงสุดนั้นเป็นจุดที่อยู่ข้อพระบาทและอยู่จากพื้นประมาณ 1.67 เมตร

ภาพที่ 62 แสดงถึงค่าความเค้นตามแนวความสูงนับจากฐานขององค์พระ โดยแสดงทั้งค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่ขาขวาและซ้ายขององค์พระ จากกราฟจะเห็นได้ว่าลักษณะเส้นแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งขาซ้ายและขวามีรูปแบบเดียวกัน แต่เนื่องจากการยื่นขององค์พระไม่ได้อยู่ในลักษณะสมมาตรดังนั้นเส้นกราฟของความเค้นจึงมีความแตกต่างกันตามลักษณะการยื่นนั่นเอง โดยค่าความเค้นสูงสุดจะปรากฏที่ขานั่นเอง

ในการพิจารณาความแข็งแรงขององค์พระต่อแรงลมกระทำนั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาคือตัวองค์พระนั้นสามารถทนแรงอันเนื่องมาจากลมที่เข้าปะทะหรือไม่ ดังนั้นถ้าพิจารณาแรงอันเนื่องมาจากลมที่ปะทะโดยที่ลมมีความเร็ว 33 m/s จากการคำนวณพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 0.37 MPa ที่ข้อพระบาทด้านขวา ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า Ultimate Stress ของคอนกรีตซึ่งมีค่าเท่ากับ 28 MPa จะพบว่าค่าความเค้นสูงสุดอันเกิดจากแรงลมที่ความเร็ว 33 m/s จะทำให้เกิดค่าสูงสุดที่ 0.37 MPa ซึ่งน้อยกว่าค่า Ultimate Stress ประมาณ 75 เท่า

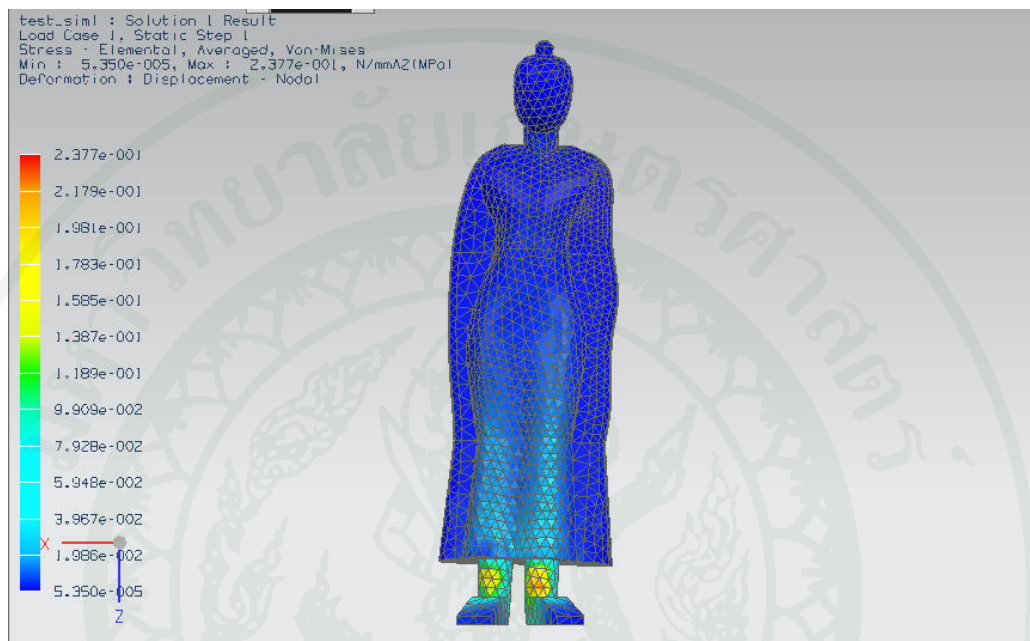
ในการทดลองนั้นยังได้ทำการปรับขนาดของเอลิเมนต์ทั้งสามลักษณะดังนี้ คือ

เอลิเมนต์เฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 1000 mm.

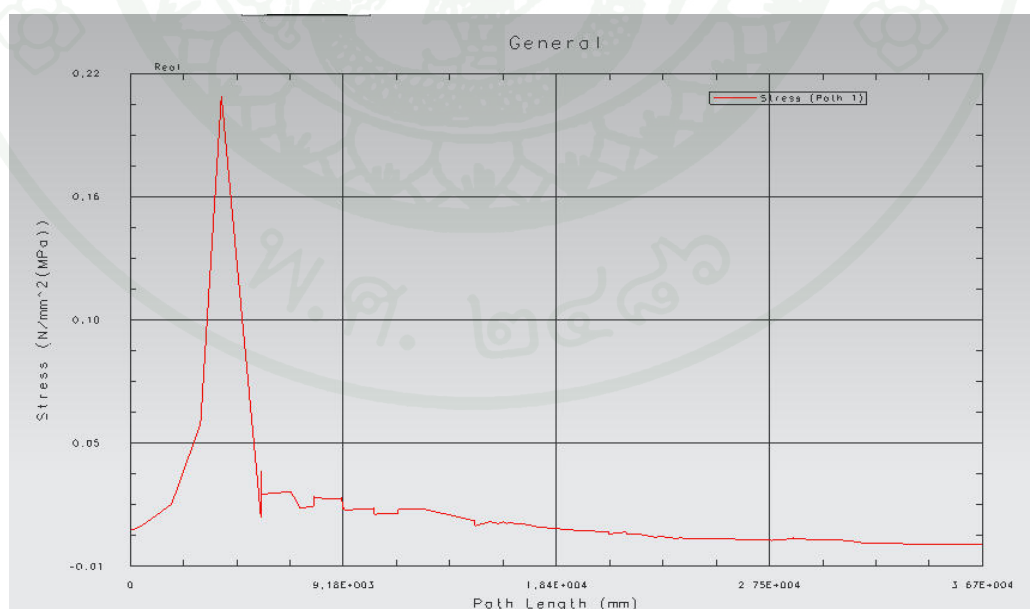
เอลิเมนต์เฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 750 mm.

เอลิเมนต์เฉลี่ยของชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 750 mm. และในส่วนบริเวณที่สนใจคือ บริเวณข้อพระบาทมีขนาด 150 mm.

