

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

การศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้โบลท์ขาดของกระบวนการขันค้ำแรงบิด
สำหรับการประกอบเครื่องยนต์

ฉัตร มะโนน้อม

31 ส.ค. 2559

365493

TH00 24518

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2555

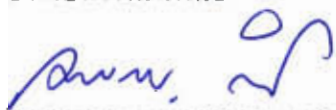
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


อาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ได้พิจารณา
งานนิพนธ์ของ ฉัตร มะโนน้อม ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

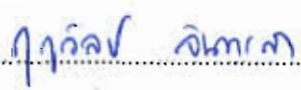
อาจารย์ผู้ควบคุมงานนิพนธ์


..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ลิลา)

คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์


..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรหาญ ลิลา)


..... กรรมการ
(ดร. จักรवाल คุณะดิติก)


..... กรรมการ
(ดร. ฤกษ์วัลย์ จันทรส)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 20 เดือน สิงหาคม พ.ศ 2555

ประกาศคุณูปการ

งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. บรรหาญ ลิลา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. จักรวาล คุณะคิลิก และ ดร. ฤทธิชัย จันทระสา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และวิจารณ์ผลงาน ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ นอกจากนี้ ยังได้รับความอนุเคราะห์จาก มร. เดวิด อีลิออต ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรมผลิตภัณฑ์ ตลอดจนเพื่อนร่วมงาน บริษัท เจนเนอรัล มอเตอร์ส พาวเวอร์เทรน (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวีระศักดิ์ คุณแม่สุมาลี มะโนน้อม และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้อาหารกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบพระคุณเป็นกตัญญูตเวทิตาแด่ บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ฉัตร มะโนน้อม

53920835: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง/ กระบวนการขันค่าแรงบิด/ ค่าแรงบิด

ฉัตร มะโนน้อม: การศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้โบลท์ขาดของกระบวนการขันค่าแรงบิด สำหรับการประกอบเครื่องยนต์ (A STUDY OF FACTORS EFFECTING BOLT BROKEN IN AN ENGINE ASSEMBLY TORQUE TIGHTENING PROCESS). คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: บรรหาญ ลิลา, Ph.D., 105 หน้า. ปี พ.ศ. 2555.

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ไขปัญหาการขาดของโบลท์ก่อนที่ค่าแรงบิดจะถึงข้อกำหนดในกระบวนการขันค่าแรงบิดสำหรับการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการขาดของโบลท์เป็นผลจากอิทธิพลของ 4 ปัจจัย ได้แก่ ของเหลวที่ติดอยู่ที่รูที่ผ่านการทำเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ผ่านการทำเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์ และฝุ่นที่ติดอยู่ที่เกลียวของ โบลท์ แนวทางการแก้ปัญหาทำโดยการกำหนดระดับของปัจจัยในการผลิตคือไม่ให้มีของเหลวติดอยู่ที่รูเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเกลียวเท่ากับ 6.647 ถึง 6.912 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์เท่ากับ 7.760 ถึง 7.972 มิลลิเมตร และไม่ให้มีฝุ่นติดอยู่ที่เกลียวของ โบลท์ จะได้ค่าแรงบิดคาตามายที่ทำให้โบลท์ขาดน้อยที่สุดเท่ากับ 23.78 นิวตัน-เมตร ซึ่งมากกว่าค่าแรงบิดสูงสุดตามข้อกำหนด จากการทดลองขันค่าแรงบิดที่ 23 นิวตัน-เมตร ภายใต้ระดับของปัจจัยที่กำหนดทั้งหมด 30 ครั้ง พบว่าไม่ทำให้โบลท์ขาด จึงอนุมานได้ว่าการกำหนดระดับปัจจัยตามผลการศึกษานี้จะช่วยแก้ปัญหาได้อย่างมีนัยสำคัญและคาดว่าดัชนีความสามารถของกระบวนการระยะยาวจะไม่ต่ำกว่า 1.5

53920835: MAJOR: INDUSTRIAL ENGINEERING; B.Eng.

(INDUSTRIAL ENGINEERING)

KEYWORDS: DESIGN OF EXPERIMENT/ TORQUE TIGHTENING PROCESS/

TORQUE VALUE

CHAT MANONOM: A STUDY OF FACTORS EFFECTING BOLT BROKEN IN AN ENGINE ASSEMBLY TORQUE TIGHTENING PROCESS. ADVISORY COMMITTEE: BANHAN LILA, Ph.D., 105 P. 2012.

This research presents the solving method of bolt broken problem in an engine assembly tightening process for the engine assembly. The full factorial design experiment was performed. The result indicated that fluid in the thread hole, the diameter of the thread hole, the diameter of the bolt, and the dust on the bolt were significantly contributed to the torque at the broken point. The optimal settings were determined and controlled to be 6.647 to 6.912 mm. and 7.760 to 7.972 mm. for the diameter of the thread hole and the diameter of the bolt, respectively. The thread hole and the bolt must be without fluid or dust. The expected torque at the yield point was 23.78 N-m which is better than the specification. The try-out of 30 sets with 23 N-m of applied torque was performed successfully without any broken bolts. Thus, the setting found in this study can significantly eliminate the problem and expect to yield at least 1.5 of the long run process capability.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
แผนการดำเนินงาน.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
ข้อมูลทั่วไปของสถานประกอบการ.....	32
วิธีการดำเนินงาน.....	35
การดำเนินงาน.....	36
4 ผลการศึกษาวิจัย.....	54
ผลการวิจัย.....	54
การเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังควบคุมปัจจัยเพื่อยืนยัน ผลการวิจัย.....	70
5 อภิปรายและสรุปผล.....	74
อภิปรายผลการวิจัย.....	74
สรุปผลการวิจัย.....	76
ข้อเสนอแนะ.....	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	80
ประวัติย่อของผู้วิจัย	105

