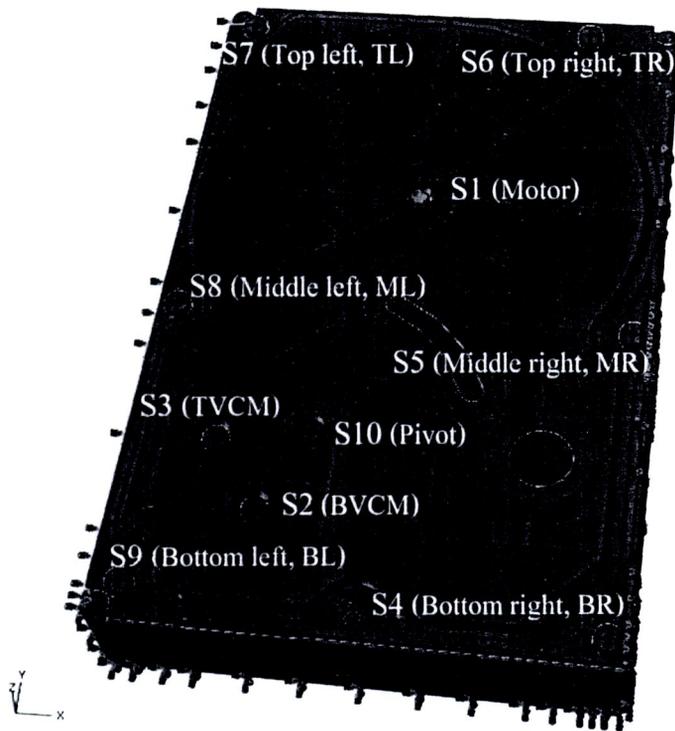


บทที่ 4 การวิเคราะห์กระบวนการชั้นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน

บทนี้จะเป็นการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง Hard Disk Assembly ภายใต้อะไรที่กระทำและค่าเงื่อนไขขอบเขตในกระบวนการชั้นและลำดับการชั้นสกรูตามกระบวนการชั้นจริง โดยแบบจำลองที่ใช้และตำแหน่งของสกรู(S1-S10) เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในการวิเคราะห์จะประกอบด้วยการขั้นตอนการประมวลผล (Analysis step) ทั้งหมด 19 ชั้น โดย 17 ชั้นตอนแรก เป็นการชั้นสกรู ตามลำดับที่ใช้ในปัจจุบัน โดยกำหนดให้เป็นการวิเคราะห์แบบ Static/General และ 2 ชั้นตอนการประมวลผลสุดท้ายเป็นการเพิ่มและลดอุณหภูมิให้กับแบบจำลองตามลำดับ จะใช้การวิเคราะห์แบบ Coupled temperature-displacement

4.1 สมบัติวัสดุ

ในกระบวนการประกอบฝาปิด เข้ากับฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นจะทำการชั้นสกรู 10 ตัวในแต่ละตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ ด้วยแรงบิดที่แตกต่างกันออกไป โดยใช้ทั้ง Electric driver, Manual driver



และ Automatic machine ในการขึ้นสกรู ซึ่งมีสกรู 6 ตัวที่ขึ้นลงบนฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 2 ตัวขึ้นลงบน Voice coil motor (VCM) และขึ้นลงบน Spindle motor กับ Pivot อย่างละ 1 ตัว โดยแต่ละส่วนประกอบทำจากวัสดุที่ต่างชนิดกันดังนี้

4.1.1 ฐาน

วัสดุที่ใช้ผลิต : Aluminum alloy เบอร์ ADC12 (Aluminum Die Casting)

Tensile strength, Yield	165 MPa
Density	2.7g/cm^3
Modulus of elasticity	69.16 GPa
Thermal conductivity	91 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	$20.8 \times 10^{-6} /\text{K}$ at 100 °C
Poisson's ratio	0.33

4.1.2 ฝาปิด

วัสดุที่ใช้ผลิต : Stainless steel เบอร์ 304

Tensile strength, Yield	215 MPa
Density	8g/cm^3
Modulus of elasticity	193 GPa
Thermal conductivity	16.2 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	$17.2 \times 10^{-6} /\text{K}$ at 100 °C
Poisson's ratio	0.3

4.1.3 Rubber seal

วัสดุที่ใช้ผลิต : UV Acrylate rubber

Density	1.5g/cm^3
Modulus of elasticity	2.14 GPa
Thermal conductivity	2 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	$35 \times 10^{-6} /\text{K}$ at 100 °C
Poisson's ratio	0.44

4.1.4 Screw

วัสดุที่ใช้ผลิต : SUS XM 7

Density	8 g/cm ³
Modulus of elasticity	193 Gpa
Thermal conductivity	16.3 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	17.2×10 ⁻⁶ /K at 100 °C
Poisson's ratio	0.3

4.1.5 Pivot

วัสดุที่ใช้ผลิต : Shaft / Sleeve ใช้ Stainless steel เบอร์ 303

Tensile strength	215 MPa
Density	8.027 g/cm ³
Modulus of elasticity	193 GPa
Thermal conductivity	16.3 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	17.3×10 ⁻⁶ /K at 100 °C
Poisson's ratio	0.3

4.1.6 Spindle motor

วัสดุที่ใช้ผลิต : Shaft/Sleeve/Back cap/Base ใช้ Stainless steel เบอร์ 303

Tensile strength	215 MPa
Density	8.027 g/cm ³
Modulus of elasticity	193 GPa
Thermal conductivity	16.3 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	17.3×10 ⁻⁶ /K at 100 °C
Poisson's ratio	0.3

4.1.7 Voice Coil Motor (VCM)

วัสดุที่ใช้ผลิต : Steel ใช้ Stainless steel เบอร์ 06-060 เคลือบด้วย Nickel plate

Magnet ใช้ Neodemium (Nd), Iron (Fe), Boron (B), Nickel (Ni)