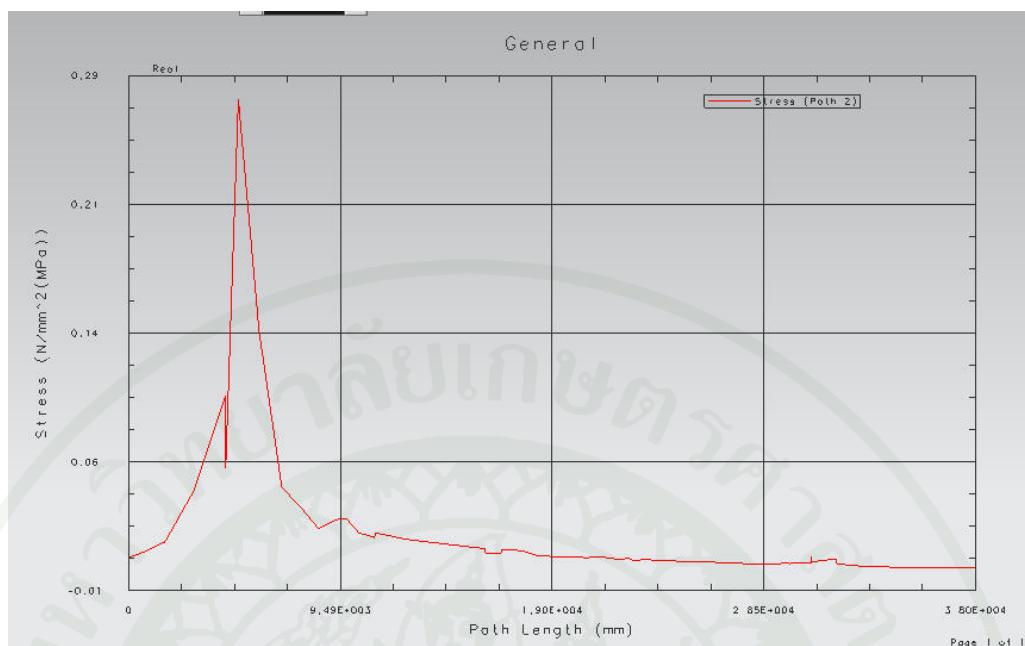
นอกจากนี้แล้วในการทดลองยังได้ทำการเปรียบเทียบในส่วนของการนำเอาแรงโน้มถ่วงของโลกที่นำมาในส่วนของน้ำหนักของวัตถุเข้ามาพิจารณาเพื่อดูแนวโน้มของความเสียหายที่จะเกิดขึ้นพิจารณา



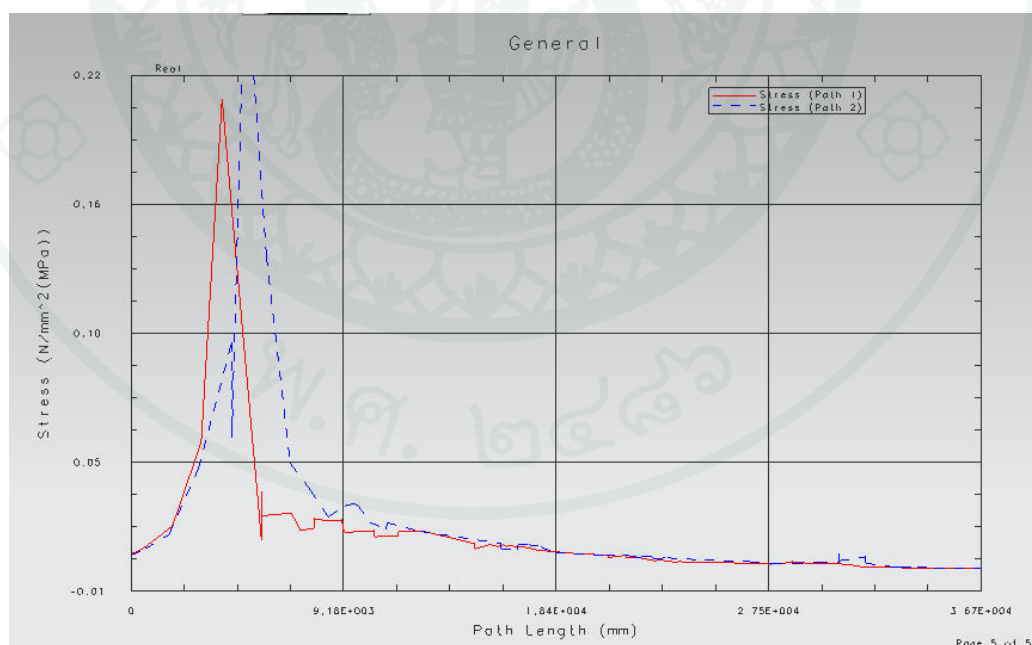
ภาพที่ 64 ภาพแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่



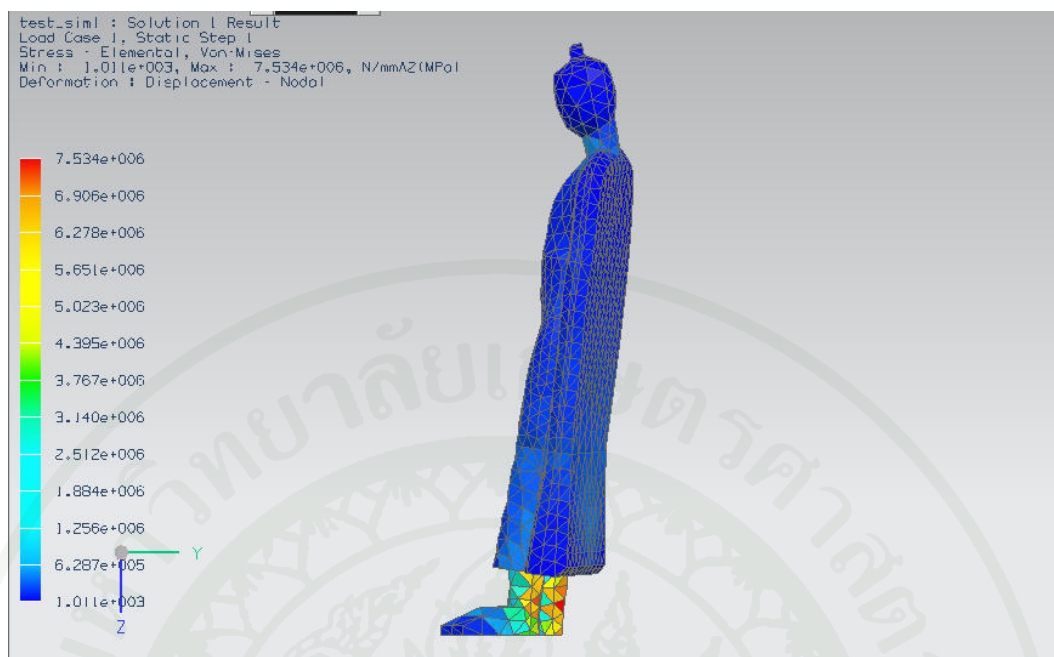
ภาพที่ 65 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างขวา ในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่