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	แผนการดำเนินงาน	4
2-1	ค่าแรงบิดสูงสุดที่ยอมรับได้ของโบลท์ตามมาตรฐาน ISO 898/1	7
2-2	ค่าความสามารถของกระบวนการ โดยเปรียบเทียบกับค่าของเสีย ต่อหนึ่งล้านหน่วย	10
2-3	การจัดอันดับความรุนแรง	17
2-4	การจัดอันดับการตรวจพบ	19
2-5	การจัดอันดับความถี่	22
2-6	ตัวอย่างข้อมูลของการทดลอง 2 ปีจ๊ัย	25
3-1	วิธีการขัน โบลท์ที่ใช้ในกระบวนการประกอบเครื่องยนต์	37
3-2	วิธีการขันค่าแรงบิดที่ใช้ในกระบวนการประกอบเครื่องยนต์	38
3-3	จำนวนของเสียที่เกิดจากการประกอบเครื่องยนต์	40
3-4	การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ	45
3-5	สรุปผลจากตารางผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ	47
3-6	ระดับของปีจ๊ัยที่คาดว่าจะมีผลต่อปัญหาโบลท์ขาด	49
3-7	ค่าของปีจ๊ัยในแต่ละรอบการทดลอง	51
3-8	แผ่นตรวจสอบเพื่อบันทึกผลสำหรับความหนาของชิ้นงาน	52
4-1	จำนวนของชิ้นงานที่ได้ทำการเจาะรูและทำเกลียวขนาด M8 ที่ใช้ในการทดลอง ..	54
4-2	จำนวนของโบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8 ที่ใช้ในการทดลอง	55
4-3	ข้อมูลค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง	56
4-4	การทดสอบเพื่อหาจำนวนครั้งในการทดลองที่เหมาะสม	57
4-5	ข้อมูลค่าแรงบิดที่มากที่สุดหลังจากเปลี่ยนค่าที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบ การทดลอง	63
4-6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองของปีจ๊ัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงบิด ที่ทำให้โบลท์ขาด	64
4-7	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการของค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่ทำให้ โบลท์ขาด	66
4-8	ค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณตาราง	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-9	ค่าจากข้อกำหนดที่ใช้ในสายการประกอบเครื่องยนต์สำหรับ โบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8.....
	68
4-10	ระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิดของโบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8.....
	69
4-11	ผลการทดลองหลังควบคุมปัจจัย.....
	70
4-12	การเปรียบเทียบผลหลังจากการทดลองกับก่อนการทดลอง.....
	72
4-13	จำนวนของเสียที่เกิดจากการประกอบเครื่องยนต์.....
	73
5-1	ปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิด.....
	76

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	เครื่องมือวัดแรงบิด	6
2-2	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมการหมุนของหัวโบลท์	8
2-3	แผนผังพาเรโต	11
2-4	แผนภูมิแท่ง	12
2-5	แผนผังแสดงเหตุและผล	13
2-6	แผนผังการกระจาย	13
2-7	ฮิสโตแกรม	14
2-8	แผนภูมิควบคุม	15
3-1	แผนผังโรงงาน	33
3-2	กระบวนการประกอบเครื่องยนต์	34
3-3	แผนผังลำดับขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	35
3-4	แผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน	36
3-5	แผนภูมิที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิด	39
3-6	แผนภูมิแสดงจำนวนของเสียที่เกิดจากการประกอบเครื่องยนต์	40
3-7	แผนภูมิพาเรโตแสดงปัญหาทั้งหมดของการประกอบเครื่องยนต์	41
3-8	แผนภาพแสดงเหตุและผล	43
3-9	แผนผังพาเรโตแสดงสาเหตุของปัญหา	48
3-10	ปัจจัยมีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน (ของเหลวที่รู้)	50
3-11	ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของรู)	50
3-12	ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์)	50
3-13	ปัจจัยมีฝุ่นติดอยู่ที่เกลียวของโบลท์ (ฝุ่นที่โบลท์)	50
4-1	แผนภูมิของปัจจัยหลักของการขาดของโบลท์	58
4-2	แผนภูมิของปัจจัยร่วมของการขาดของโบลท์	59
4-3	การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนต่างของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด	59
4-4	การกระจายของค่าส่วนตกค้าง Fitted Value ของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด	60
4-5	การกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด	61
4-6	การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากสมการถดถอยกับข้อกำหนด	69

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-7	แผนภูมิแสดงจำนวนของเสียที่เกิดจากการกระบวนการขึ้นค่าแรงบิด	73