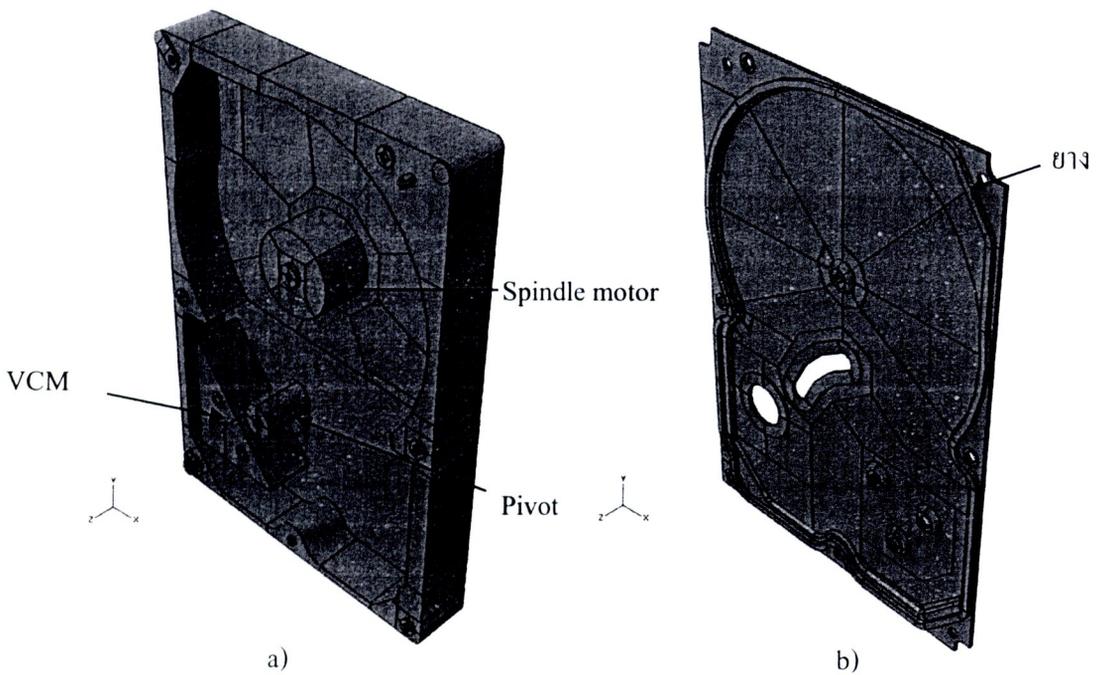
Tensile strength	215 MPa
Density	8.027 g/cm ³

Modulus of elasticity	193 GPa
Thermal conductivity	16.3 W/m.K at 100 °C
Thermal expansion	$17.3 \times 10^{-6} /K$ at 100 °C
Poisson's ratio	0.3

สมบัติของวัสดุในช่วง Plastic deformation ของ Stainless steel ที่ใช้ทำฝาปิด ค่า Yield ของวัสดุจะคิดตามสมการ 2.2 โดยมีค่า $K=380, n=0.32$

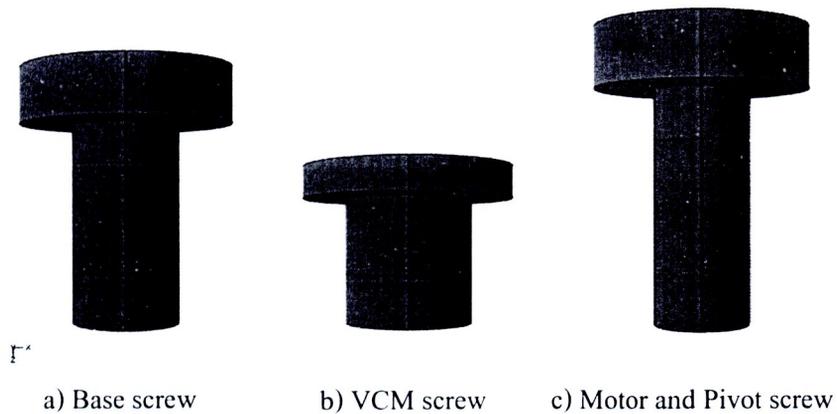
4.2 แบบจำลองชิ้นงานจริง

แบบจำลองนี้ได้สร้างขึ้นให้มีความใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงของ Hard disk assembly ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยตัดทอนบางส่วนของแบบจำลองที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นสกรูออกไป เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 Hard disk assembly ประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนฐาน (Base casting) และส่วนฝาปิด ส่วนฐานเป็นส่วนที่ห่อหุ้มตัว Hard disk drive เอาไว้ โดยส่วนประกอบหลักภายในฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นสกรู และรวมอยู่ในแบบจำลองด้วย ได้แก่ Spindle motor, Voice coil motor (VCM) และ Pivot ในส่วนของแบบจำลองฝาปิด นั้นจะมีชิ้นส่วนของยางที่ใช้สำหรับปิดช่องว่างระหว่างฐาน กับฝาปิด ติดอยู่ด้วย



รูปที่ 4.2 แบบจำลองชิ้นงานจริง a) ฐาน b) ฝาปิด

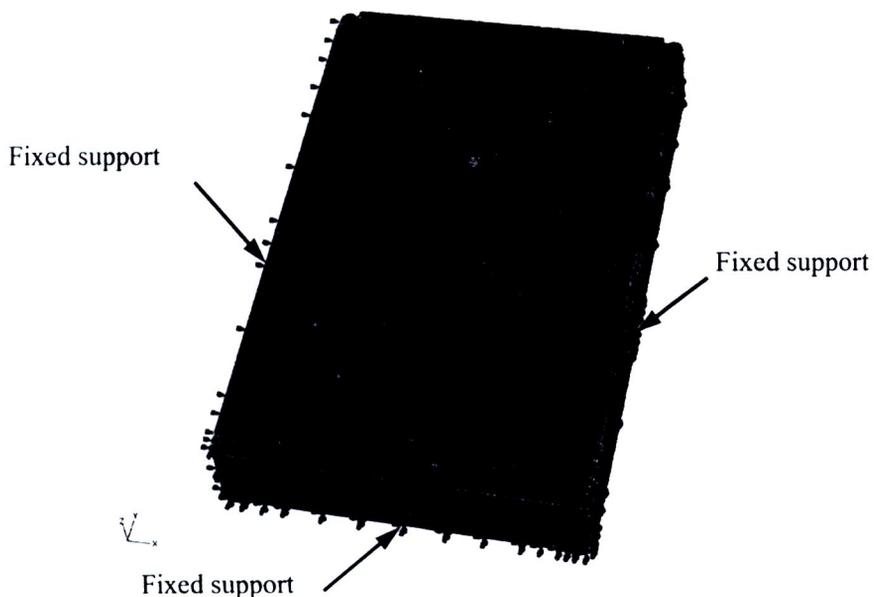
สกรูที่ใช้ในการประกอบฝาปิด เข้ากับฐานนั้น มี 3 ประเภท ได้แก่ 1) สกรูที่ใช้ขันระหว่างฝาปิด กับ ฐาน ในที่นี้จะเรียกว่า Base screw ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm (รูป 4.3a) 2) สกรูที่ใช้ขันระหว่าง ฝาปิด กับ VCM หรือ VCM screw ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm (รูป 4.3b) และ 3) สกรูที่ใช้ขัน ระหว่างฝาปิด กับ Motor ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ขันระหว่างฝาปิด กับ Pivot จึงเรียกสกรูชนิดนี้ ว่า Motor and Pivot screw มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm (รูป 4.3c)