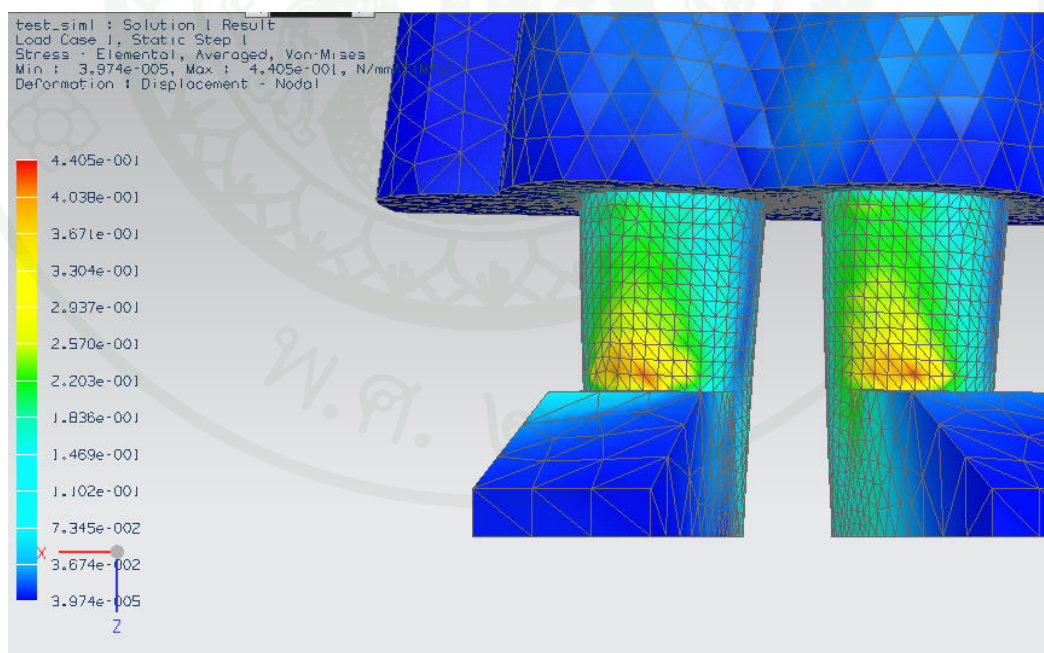
ภาพที่ 66 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างซ้าย ในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่



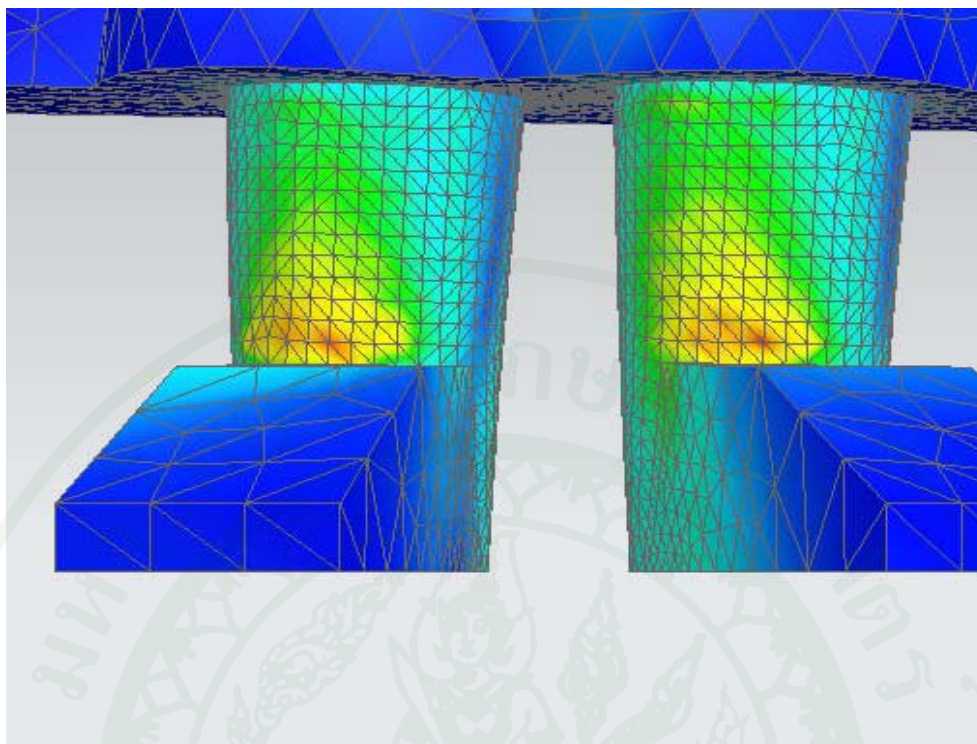
ภาพที่ 67 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาททั้งสองข้าง ในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่



ภาพที่ 68 ภาพแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่และ
นำค่าแรงโน้มถ่วงของโลกเข้ามาพิจารณา



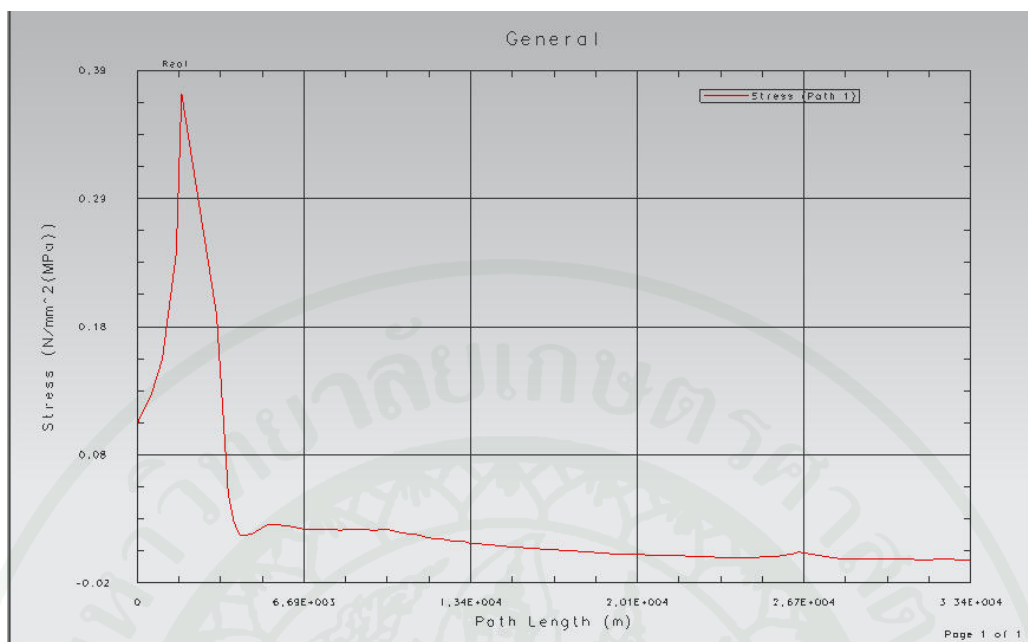
ภาพที่ 69 ภาพแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์เล็กของชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ
750 mm. และในส่วนบริเวณที่สนใจคือ บริเวณข้อพระบาทมีขนาด 150 mm.