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ความมั่นใจในความปลอดภัยจากการใช้สินค้าของลูกค้านับเป็นปัจจัยที่สำคัญอันดับต้น ๆ สำหรับการสร้างกำไรและความสำเร็จอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในสภาวะแวดล้อมปัจจุบันที่ลูกค้ามีทางเลือกมากขึ้น และการปกป้องสิทธิของลูกค้าได้รับการสนับสนุนจากองค์กรทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และองค์กรอิสระต่าง ๆ อย่างจริงจัง ดังนั้นการกระทำใด ๆ ที่จะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยจึงถือเป็นสิ่งที่ยอมรับไม่ได้ไม่ว่าในกรณีใด ๆ ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตต้องหาทางป้องกันไม่ให้ความไม่ปลอดภัยเกิดขึ้น หรือเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะต้องไม่ให้หลุดไปถึงลูกค้าได้ และนอกจากนั้นบริษัทต้องหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัย เพื่อทำการกำจัด จำกัด และปรับปรุงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับลูกค้าหลังจากที่ลูกค้าได้รับสินค้าและใช้งานต่อไป

บริษัทกรณีศึกษาทำการผลิตเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้ในรถกระบะ และรถยนต์นั่งอเนกประสงค์ ซึ่งในปีพุทธศักราช 2553 ได้ประสบปัญหาการขาดโบลท์ในกระบวนการขันค่าแรงบิด เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่วิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์ได้กำหนดไว้ โดยมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการขันค่าแรงบิดทั้งหมดร้อยละ 1.61 ของยอดผลิต และมีค่าความสามารถของกระบวนการเท่ากับ 0.83 ซึ่งเป้าหมายของบริษัทคือต้องไม่มีของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลโดยตรงต่อความปลอดภัยของลูกค้าในขณะที่ขับรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลที่ผลิตจากบริษัทนี้เป็นต้นกำลัง นอกจากนี้ยังส่งผลทางอ้อมคือต้นทุนที่เกิดจากของเสียและผลิตภาพในการผลิตเครื่องยนต์ดีเซลของบริษัท

ความสำคัญดังกล่าว ผู้บริหารบริษัทต้องการแก้ไขปัญหาค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในกระบวนการขันค่าแรงบิดในทุก ๆ สถานะงาน โดยการศึกษาและกำหนดสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดการขาดโบลท์ในกระบวนการขันค่าแรงบิด โดยผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่คาดว่าจะมีผลทำให้เกิดปัญหา ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่ามีสิ่งสกปรกติดค้างอยู่ที่ชิ้นส่วนที่ผ่านกระบวนการเจาะรูและทำเกลียว ส่งผลให้เกิดปัญหาความไม่ปลอดภัยของลูกค้า ในขณะที่ขับรถยนต์ ส่งผลต่อความมั่นใจของลูกค้า ที่มีต่อการใช้งานรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลที่ผลิตจากบริษัทเป็นต้นกำลัง และส่งผลให้ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตสูงขึ้นจากการแก้ไขผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดต้นทุนจากของเสีย เพิ่มค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย ลดผลิตภาพในการผลิตเครื่องยนต์

ดีเซลของบริษัท ทำให้ไม่สามารถแข่งขันกับคู่แข่งในท้องตลาดได้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหา เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาในระยะยาวของกระบวนการขึ้นค่าแรงบิด และเพื่อให้บริษัทสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน และลดของเสียที่เกิดจากการผลิตให้น้อยที่สุด โดยการวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติ และการออกแบบการทดลองเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ลดสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากการขาดของ โบลท์ในกระบวนการขึ้นค่าแรงบิดของการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล
2. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการขาดของ โบลท์ในกระบวนการขึ้นค่าแรงบิดของการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล
3. กำหนดสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการขาดของ โบลท์ในกระบวนการขึ้นค่าแรงบิดของการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถใช้ผลการวิจัยนี้เป็นแหล่งข้อมูลในการศึกษา และพัฒนาสำหรับนิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป
2. สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ในการทำงานจริง เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นในการประกอบเครื่องยนต์ดีเซลได้

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษากระบวนการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล และวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การขาดของโบลท์ในกระบวนการขึ้นค่าแรงบิดของการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล และกำหนดสถานะที่ เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การขาดของโบลท์ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติ และการออกแบบการทดลอง โดยทำการศึกษาโบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8 นอกสายการผลิต

แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล
2. ศึกษาปัญหาในขั้นตอนการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล
3. เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ปัญหาการขาดของโบลท์
4. สรุปสาเหตุของปัญหาการขาดของโบลท์ และหาแนวทางการปรับปรุง
5. นำเสนอแนวทาง และดำเนินการแก้ไขปัญหาการขาดของโบลท์
6. สรุปผลการวิจัย
7. จัดทำรายงาน และนำเสนอรายงานการวิจัย

แผนการดำเนินงานทั้ง 7 ขั้นตอน สามารถเขียนเป็นตารางแผนดำเนินงานดังตารางที่ 1-1

โดยแสดงระยะเวลาของการดำเนินงานตั้งแต่เดือนตุลาคม พุทธศักราช 2554 ถึงเดือนมีนาคม พุทธศักราช 2555