รูปที่ 4.3 แบบจำลองสกรูที่ใช้ในกระบวนการขันฝาปิด

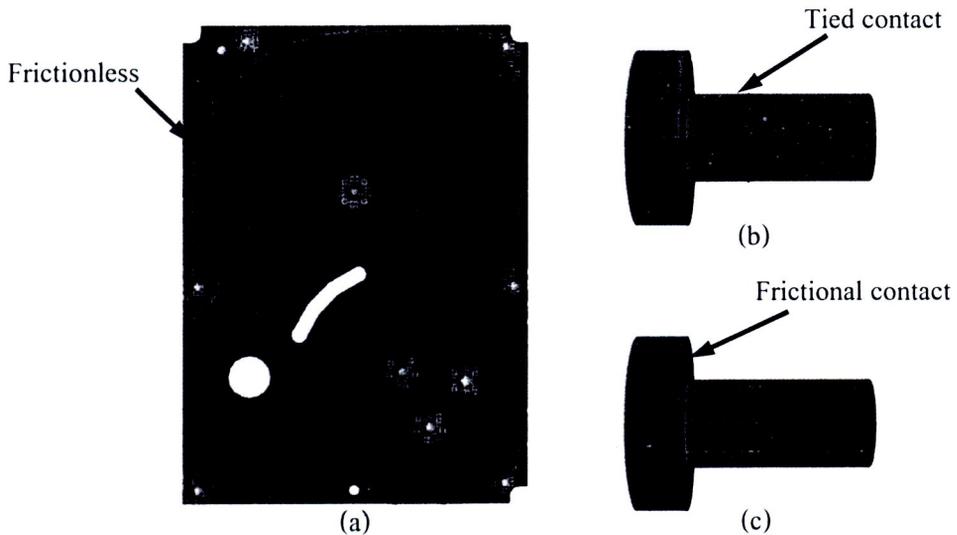
4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

ในกระบวนการขันสกรู ชิ้นงานถูกวางไว้บนเครื่องขันสกรูอัตโนมัติ และถูกจับยึดไว้ทั้งสองด้าน ดังนั้นค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้กับแบบจำลองในกระบวนการวิเคราะห์คือ จะทำการ Fixed พื้นผิวด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวาของแบบจำลอง ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

การตั้งค่าผิวสัมผัสระหว่าง ตัวฐาน กับ ขางที่ยึดติดกับฝาปิด จะใช้การตั้งค่าผิวสัมผัสแบบ frictionless ดังแสดงในรูปที่ 4.5(a) ส่วนผิวสัมผัสบริเวณสลักเกลียวของสกรูกับรูของตัวฐานดังแสดงในรูปที่ 4.5(b) ใช้การตั้งค่าเป็นแบบ Tied contact จากผลการศึกษาเบื้องต้นตามหัวข้อ 3.1.1.1 และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวใต้หัวของสกรู (Screw head) กับฝาปิด ดังรูปที่ 4.5(c) ตั้งค่าผิวสัมผัสแบบ frictional contact มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.15

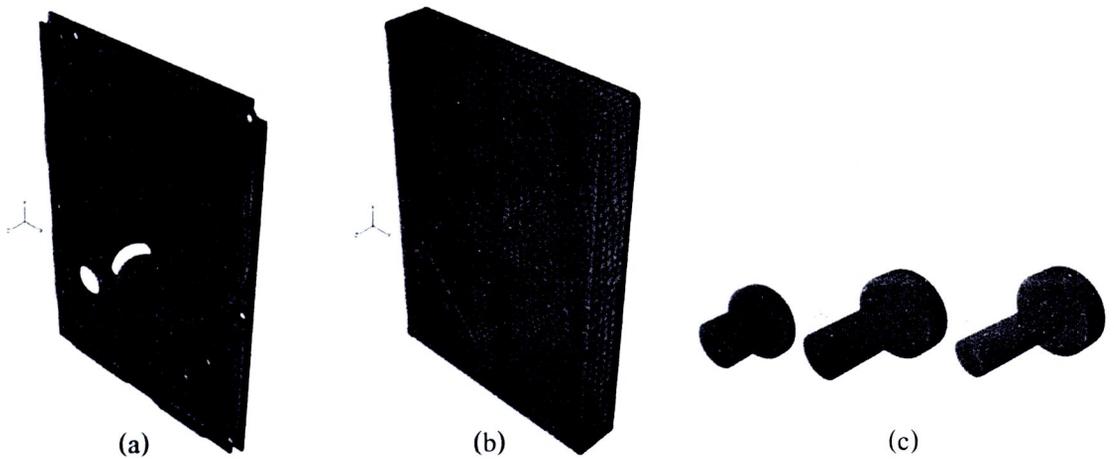


รูปที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตของผิวสัมผัส a) ตัวฐาน กับ ขาง b) สลักเกลียว กับ ตัวฐาน
c) หัวสกรู กับ ฝาปิด