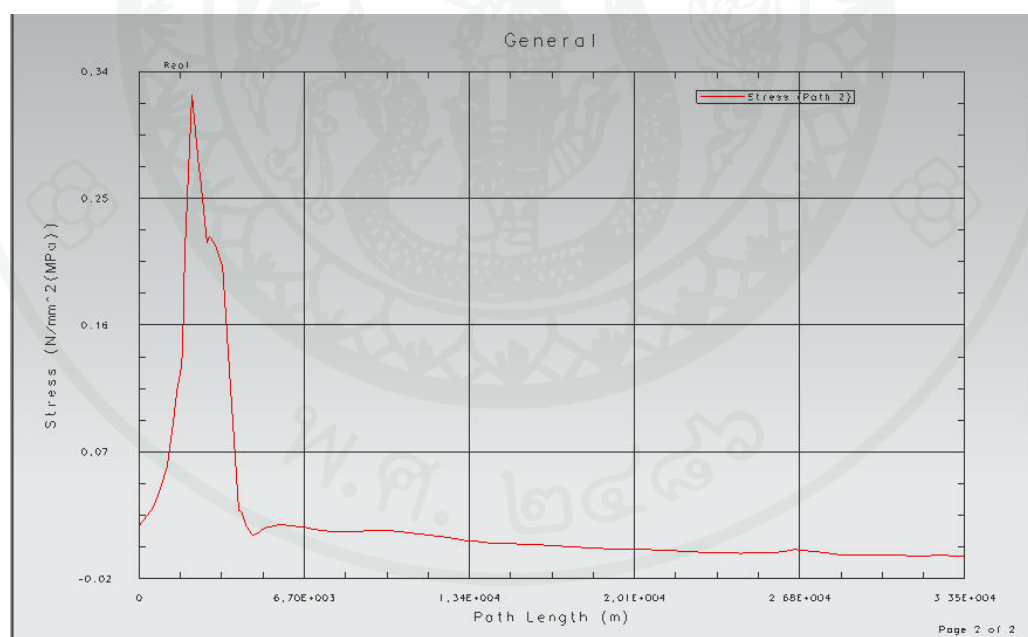
ภาพที่ 70 แสดงส่วนขยายขนาดเอลิเมนต์ขนาดเล็กบริเวณที่สนใจ

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแรงกระทำอันเนื่องจากลมพายุโซนร้อนที่มีความเร็วลม 33m/s อย่างเดียวจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อองค์พระ นั่นคือความแข็งแรงของข้อพระบาทขององค์พระสามารถทนต่อแรงลมที่มาปะทะกับองค์พระได้ เมื่อนำแรงโน้มถ่วงของโลกมาพิจารณาในส่วนของน้ำหนักของวัตถุและแรงลมที่กระทำต่อองค์พระพุทธรูป ทำให้ทราบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทด้านหลังข้างขวา เลขค่า Ultimate stress ทำให้องค์พระพุทธรูปเกิดความเสียหายหรือพังลงมาได้

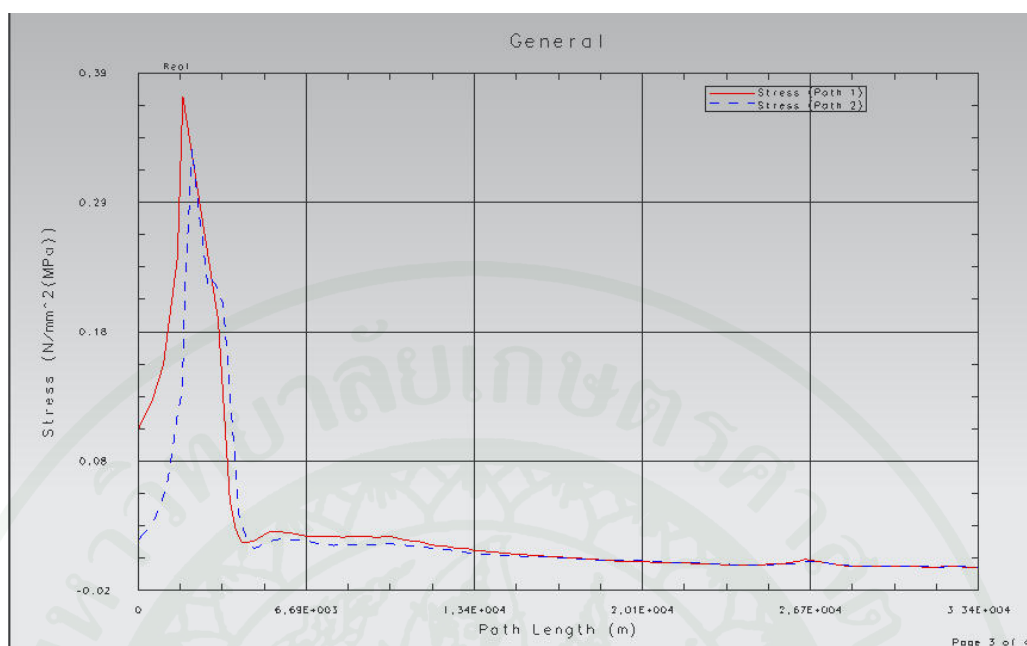
ทั้งนี้งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะแรงลมปะทะที่อาจจะทำความเสียหายต่อองค์พระ ไม่ได้ศึกษาถึงความแข็งแรงของโครงสร้างอันเนื่องมาจากน้ำหนักขององค์พระที่กระทำต่อขาทั้งสองข้างขององค์พระซึ่งแรงกระทำชนิดนั้นเป็นแรงกด



ภาพที่ 71 แสดง Stress ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างซ้าย



ภาพที่ 72 แสดง Stress ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาทข้างขวา



ภาพที่ 73 แสดงการเปรียบเทียบ Stress ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อพระบาททั้งสองข้าง

ตารางที่ 10 แสดงค่าความเค้นและบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด

ขนาดของเอลิเมนต์	ความเค้นที่เกิดขึ้น สูงสุด	ตำแหน่งที่เกิด ความเค้นสูงสุด
เอลิเมนต์เฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 1000 mm.	0.23 MPa	ข้อพระบาท ด้านขวา
เอลิเมนต์เฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 750 mm.	0.37 MPa	ข้อพระบาท ด้านขวา
เอลิเมนต์เฉลี่ยมีขนาดเท่ากับ 750 mm. และ แบ่งย่อยบริเวณข้อพระบาทมีขนาด 150 mm.	0.44 MPa	ข้อพระบาท ด้านขวา
เอลิเมนต์เฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 1000 mm. และค่าแรงดึงสูงสุดของโลก	7.53×10^6 MPa	ด้านหลังของข้อ พระบาทข้างขวา
เอลิเมนต์เฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 750 mm. และค่าแรงดึงสูงสุดของโลก	8.31×10^6 MPa	ด้านหลังของข้อ พระบาทข้างขวา
เอลิเมนต์เฉลี่ยมีขนาดเท่ากับ 750 mm. และ แบ่งย่อยบริเวณข้อพระบาทมีขนาด 150 mm. และค่าแรงดึงสูงสุดของโลก	8.86×10^6 MPa	ด้านหลังของข้อ พระบาทข้างขวา