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงาน

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2554			พ.ศ. 2555			ผู้รับผิดชอบ
		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
1	ศึกษาระบบการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล							นายฉัตร มะโนน้อม
2	ศึกษาปัญหาในขั้นตอนการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล							นายฉัตร มะโนน้อม
3	เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ปัญหาการขาดของโบลท์							นายฉัตร มะโนน้อม
4	สรุปสาเหตุของปัญหาการขาดของโบลท์ และหาแนวทางการปรับปรุง							นายฉัตร มะโนน้อม
5	นำเสนอแนวทาง และดำเนินการแก้ไขปัญหาการขาดของโบลท์							นายฉัตร มะโนน้อม
6	สรุปผลการวิจัย							นายฉัตร มะโนน้อม ศศ.ดร.บรรรหาญ ดิลา
7	จัดทำรายงาน และนำเสนอรายงานการวิจัย							นายฉัตร มะโนน้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินการแก้ปัญหาโบลท์ขาดในกระบวนการขันค่าแรงบิด เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่วิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์ได้กำหนดไว้ โดยข้อมูลของค่าแรงบิดเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องนำมาใช้ในการตัดสินใจ และการเก็บข้อมูลที่ดีและเพียงพอทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือต่อการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนั้นต้องมีการวางแผนในการเก็บข้อมูลและการออกแบบการทดลอง เพื่อป้องกันปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ โดยในบทนี้ได้แสดงเนื้อหาของทฤษฎีที่จำเป็น ได้แก่ การขันค่าแรงบิด ดัชนีความสามารถของกระบวนการ เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ และสมการถดถอยเชิงซ้อน

เนื้อหาในบทนี้ ผู้วิจัยได้แสดงเนื้อหาของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกรณีศึกษาที่เท่านั้น ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากบรรณานุกรมท้ายเล่ม โดยเนื้อหาของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมีดังนี้

1. การขันค่าแรงบิด (Torque Tightening)

หลักการพื้นฐานของการขันโบลท์ คือการประกอบชิ้นงาน 2 ชิ้นเข้าด้วยกัน โดยหลังจากการขันให้เกิดค่าแรงค่าหนึ่ง ซึ่งแรงนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ แรงสูญเสีย (Friction loss) ได้หัวโบลท์และที่เกลียวของโบลท์ และแรงจับชิ้นงาน (Camping Force) โดยจะเห็นได้ว่าสิ่งที่ต้องการจริง ๆ นั้น ไม่ใช่ค่าแรงบิด (Torque) แต่เป็นค่าแรงจับยึด (Camping Force) ที่สามารถจับยึดชิ้นงานไว้ด้วยกัน แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดส่วนใหญ่ จะไม่อ่านค่าออกมาเป็นค่าแรงจับยึดโดยตรง โดยต้องอ้างอิงจากค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องมือวัดค่าแรงบิด (New Torque Wrench.com, 2011)

ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 เครื่องมือวัดแรงบิด

Bolt Science Limited (2011) กล่าวว่า การเลือกโบลท์มีความจำเป็นอย่างยิ่งในจุดที่บังคับค่าแรงบิด ซึ่งอาจหมายถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ที่นำไปใช้งานหลังจากการขันค่าแรงบิดแล้ว โดยหนึ่งในปัญหาหลักของชิ้นงานที่ขันด้วยโบลท์ คือการเลือกค่าแรงบิดที่ใช้ในการขันโบลท์ ซึ่งการเลือกค่าแรงบิดนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับวิศวกรออกแบบในการกำหนดค่าแรงบิดในการขันโบลท์ โดยเนื้อหาต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการหลักในการเลือกค่าแรงบิด เพื่อให้สามารถขันชิ้นงานได้โดยไม่มีปัญหา ซึ่งมีทั้งหมด 2 ขั้นตอนหลัก คือการควบคุมค่าแรงบิดในการขัน (Torque Control Tightening) และการควบคุมมุมของการขัน (Angle Control Tightening)

การควบคุมค่าแรงบิดในการขันที่นิยมมากที่สุด คือการควบคุมค่าพรีโหลด (Preload) ซึ่งค่าแรงบิดที่จำเป็นต่อการขันค่าพรีโหลดสามารถกำหนดได้จากค่ามาตรฐาน หรือการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิด และผลของความเครียดของโบลท์ เมื่อโบลท์ถูกขันค่าแรงบิด ส่วนของโบลท์ที่แคบที่สุดจะรับความเครียดโดยตรง จากการยึดที่เกิดจากความเค้นในแนวแกน รวมถึงความเครียดจากการบิดที่เกิดจากแรงบิดที่กระทำกับเกลียว ซึ่งตารางแสดงค่าแรงบิดของโบลท์ส่วนใหญ่จะสมมติว่าความเครียดที่เกิดจากแรงบิดเป็นความเครียดโดยตรงที่เกิดจากความเค้นในแนวแกนที่กระทำกับโบลท์ โดยปกติจะกำหนดค่าแรงบิดประมาณ 75% ของค่าแรงบิดสูงสุดที่ยอมรับได้ สำหรับขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดจากความเครียดของแรงบิดเมื่อรวมกับความเครียดในแนวแกนนิยมใช้ 90% ของค่าสูงสุดที่ยอมรับได้

ปัญหาพื้นฐานของการขาดของโบลท์ เนื่องจากส่วนใหญ่ของแรงบิดที่ใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน ซึ่งปกติจะอยู่ระหว่าง 90% ของค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ การเปลี่ยนแปลงแรงเสียดทานเพียงเล็กน้อย สามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ของค่าพรีโหลดของโบลท์ โดยมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันคือมาตรฐาน ISO 898/1 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-1 ดังนั้นควรพิจารณาการเลือกใช้โบลท์