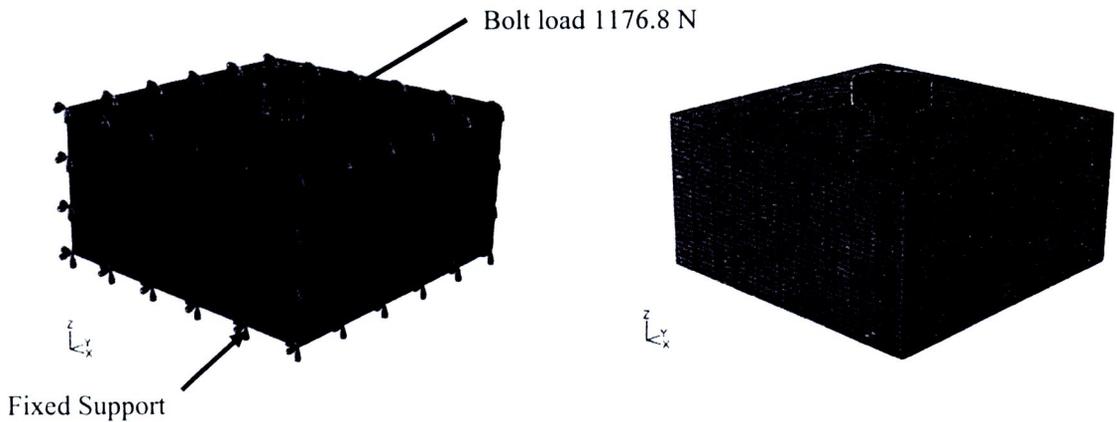
4.4 การแบ่งเอลิเมนต์ (Meshing)

การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองใช้เอลิเมนต์แบบ Coupled Temperature-Displacement ซึ่งมี 8 nodes และ 4 degrees of freedom ในทุกแบบจำลอง รูปร่างของเอลิเมนต์ เป็นการผสมระหว่าง เอลิเมนต์ชนิด hexahedral และ tetrahedral เพื่อให้การแบ่งเอลิเมนต์มีคุณภาพ จึงทำการแบ่งส่วนของแบบจำลอง ออกเป็นหลาย ๆ ส่วนย่อย (Partition) และเนื่องจากในการวิเคราะห์นี้ ความสนใจหลักอยู่ที่ การเปลี่ยนแปลงของ Torque ของสกรู จึงแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนของสกรู และส่วนบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของสกรูให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.6

โดยมีการทำ Mesh convergence เพื่อหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลในส่วนของสกรู เนื่องจากเป็นส่วนความสนใจหลัก แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.7 ค่า Bolt load ที่ให้กับสกรูมีค่าเท่ากับ 1176.8 N โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กรณีตามขนาดของเอลิเมนต์ (Seed edge by size) คือ 0.5, 0.25, 0.1875, 0.125



รูปที่ 4.6 การแบ่งเอลิเมนต์ a) ฝาปิด b) Base c) Screws



รูปที่ 4.7 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา Mesh convergence

ผลจากการศึกษาพบว่า ที่เอลิเมนต์ขนาด 0.25 จะให้ค่า Bolt load ใกล้เคียงค่า Bolt load ที่ให้ไปในขั้นต้นมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์จะใช้เอลิเมนต์ขนาด 0.25

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษา Mesh convergence

Seed edge by size	Total Force
0.5000	1184.4355
0.2500	1174.0323
0.1875	1185.2247
0.1250	1172.4540

4.5 ภาวะโหลดที่กระทำ และลำดับการขัน

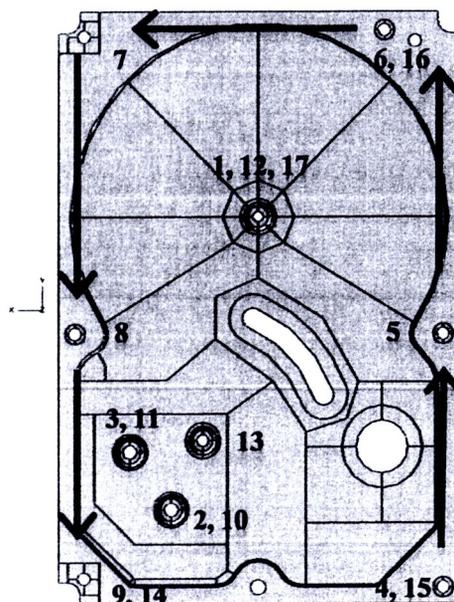
ในขั้นตอนการขันสกรู เพื่อยึดฝาปิด เข้ากับตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สกรูจะถูกขันด้วยค่าแรงบิดเริ่มต้นค่าหนึ่ง เพื่อตรึงตำแหน่งของฝาปิด เข้ากับตัวฐาน จากนั้นสกรูจะถูกขันแน่นอีกครั้งด้วยค่าแรงบิดที่ต้องการ ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โหลดที่ให้กับสกรูมีลักษณะเป็น Bolt load ซึ่งสามารถเปลี่ยนจากค่าแรงบิดที่ให้กับสกรูให้อยู่ในรูปของแรง (Pre-load) ได้ จากนั้นทำการแบ่งแบบจำลองสกรูออกเป็นสองส่วนตามแนวยาวของสกรู เพื่อเลือกผิวภายในของสกรูเพื่อที่จะใส่ค่า Pre-load ที่กระทำต่อสกรูดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งค่า Bolt load สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5a) และค่า Torque coefficient ในสมการ (2.6) สามารถคำนวณได้จากค่าตัวแปรของสกรู



รูปที่ 4.8 Bolt load ที่กระทำกับสกรู

4.6 การวิเคราะห์ผลจากการขันสกรูตามลำดับการขันจริง

การวิเคราะห์ในกรณีนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลอง และค่า Bolt load ที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่ใกล้เคียงกระบวนการขันตามลำดับการขันสกรูจริง และเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีการขันสกรูพร้อมกันในครั้งเดียว ภายใต้โหลด และเงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน ซึ่งลำดับการขัน และการขันย้ำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ลำดับการขันสกรูตามกระบวนการขันจริง