ซึ่งจากผลที่ได้นั้น ตรงกับสมมุติฐานในเบื้องต้นว่าแรงลมที่มากกระทำกับองค์พระพุทธรูปจำลองนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเค้น (Stress) สูงที่สุดบริเวณข้อพระบาท ซึ่งตรงกับผลที่ได้จากการทดลองจากโปรแกรมช่วยทางด้านวิศวกรรม

ดังนั้นในการก่อสร้างองค์พระจริงจะต้องศึกษาถึงความแข็งแรงขององค์พระทั้งในแง่ของการรับน้ำหนักและการรับแรงปะทะอันเนื่องมาจากลมและอาจจะต้องเพิ่มเติมผลอันเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกอื่นๆเช่น แผ่นดินไหวเข้ามาประกอบด้วยเพื่อความปลอดภัย

วิจารณ์

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้วิศวกรรมย้อนรอยควบคู่กับ การจำลองการทดลองด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างกว้างขวาง โดยข้อได้เปรียบของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับวิธีธรรมดาที่มีดังนี้

1. สามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดีและสะดวก
2. สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่างๆ เช่น โหลดกระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง
3. ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มีความยุ่งยาก
4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าเงื่อนไข หรือข้อบังคับ และจุดรองรับจะอยู่ในลักษณะใดๆ
5. สามารถจะเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งทำให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามความจำเป็น
6. ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือระบบสามารถจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ได้สะดวกและยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายด้วย

7. ในระบบการออกแบบและการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ (CAD และ CAM) ใหม่นิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อน ก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและมีความถูกต้องแม่นยำสูง

8. ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุอยู่ในช่วงพลาสติก ก็ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์สิ่งที่ต้องการ ได้สะดวกเช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัว ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โครงสร้างหรือ เครื่องจักรกลก็มีข้อพึงระวังดังต่อไปนี้

ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับสามประการหลัก คือ ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงาน ได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และ ประการสุดท้ายคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อยๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขนั้น จะขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์คอมพิวเตอร์และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ การใช้ความแม่นยำระดับสอง และขนาดของ Bandwidth ที่เล็กที่สุดจะสามารถช่วยลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้ และถ้าเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีมาตรฐานสูง ความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนจากการเลือกใช้ชนิด และขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาตรฐานทั่วไป เช่น ANSYS ข้อมูลที่จะต้องใช้กับคอมพิวเตอร์คือ ตำแหน่งหรือพิกัดจุดต่อต่างๆ ของเอลิเมนต์ ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ คุณสมบัติทางกลของวัสดุของแต่ละเอลิเมนต์ ลักษณะของการโหลดกระทำ ลักษณะของเงื่อนไข หรือข้อบังคับ และต้องระบุชนิดการวิเคราะห์ด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้ข้อมูลเหล่านั้นในการคำนวณสิ่งที่ต้องการ

การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จากชิ้นงานต้นแบบที่มีความซับซ้อนสูง

ปัญหาผู้ที่ออกแบบ มักจะพบบ่อยในกระบวนการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติของชิ้นงานก็คือการที่ชิ้นงานมีรูปทรงซับซ้อน หรือมีเงื่อนไขของความอิสระมาก (Free From Shape)

จนไม่สามารถวัดมิติบนชิ้นงานต้นแบบในตำแหน่งที่ต้องการด้วยวิธีปกติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบทั่วไปได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่จะพบในธรรมชาติ เช่นอวัยวะเทียมของมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตเช่น เท้า ฟัน กระโหลก ตลอดจนสิ่งปฏิกูลที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ เช่นรูปปั้น รูปแกะสลัก เป็นต้น

ปัจจุบันการแก้ปัญหาดังกล่าว อาจทำได้ด้วยการนำสแกนเนอร์ 3 มิติ และกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย เพื่อสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติของชิ้นงานต้นแบบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้อีกด้วย เช่นการผลิตเท้าเทียม เป็นต้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงความแข็งแรงขององค์พระที่จะดำเนินการจัดสร้างจริงที่ จ.กาญจนบุรี โดยขั้นต้นได้ใช้ศาสตร์ของวิศวกรรมย้อนรอยในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และได้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ความเค้นอันเนื่องมาจากแรงลมปะทะ ซึ่งทำให้พบว่าค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดที่ข้อพระบาทขององค์พระ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดอันเนื่องมาจากพายุโซนร้อนพัดเข้าปะทะองค์พระจะพบว่าค่าความเค้นสูงสุดนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าของ Ultimate stress มาก หรือกล่าวได้ว่าถ้าพิจารณาเฉพาะแรงลมที่เข้ามาปะทะนั้นยังไม่สามารถทำให้ความเสียหายให้กับองค์พระได้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาแต่เฉพาะความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงลมเข้าปะทะกับองค์พระเท่านั้น แต่ในการก่อสร้างจริงจะต้องพิจารณาผลของปัจจัยอื่นๆเข้ารวมด้วยเพื่อความแข็งแรงและความปลอดภัย อาทิเช่นแรงเนื่องจากน้ำหนัก และปัจจัยของแรงอื่นๆ ซึ่งในการก่อสร้างจริงนั้นต้องนำมาพิจารณาด้วย

สิ่งที่สำคัญในงานวิจัยนี้ก็คือการนำเอาวิศวกรรมย้อนรอยมาใช้มาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยขนาดและรูปแบบขององค์พระพุทธรูปที่จะก่อสร้างจริงนั้นจะต้องอาศัยรายละเอียดและรูปร่างลักษณะที่ได้มาจากการขุดพบทางวิศวกรรมย้อนรอยอย่างครบถ้วนเพื่อให้การสร้างนั้นได้้องค์พระที่สวยงามและได้สัดส่วนที่ถูกต้องตามองค์พระพุทธรูปต้นแบบ

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอยนั้นสามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้ได้รูปร่างและมิติที่ถูกต้องเหมือนต้นแบบ 100% และยังเอาแบบจำลองที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ ทดสอบ สร้าง ทั้งในแง่ของความแข็งแรง ขนาด น้ำหนัก และอื่นๆ ในอีกหลายๆด้าน เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการสร้างชิ้นงานต้นแบบได้ค่อนข้างจะได้รายละเอียดและยังสามารถเอาข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการช่วยในการศึกษาวิเคราะห์ในด้านอื่นๆ อีกด้วย เช่นการทดลองการความเสียหาย การวิเคราะห์ถ่ายเทความร้อน วิเคราะห์การไหลของพลศาสตร์ การสร้างชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบในอุโมงค์ลม หรืออุโมงค์น้ำเพื่อทำการศึกษาผลกระทบอื่นๆ ที่เป็นปัจจัยต่อรูปทรงต่อการไหลผ่านของของไหล

ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จากชิ้นงานต้นแบบที่มีความซับซ้อนสูง

ปัญหาผู้ที่ออกแบบ มักจะพบข้อบกพร่องในกระบวนการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติของชิ้นงานก็คือการที่ชิ้นงานมีรูปทรงซับซ้อน หรือมีเงื่อนไขของความอิสระมาก (Free From Shape) จนไม่สามารถวัดมิติบนชิ้นงานต้นแบบในตำแหน่งที่ต้องการด้วยวิธีปกติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบทั่วไปได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่จะพบในธรรมชาติ เช่นอวัยวะเทียมของมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตเช่น เท้า ฟัน กระโหลก ตลอดจนสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการสร้างสรรค์ เช่นรูปปั้น รูปแกะสลัก เป็นต้น

ปัจจุบันการแก้ปัญหาดังกล่าว อาจทำได้ด้วยการนำสแกนเนอร์ 3 มิติ และกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย เพื่อสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 3 มิติของชิ้นงานต้นแบบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้อีกด้วย เช่นการผลิตเท้าเทียม เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อสอดคล้องกับงานวิจัยเราสามารถนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ควบคู่กับการทำงานอื่น อย่างเช่นการนำเทคโนโลยีช่วยในการจัดสร้าง พุทธประติมากรรม แต่เดิมในการสร้างประติมากรรมประเภทนี้จะใช้วิธีการตัดองค์ต้นแบบเพื่อนำมาคอกเส้นรอบองค์ เพื่อนำเส้นที่ได้มาขยายให้เท่ากับขนาดที่จะจัดสร้างจริง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต้องทำลายองค์ต้นแบบ และไม่สามารถจำลองชิ้นงานต้นแบบได้ หรือปรับแต่งตามต้องการได้ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่าย และไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในส่วนอื่นๆได้อีกด้วย ในงานวิจัยชิ้นนี้หวังไว้เป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถเป็นแนวทางในการนำเทคโนโลยีประยุกต์ใช้ควบคู่กับภูมิปัญญาของคนไทย เพื่อให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน และสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สิ่งปลูกสร้างอื่นๆก่อนทำการสร้างจริงเพื่อยืนยันและสร้างความมั่นใจในการก่อสร้าง และตั้งสมมุติฐานในบริเวณจุดที่พึงระวัง เพื่อหาแนวทางในการป้องกันต่อไปในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง. 2547. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสแกน 3 มิติในกระบวนการทางวิศวกรรม
ย้อนรอยและการตรวจสอบมิติ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

ณรงค์ พิทักษ์ทรัพย์สิน,ประสิทธิ์ วัฒนวงศ์สกุล. 2550. วิศวกรรมย้อนรอยกับการสร้างแบบจำลอง
ผลิตภัณฑ์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

เดช พุทธเจริญทอง. 2546. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ศูนย์สื่อกรุงเทพ

ศุภสิทธิ์ รอดข้าวญ. 2549. การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้งานของเครื่องเก็บค่าพิกัดสามมิติระบบ
เลเซอร์และระบบอปติกที่ใช้สำหรับงานวิศวกรรมย้อนรอย,ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทาง
แม่พิมพ์ยาง สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน. 2537. การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในกระดุกหัวเข่า
เปรียบเทียบระหว่างในขณะยืนตรงและนั่งยอง.วิทยานิพนธ์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ

ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน. 2539. การประยุกต์ใช้เครื่องเลเซอร์สแกน 3 มิติ ช่วยออกแบบและสร้างชิ้นงานที่
มีรูปทรงซับซ้อน.วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Giovanna Sansoni, Franco Docchio. 2004. **Three-dimensional optical measurements and
reverse engineering for automotive applications**, Robotics and computer-Integrated
Manufacturing 20 , pp. 359-367.

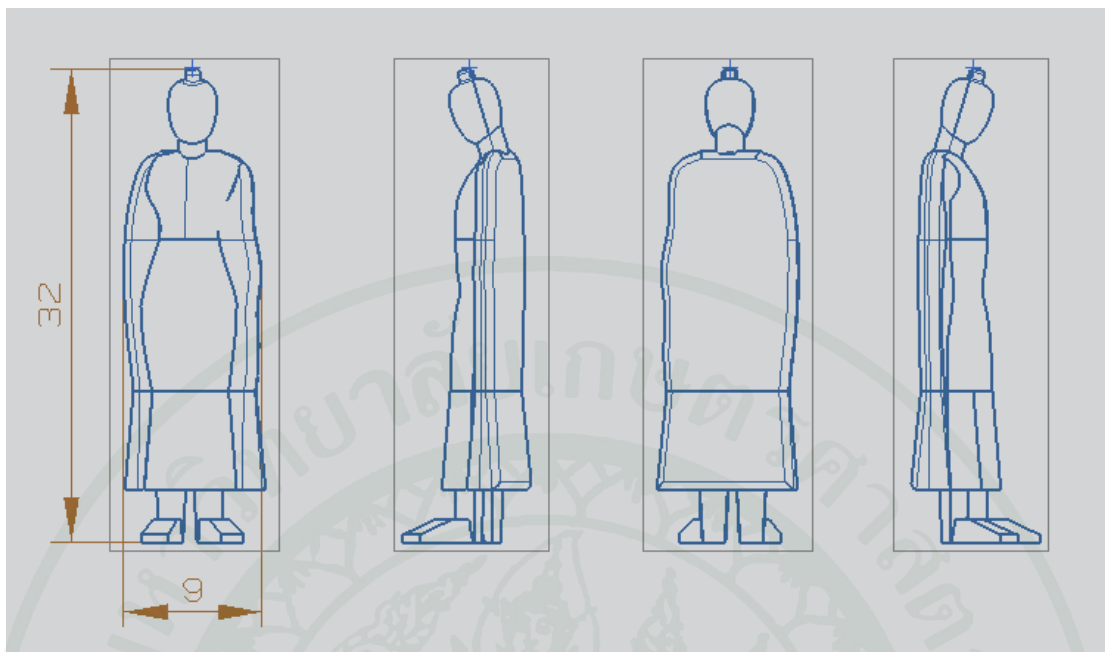
Kwan H. Lee, H. Woo. 2000. **Direct integration of reverse engineering and rapid prototype**,
Computer & Industrial Engineering 38 , pp. 21-38.

L.Li, N. Schemenauer, X. Peng, X.Peng, P.Gu. 2002. **A reverse engineering system for Rapid Manufacturing of complex objects**, Robotics and computer-Integrated Manufacturing 18, pp. 53-67.