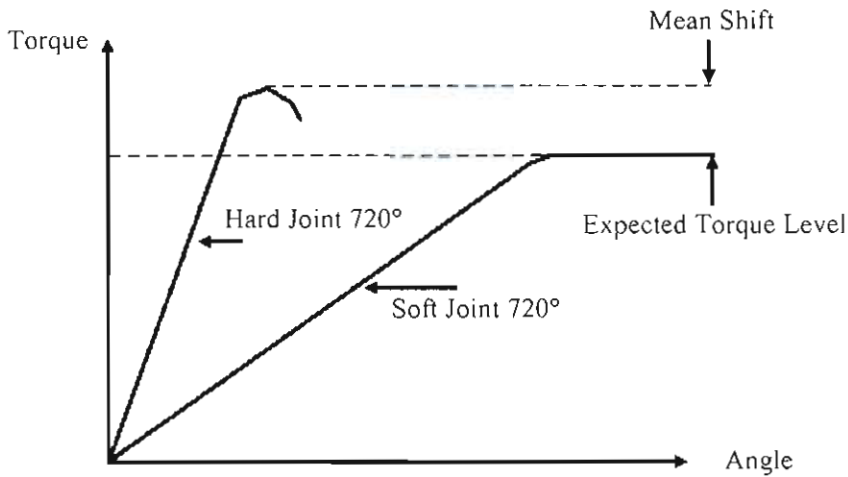
ตามความเหมาะสม โดยเกรดของโบลท์นั้นสามารถดูที่บริเวณหัวหรือบริเวณตัวของโบลท์ ส่วนความต่างของเกรดนั้นถูกกำหนดให้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเนื้อเหล็ก และอุณหภูมิที่ผสมกัน

ตารางที่ 2-1 ค่าแรงบิดสูงสุดที่ยอมรับได้ของโบลท์ตามมาตรฐาน ISO 898/1

ขนาด	ค่าแรงบิดสูงสุดที่ยอมรับได้ (นิวตัน-เมตร, N·m)						
	เกรด 3.6	เกรด 4.6	เกรด 4.8	เกรด 5.8	เกรด 8.8	เกรด 10.9	เกรด 12.9
M3	0.35	0.46	0.61	5.8	1.2	1.7	2.1
M4	0.81	1.1	1.4	0.77	2.9	4	4.9
M5	0.6	2.2	2.95	3.6	5.7	8.1	9.7
M6	2.8	3.7	4.9	6.1	9.8	14	17
M8		8.9	10.5	15	24	33	40
M10		17	21	29	47	65	79
M12		30	36	51	81	114	136
M14		48	58	80	128	181	217
M16		74	88	123	197	277	333
M18		103	121	172	275	386	463
M20		144	170	240	385	541	649
M22		194	230	324	518	728	874
M24		249	295	416	665	935	1120
M27		360	435	600	961	1350	1620
M30		492	590	819	1310	1840	2210

การควบคุมมุมในการขัน (Angle Control Tightening) เป็นที่รู้จักในวิธีการถอดโบลท์ และถูกนำมาใช้สำหรับการประกอบด้วยมือด้วยระยะเวลาสั้น โดยการกำหนดมุมในการขันค่าแรงบิด หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยวิธีการนี้ถูกนำมาใช้สำหรับใช้กับการขัน โบลท์ให้แน่น โดยมุมของโบลท์จะถูกกำหนดไว้ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ในการฟรีไหลเพื่อให้ทนต่อความเครียดของชิ้นงาน ซึ่งข้อเสียที่สำคัญของวิธีการนี้คือความแม่นยำของมุมในการขัน

การแบ่งประเภทของการกำหนดมุมในการขันโบลท์ สามารถแบ่งออกได้จากผลของการขันเป็นสองประเภท คือ แบบ Hard Joint และ แบบ Soft Joint โดยแสดงเป็นแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมการหมุนของหัวโบลท์ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมการหมุนของหัวโบลท์

การขันแบบ Hard Joint ซึ่งมุมที่เกิดขึ้นหลังจากจุด Snug (จุด Snug คือจุดที่หัวโบลท์สัมผัสกับชิ้นงานที่ทำการขัน) โดยหัวโบลท์จะหมุนไปไม่เกิน 30 องศา จะได้ค่าแรงบิดหลังจากพบจุด Snug ดังภาพที่ 2 เรียกงานแบบนี้ว่า Hard Joint และการขันแบบ Soft Joint ซึ่งหลังจากหมุนโบลท์ถึงจุด Snug แล้วหัวโบลท์หมุนไปอีกมากกว่า 30 องศา แต่ไม่เกิน 720 องศา คือหลังจากหัวโบลท์แนบกับชิ้นงานแล้วจะหมุนไปอีกไม่เกิน 2 รอบ ได้ค่าเป้าหมายของแรงบิด (Target Torque) โดยจะเรียกลักษณะการขันแบบนี้ว่า Soft Joint โดยค่า Mean Shift คือค่าความแตกต่างของค่าเป้าหมายของแรงบิด ระหว่าง Hard Joint และ Soft Joint ซึ่งงานที่เป็น Hard Joint นั้น เมื่อทำการขันจะมีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมายของแรงบิด เพราะเกิดการ Over Shoot ขึ้น เนื่องจากองศาต่ำ ส่วนงานที่เป็น Soft Joint จะได้ค่าเป้าหมายของแรงบิดที่แม่นยำกว่าแต่จะมีโอกาส Low Torque เกิดขึ้น เพราะองศาที่ได้ค่าแรงบิดจะยาวกว่ามาก อย่างไรก็ตามการเลือกเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงก็เป็นสิ่งที่สามารถทำให้ได้ค่าเป้าหมายของแรงบิดได้ง่ายขึ้น โดยการขัน Hard Joint และ Soft Joint จะแสดงออกมาในลักษณะของงานที่เป็น Hard หรือ Soft Joint แบบสูงสุด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการขันอาจจะไม่ออกมาในรูปแบบนี้เสมอไป อาจจะมีงานที่ขันแล้วหมุนเกิน 30 องศา ไปอยู่ที่ 60 องศา งานนี้ก็จัดเป็นประเภท Hard Joint เช่นกัน แต่ค่าจะ Over Shoot น้อยลง ซึ่งการเกิดขององศาในรูปแบบต่าง ๆ เกิดจากวัสดุที่ต้องการขันเป็นหลัก

2. ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Ratio)

ดัชนีความสามารถของกระบวนการ จะประมาณจากดัชนีสัดส่วนระหว่างช่วงข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์กับความแปรผันตามธรรมชาติของกระบวนการ โดยช่วงข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ (Upper Specification Limit, USL – Lower Specification Limit, LSL) เป็นสิ่งที่ถูกกำหนดโดยลูกค้า หรือจากการออกแบบ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นของเสียเมื่อค่าคุณลักษณะทางคุณภาพออกนอกช่วงข้อกำหนดนี้

ดัชนีศักยภาพของกระบวนการ (Process Potential Index, C_p) เพื่อประเมินความสามารถของกระบวนการว่าเหมาะสมกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์มากน้อยเพียงใด ภายใต้สมมติฐานการแจกแจงคุณลักษณะทางคุณภาพเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) และกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ โดยในกรณีของข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ 2 ด้าน ค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างช่วงของข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ (Centered Process) หรือ ไม่มีการเคลื่อนตัวของค่าเฉลี่ยของกระบวนการ โดยดัชนีความสามารถของกระบวนการคำนวณได้จากสมการที่ 2-1

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (2-1)$$

ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index, C_{pk}) เพื่อประเมินความสามารถของกระบวนการ โดยคำนึงถึงตำแหน่งของค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะทางคุณภาพที่สัมพันธ์กับช่วงข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ โดยมีสมมติฐานเหมือนกับดัชนีศักยภาพของกระบวนการ ยกเว้นข้อ 3 คือค่าเฉลี่ยของกระบวนการอาจไม่อยู่กึ่งกลางระหว่างช่วงข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ (Off-Centered Process) หรือมีการคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยของกระบวนการเกิดขึ้น โดยดัชนีความสามารถของกระบวนการคำนวณได้จากสมการที่ 2-2

$$C_{pk} = \min \left[C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}, C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right] \quad (2-2)$$

Wikipedia (2012) เกณฑ์ในการตัดสินความสามารถของกระบวนการ

$C_{pk} < 1$	กระบวนการมีขีดความสามารถไม่ดี ควรปรับปรุง
$1 < C_{pk} < 1.33$	กระบวนการมีความสามารถดี
$C_{pk} > 1.33$	กระบวนการมีขีดความสามารถที่อยู่ในเกณฑ์ดี
$C_{pk} > 2$	กระบวนการมีคุณภาพระดับ Six Sigma

ในกรณีผลจากการตรวจวัดไม่สามารถระบุเป็นค่าเชิงตัวเลขได้ สามารถใช้ค่าของเสียต่อหนึ่งล้านหน่วย (Part per Million, PPM) ในการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความสามารถของกระบวนการได้ โดยแสดงดังตารางที่ 2-2 (Siliconfareast.com, 2012)

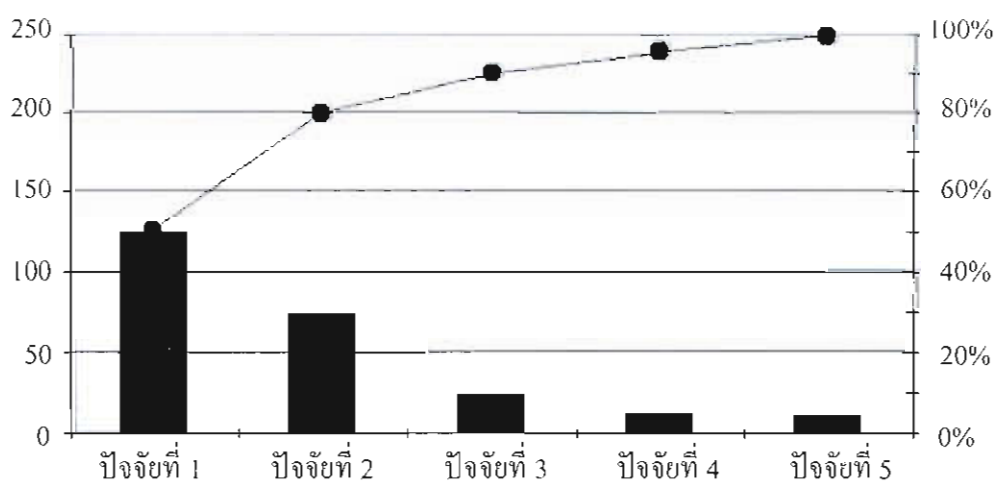
ตารางที่ 2-2 ค่าความสามารถของกระบวนการโดยเปรียบเทียบกับค่าของเสียต่อหนึ่งล้านหน่วย