ในลำดับแรกจะทำการขันบริเวณด้านในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อตรึงฝาปิด กับตัวฐานที่ตำแหน่งมอเตอร์และ VCM (1-3) ให้อยู่ติดกัน จากนั้นจะเริ่มขันจากมุมด้านล่างขวาของฝาปิด (4) แล้วขันสกรูตำแหน่งกลางด้านขวาของฝาปิด (5) จากนั้นจึงขันสกรูลำดับถัดมาในลักษณะแบบทวนเข็มนาฬิกา(6-9) ต่อจากนั้นเริ่มการขันย้ำในลำดับที่ 10-12 แล้วจึงขันสกรูในตำแหน่งที่ยึดฝาปิด กับ Pivot แล้วจึงทำการขันสกรูลำดับที่ 14-15 ย้ำด้วยค่าแรงบิดเท่าเดิม และขันย้ำโดยเพิ่มค่าแรงบิดมากขึ้นในลำดับการขันที่ 16-17 ในกระบวนการประกอบฝาปิด เข้ากับตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะทำการขันสกรูในชั้นต้นสกรู S1-S10 จะถูกขันด้วยแรงบิด 6 kgf.cm จากนั้นในลำดับที่ 10-12 และ 14-15 จะทำการขันซ้ำด้วยค่าแรงบิดเท่าเดิม และทำการขันสกรู S1 และ S6 ด้วยแรงบิด 8 kgf.cm ในลำดับการขันที่ 16, 17 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่า Torque coefficient และค่าแรงบิดที่กระทำต่อสกรูที่ใช้ในการคำนวณหา Bolt load ในการวิเคราะห์นั้นแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่า Torque Coefficient

Screws/Parameters	d (mm)	p_i (mm)	d_m (mm)	α (degree)	λ	Torque coefficient, K
Pivot and Motor screw	2.0	0.40	1.7835	30	4.080	0.2015
Base screw	2.5	0.45	2.2565	30	3.632	0.1974
VCM screw	3.0	0.50	2.7295	30	3.337	0.1980

ตารางที่ 4.3 ค่า Bolt load ที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์

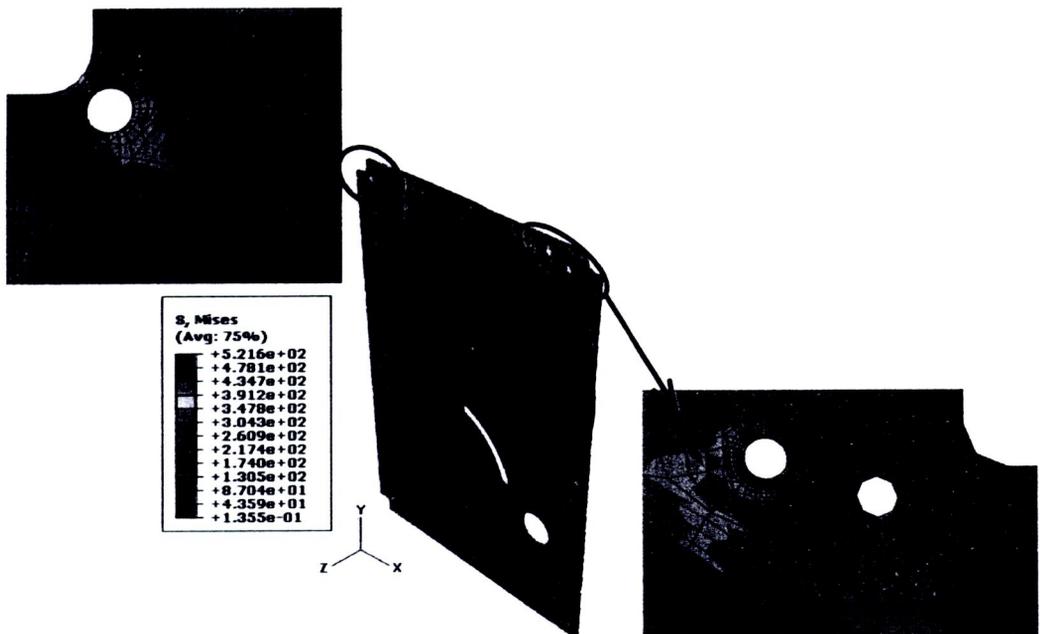
Screw number	Diameter (mm)	Applied torque (kgf.cm)	Bolt load (N)
S1	2	6	1460
		8	1947
S2, S3	3	6	991
S4-S9	2.5	6	1193
S6	2.5	6	1193
		8	1590
S10	2	6	1460

4.7 ผลการวิเคราะห์

ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองที่ขันสกรูทุกตัวพร้อมกันพบว่า ค่าแรงกดของสกรูบริเวณหัวสกรูที่สัมผัสกับฝาปิด ของสกรูทุกตัวมีค่าเท่ากับค่า Bolt load ที่ใส่เข้าไปในขั้นตอน นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่า Bolt load ที่ให้เข้าไปไม่ได้ลดลง และแรงยึดติดระหว่างสกรูกับฝาปิด ยังมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดตามที่ต้องการ แสดงว่า ไม่เกิดการคลายตัวของสกรู