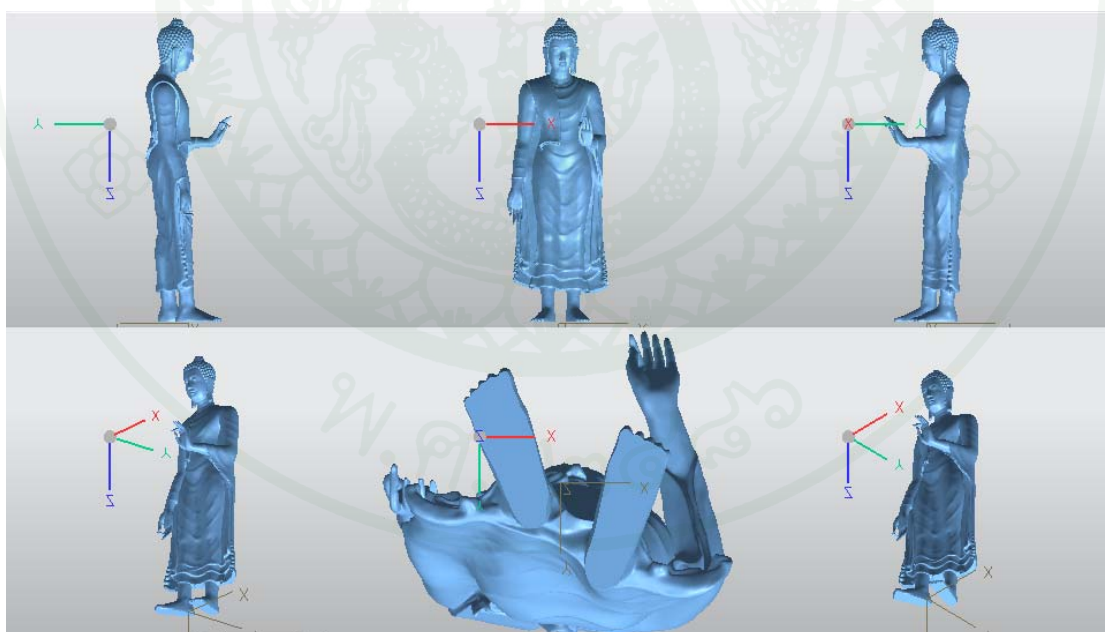
A.J. McEvily. 2005. **Reverse Engineering gone wrong: A case study**, Engineering Failure Analysis 12, pp. 834-838.

Kwan H. Lee, Hyun-Pung Park. 2000. **Automated inspection planning of free-form shape parts by laser Scanning**, Robotics and computer-Integrated Manufacturing 16, pp. 201-210.