ค่าความสามารถของกระบวนการ	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	พื้นที่ใต้ส่วนโค้ง	ค่าของเสียต่อหนึ่งล้านหน่วย
0.1	0.3	0.235822715	764177.2851
0.2	0.6	0.451493870	548506.1299
0.3	0.9	0.631879817	368120.1835
0.4	1.2	0.769860537	230139.4634
0.5	1.5	0.866385542	133614.4576
0.6	1.8	0.928139469	71860.531
0.7	2.1	0.964271285	35728.7148
0.8	2.4	0.983604942	16395.0577
0.9	2.7	0.993065954	6934.0461
1.0	3.0	0.997300066	2699.9344
1.1	3.3	0.999033035	966.9651
1.2	3.6	0.999681709	318.2914
1.3	3.9	0.999903769	96.231
1.333	3.999	0.999936360	63.6403
1.4	4.2	0.999973292	26.7082
1.5	4.5	0.999993198	6.8016
1.6	4.8	0.999998411	1.5887
1.666	4.998	0.999999420	0.5802
1.7	5.1	0.999999660	0.3402
1.8	5.4	0.999999933	0.0668
1.9	5.7	0.999999988	0.012
2.0	6.0	0.999999998	0.002

3. เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด

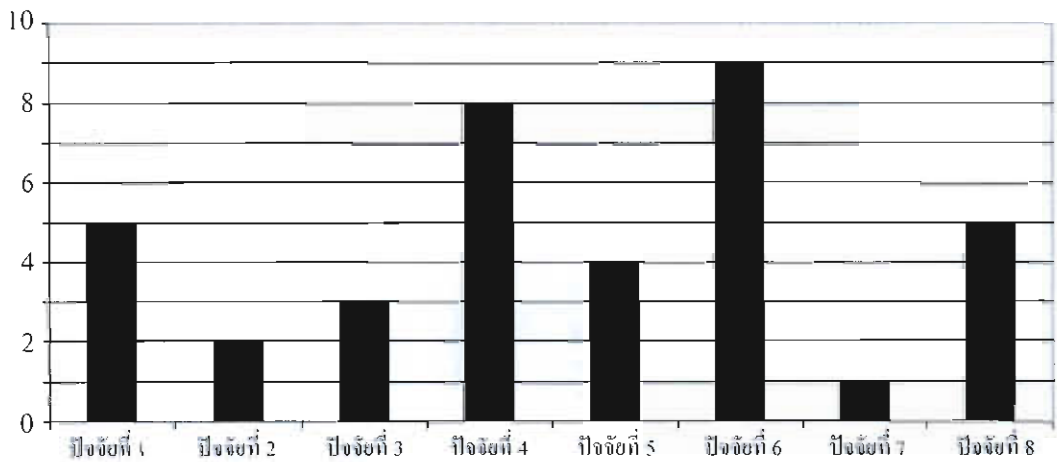
จำลักษณ์ ขุนพลแก้ว (2549) กล่าวว่า เครื่องมือคุณภาพช่วยในการศึกษาสภาพของปัญหา การเลือก การสำรวจ การค้นหา และวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา นำไปสู่การแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพ จัดทำมาตรฐานและควบคุมติดตามผลอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วยแผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) แผนภูมิ (Graph) แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram) ฮิสโตแกรม (Histogram) แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) และแผนภูมิควบคุม (Control Chart) โดยเครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิดนี้ พบได้ในงานวิจัยโดยการใช้แผนผังพาเรโตในการเรียงลำดับความสำคัญของปัญหามากไปน้อย การวิเคราะห์ผลการทดลองจากแผนภูมิ การหาสาเหตุของปัญหาด้วยการใช้แผนผังแสดงเหตุและผล การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงและความแม่นยำของเครื่องมือวัดด้วยแผนผังการกระจาย การออกแบบแผ่นตรวจสอบในการเก็บข้อมูลค่าแรงบิดของโบลท์จากการทดลอง โดยสามารถติดตามการใช้เครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 ชนิดได้ในบทความต่อไป โดยทางผู้วิจัยได้แสดงเนื้อหาและหลักการของเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 ชนิดไว้ดังต่อไปนี้

เครื่องมือชนิดที่ 1 แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงสาเหตุหลักเพียงไม่กี่สาเหตุที่มีบทบาทสำคัญต่อปัญหาที่เกิดขึ้น แล้วทำการจำแนกข้อมูล โดยการเรียงลำดับค่าของข้อมูลที่มีค่าสูงสุดไว้ทางซ้าย แล้วเรียงลำดับค่าของข้อมูลที่ลดลงมาทางขวาของแผนภูมิใช้เพื่อเปรียบเทียบการลำดับความสำคัญของข้อมูล และการตัดสินใจ โดยหลักการพาเรโต คือหลักการ “80% – 20%” คือปัญหาที่มีความสำคัญมากจำนวนประมาณ 80% มักจะมีสาเหตุมาจากประมาณ 20% ของสาเหตุทั้งหมดในขณะที่จำนวนที่เหลือประมาณ 80% จะมีผลต่อปัญหาที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยประมาณ 20% ของปัญหาเท่านั้น โดยตัวอย่างของแผนผังพาเรโต แสดงดังภาพที่ 2-3