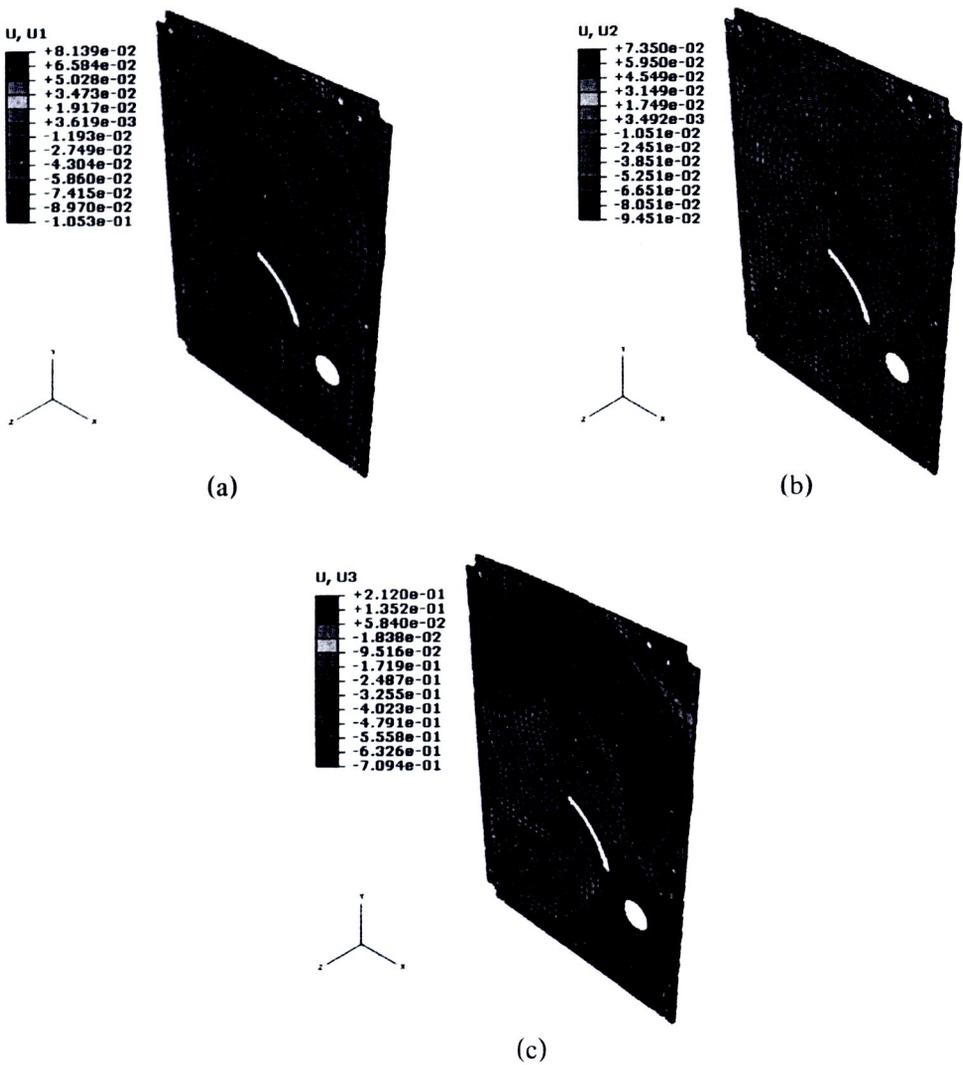
เมื่อศึกษากระบวนการขันจริง ตามลำดับสกรูดังที่ได้กล่าวมาพบว่า การกระจายตัวของความเค้นของฝาปิด เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยความเค้นจะมีค่าสูงบริเวณที่มีการขันสกรู โดยเฉพาะที่มุมทั้ง 4 ของฝาปิด ความเค้นจะมีค่ามากกว่าบริเวณที่ขันสกรูบริเวณอื่นๆ และค่าความเค้นสูงสุดพบที่บริเวณของขอบด้านในของรูสกรู บริเวณด้านมุมบนด้านซ้ายของฝาปิด มีค่าความเค้นสูงสุดโดยมีค่าประมาณ 521 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่า Yield strength ของวัสดุที่ใช้ทำฝาปิด เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอยู่ในช่วง Plastic deformation

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฝาปิด ของทั้งสองแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.11 และยังพบว่า จะเกิด Displacement ในแนวแกน -Z ในบริเวณที่มีการขันสกรูทุกตัว แต่ขนาดของ Displacement ที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งนั้นมีขนาดแตกต่างกันไป บริเวณส่วนกลางของฮาร์ดดิสก์ใคร่จะมีขนาด Displacement ที่เล็กกว่า บริเวณขอบ หรือริมของฮาร์ดดิสก์ใคร่ที่มีการขันสกรู เนื่องจากบริเวณกลางของฮาร์ดดิสก์ใคร่จะมีชิ้นส่วนของ Spindle motor, VCM และ Pivot หนุนอยู่ใต้บริเวณที่มีการขันสกรู และบริเวณที่มีขนาดของ Displacement มากที่สุดคือ บริเวณมุมด้านขวาของฝาปิด หรือ บริเวณสกรู S6 นั่นเอง