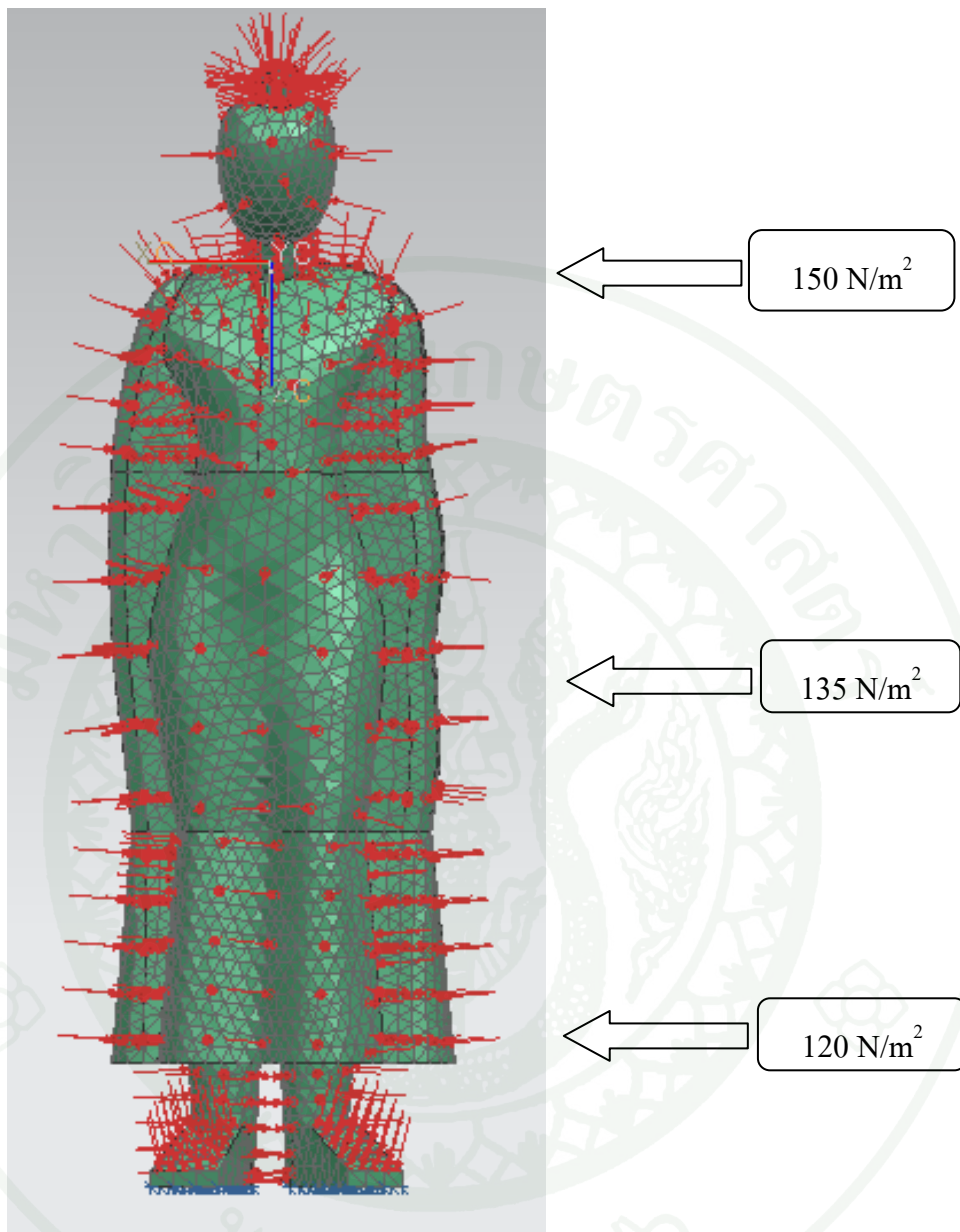




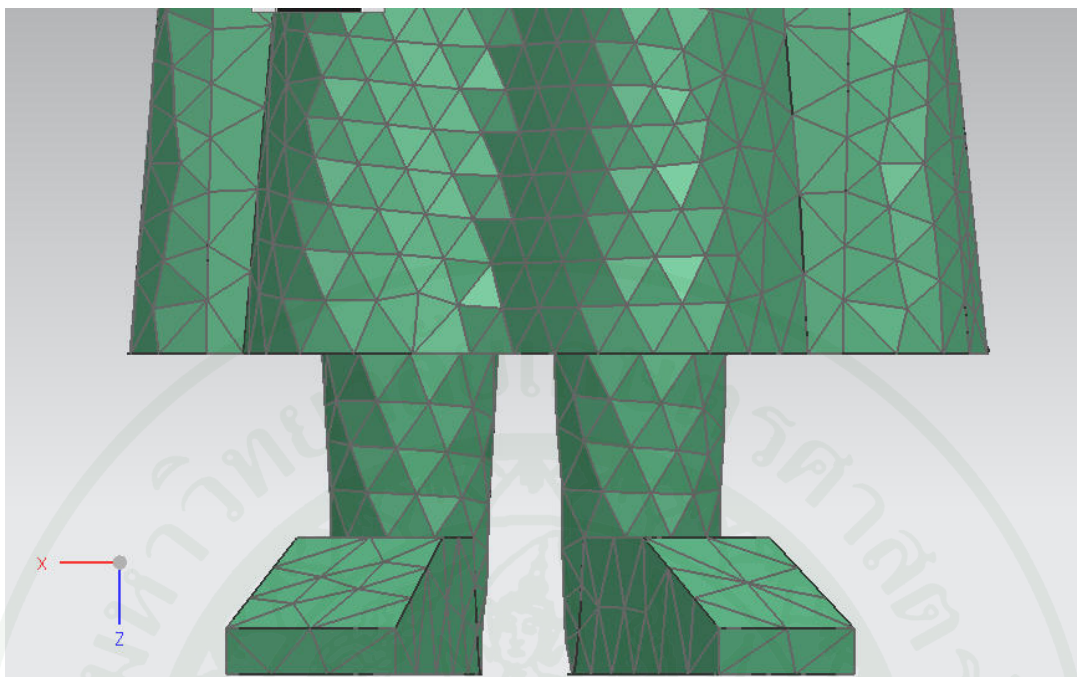
ภาพผนวกที่ 1 ขนาดขององค์จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



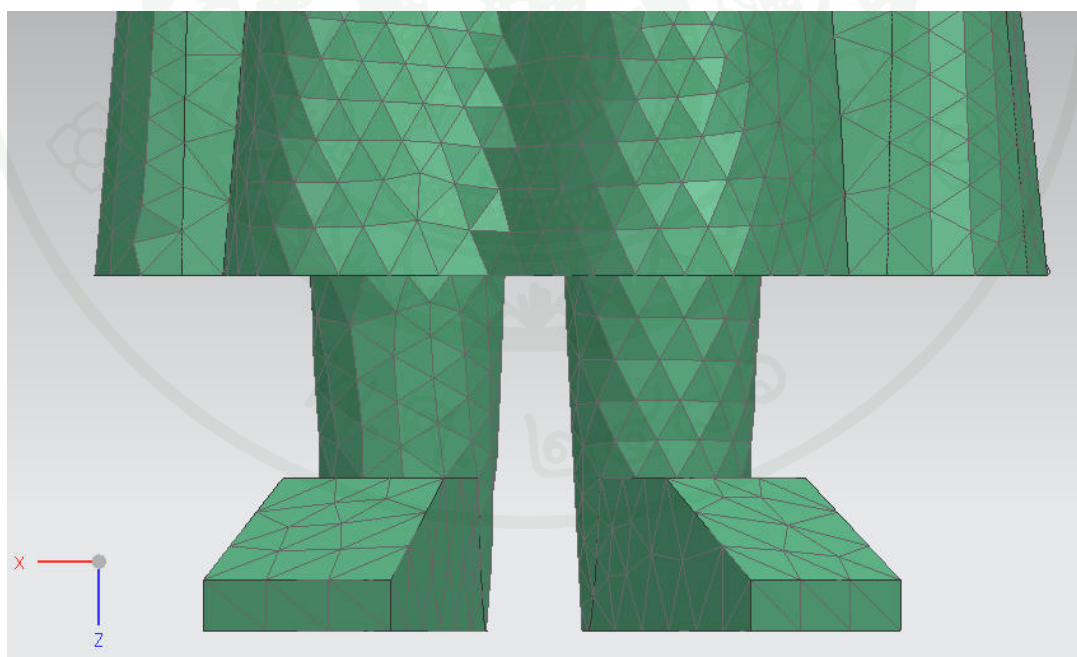
ภาพผนวกที่ 2 รายละเอียดในแต่ละมุมมอง



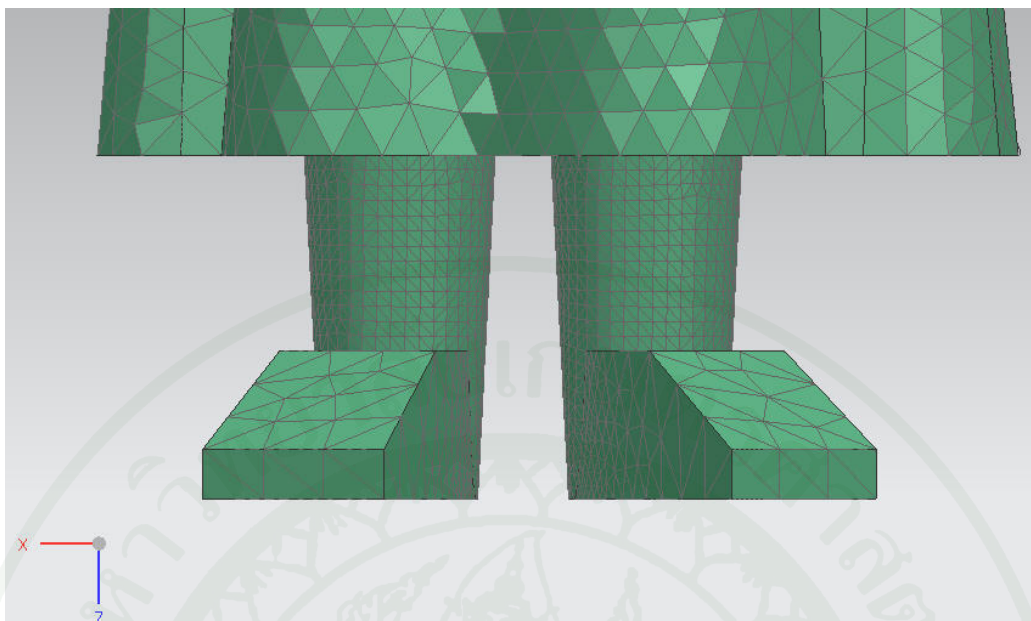
ภาพผนวกที่ 3 รายละเอียดแรงที่ใส่ในแต่ละชั้น



ภาพผนวกที่ 4 รายละเอียดอีลิเมนต์ขนาด 1000 mm.



ภาพผนวกที่ 5 รายละเอียดอีลิเมนต์ขนาด 750 mm.



ภาพผนวกที่ 6 รายละเอียดเอลิเมนต์ขนาดโดยเฉลี่ยทั้งองค์พระขนาด 750 mm.
และบริเวณที่สนใจขนาดเท่า 150 mm.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายวีรพงษ์ นิจโรจน์กุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 ธันวาคม 2524
สถานที่เกิด	กำแพงเพชร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	Application Engineer
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท Engineering Computer Service
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-