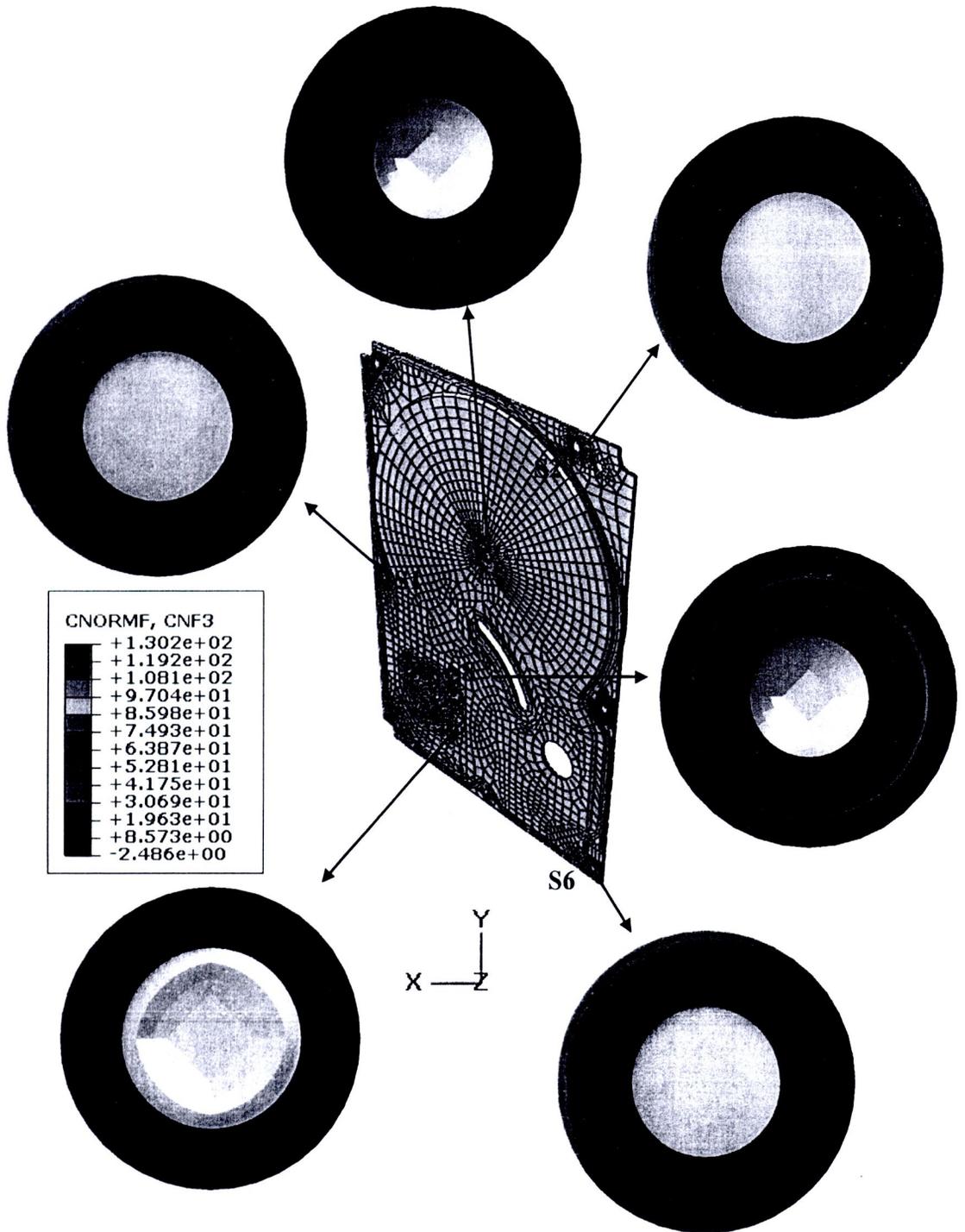


รูปที่ 4.10 การกระจายของความเค้นของฝาปิด ในแบบจำลองการขันสกรูตามลำดับการขันจริง

การเปลี่ยนแปลงของ Screw torque สามารถวิเคราะห์ได้จากการเปรียบเทียบ Bolt load ที่ใส่ให้กับ สกรูกับผลรวมของแรงกดของสกรู (Contact normal force) ที่บริเวณผิวสัมผัสของหัวสกรูกับฝาปิด การกระจายตัวของค่าแรงกดของสกรูของสกรู S1 ถึง S10 เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากผลการ วิเคราะห์สังเกตได้ว่า สกรู S1-S3 และ S10 ซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางของ Hard disk assembly มีการ กระจายตัวแรงกดของสกรู บริเวณผิวด้านใต้หัวสกรูอย่างสม่ำเสมอ และบริเวณใกล้สลักเกลียวจะมี ค่าแรงกดของสกรูมากที่สุด และลดลงเมื่อระยะห่างจากสลักเกลียวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าแรงกดของสกรู ของสกรู S4-S9 จะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ มีค่าสูงสุดบริเวณขอบของสกรูด้านที่มียางหนุนอยู่ และมีค่าต่ำหรือเป็นศูนย์ที่ผิวสัมผัสด้านอยู่ห่างออกจากขารองรับฝาปิด เนื่องจากบริเวณด้านที่อยู่ติด กับยางจะเป็นด้านที่ได้รับแรงกดจากการขันสกรูได้เพียงด้านเดียว



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฝาปิด ของแบบจำลองการขันสกรูตามลำดับการขันจริง
a) แนวแกน X b) แนวแกน Y c) แนวแกน Z

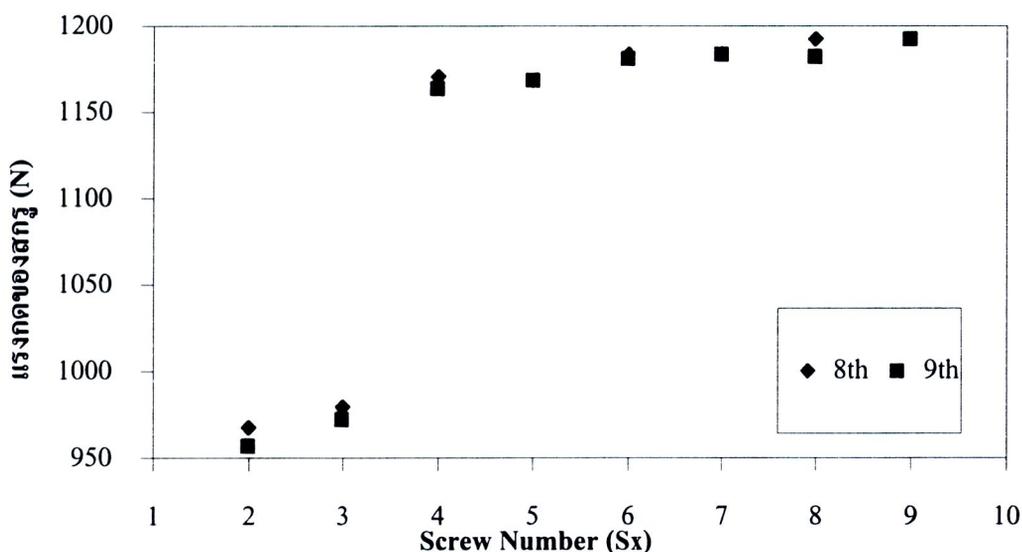


รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการกระจายตัวค่าแรงกดของสกรูบริเวณหัวสกรู

ค่าแรงกดของสกรูของสกรูแต่ละตัวในแต่ละลำดับการขัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยลำดับการขันสกรูทั้ง 17 ลำดับแสดงไว้ด้านบนสุดของตาราง ส่วนทางด้านซ้ายมือสุดแสดง ชื่อ สกรูแต่ละตัวที่ใช้ขันฝาปิด เข้ากับตัวฐานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ แถบสีฟ้าในตารางแสดงถึงลำดับการขันของสกรูตัวนั้นๆ ส่วนแถบสีเทาหมายถึง สกรูยังไม่ได้ถูกขัน เนื่องจากในการวิเคราะห์นั้นได้ทำการประกอบให้ผิวสกรูติดกับผิวของฝาปิด ตั้งแต่ต้น การกระดกตัวของฝาปิด จึงทำให้เกิดค่าแรงกดของสกรูเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของสกรู และฝาปิด ของสกรูที่ยังไม่ได้ถูกขัน แต่จะสังเกตได้ว่า ค่าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า Bolt load ที่ให้ไป ซึ่งส่งผลต่อการวิเคราะห์น้อยมาก สำหรับค่าที่เป็นศูนย์นั้น แสดงว่า สกรูยังไม่ถูกขัน และบริเวณนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฝาปิด

การคลายตัวของสกรูพิจารณาจาก การลดลงของผลรวมของค่าแรงกดของสกรูของทุกโหนด (CNF3) บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง หัวสกรู กับฝาปิด เนื่องจากแรงในการจับยึดลดน้อยลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแบบจำลองการขันสกรูตามลำดับการขันจริง สำหรับแบบจำลองการขันสกรูโดยที่สกรูทุกตัวถูกขันพร้อมกัน ค่าแรงกดของสกรูจะมีค่าเท่ากับค่า Bolt load ที่ให้ไปในข้างต้น

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของผลรวมของแรงกดของสกรูแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงกดของสกรูในขั้นตอนที่ 8 ซึ่งเป็นการขันสกรู S8 และขั้นตอนที่ 9 ซึ่งเป็นการขันสกรู S9 พบว่าหลังจากการขันสกรู S9 ค่าแรงกดของสกรูของสกรูที่อยู่ใกล้กับสกรู S9 ได้แก่ สกรู S2, S3, S4 และ S8 มีการเปลี่ยนแปลง โดยแรงที่เกิดขึ้นที่บริเวณหัวสกรู S2, S3, S4 และ S8 มีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการกระดกตัวของฝาปิด ที่บริเวณดังกล่าว ตารางที่ 4.5 แสดง Displacement ของบริเวณสกรู S2, S3, S4 และ S8 ก่อนและหลังการขันในขั้นตอนที่ 9 (ขันสกรู S9) จากตารางจะเห็นว่า สกรู S2 และ S3 Displacement ลดลง และบริเวณสกรู S4 และ S8 มีค่า Displacement เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงกดของสกรูของลำดับการขันที่ 8 และ 9

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงคองสกรูของสกรูในแบบจำลองการขึ้นสกรูตามลำดับการขึ้นจริง

Step/Screw	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Motor	BVCM	TVCM	BR	MR	TR	TL	ML	BL	BVCM	TVCM	Motor	Pivot	BL	BR	TR	Motor
1	Motor	1460.03	1459.84	1455.99	1445.38	1426.35	1415.88	1408.89	1408.91	1408.91	1408.91	990.55	1460.43	1460.43	1460.40	1459.32	990.55
2	BVCM		990.90	971.06	968.24	967.48	967.46	967.89	957.31		990.55	990.55	991.14	991.16	991.26	991.31	991.32
3	TVCM			990.09	988.60	987.93	989.35	979.74	972.66	972.63		990.57	989.83	989.84	989.89	989.94	989.95
4	BR				1169.27	1171.07	1170.69	1170.73	1163.96	1163.95	1163.95	1163.95	1167.33	1167.31	1167.60	1192.47	1192.48
5	MR					1168.30	1168.89	1168.59	1168.75	1168.74	1168.74	1168.71	1171.65	1171.64	1170.78	1170.45	1170.20
6	TR						1182.67	1183.87	1181.35	1181.34	1181.34	1181.32	1180.79	1180.78	1180.77	1590.13	1589.87
7	TL							1184.20	1183.84	1183.84	1183.84	1183.83	1183.12	1183.12	1183.12	1182.50	1182.24
8	ML								1182.57	1182.56	1182.57	1182.54	1183.43	1183.42	1183.43	1183.44	1183.18
9	BL									1192.61	1192.60	1192.60	1191.09		1192.31	1192.14	1192.12
10	Pivot													1460.04	1459.82	1459.67	1459.62

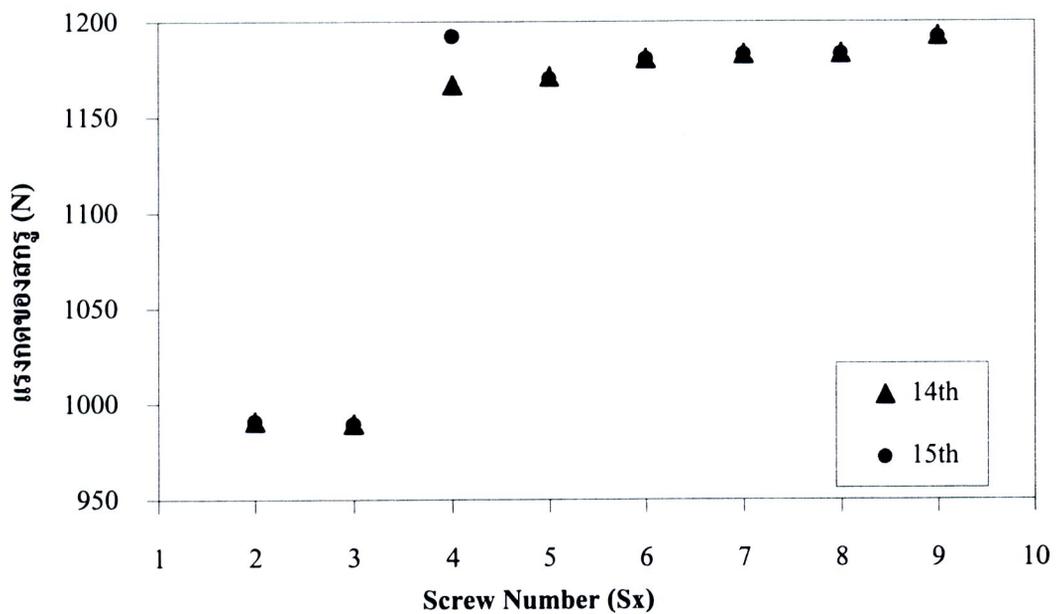
ลำดับขั้นสกรู

สกรูที่ไม่ถูกขึ้น

ตารางที่ 4.5 Displacement ของบริเวณสกรู S2, S3, S4 และ S8 ก่อนและหลังการขันในขั้นตอนที่ 9

Screw/Sequence	Displacement (mm)	
	8th	9th
S2	-0.0310	-0.0307
S3	-0.0310	-0.0309
S4	-0.2701	-0.2702
S8	-0.0921	-0.0922

เมื่อทำการขันย้าสกรู S4 ด้วยแรงบิดเท่าเดิมในลำดับที่ 15 พบว่า การขันย้าสกรูจะมีผลต่อสกรูตัวที่ขันเท่านั้น โดยจะ ส่งผลต่อสกรูตัวอื่นๆ น้อยมาก ซึ่งเปรียบเทียบได้จากค่าแรงกดของสกรูในลำดับการขันที่ 14 และ 15 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงกดของสกรูของลำดับการขันที่ 14 และ 15