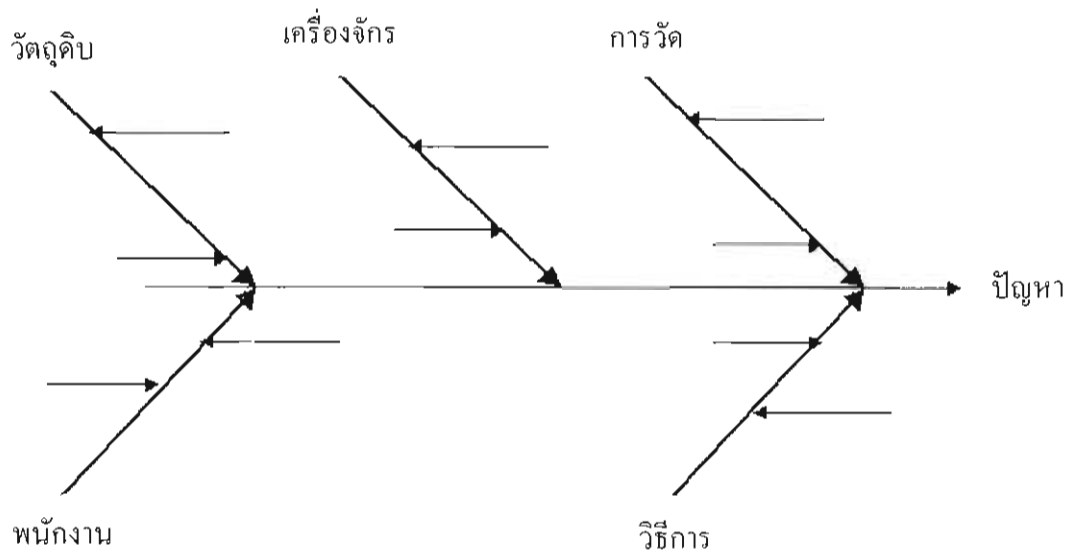
ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างแผนผังพาเรโต

เครื่องมือชนิดที่ 2 แผนภูมิ (Graph) ใช้นำเสนอข้อมูล ที่สามารถทำให้ผู้อ่านเข้าใจข้อมูลต่าง ๆ ได้ดี สะดวกต่อการแปลความหมาย และสามารถให้รายละเอียดของการเปรียบเทียบได้ดีกว่าการนำเสนอด้วยวิธีอื่น ทำให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่าย อ่านได้อย่างรวดเร็ว หรือสามารถเปรียบเทียบข้อมูลแต่ละข้อมูล ได้อย่างชัดเจน แผนภูมิเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์มากในด้านการวิเคราะห์ทางสถิติ สำหรับงานวิศวกรรม โดยแผนภูมิแท่งใช้เปรียบเทียบความแตกต่างในเชิงปริมาณที่มีการเปรียบเทียบเป็นตัวเลข โดยตัวอย่างของแผนภูมิแท่ง แสดงดังภาพที่ 2-4



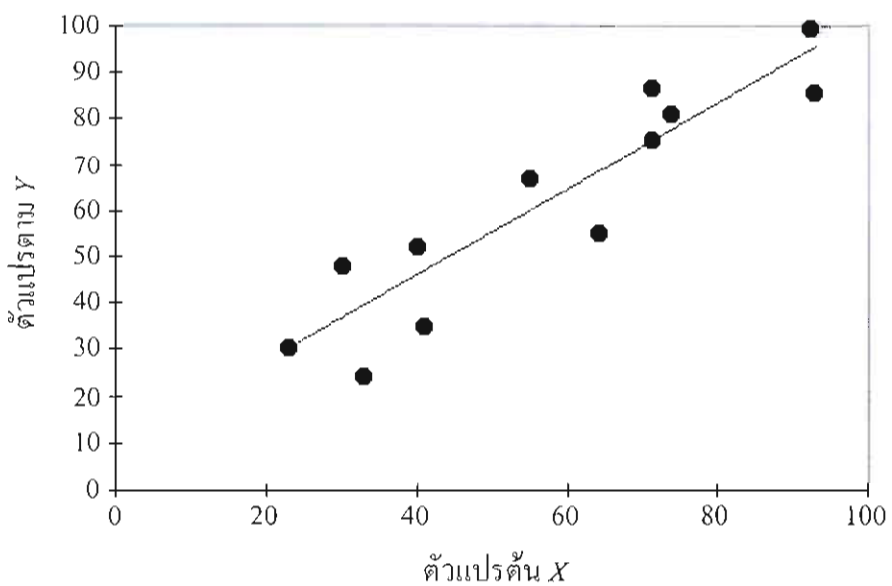
ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างแผนภูมิแท่ง

เครื่องมือชนิดที่ 3 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) คือ แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของปัญหาที่จะพิจารณา ซึ่งการใช้แผนภาพเหตุและผล ต้องมีการระดมสมองจากผู้ที่มีประสบการณ์ในการค้นหาสาเหตุและผลของปัญหา โดยสาเหตุของปัญหาที่ค้นพบนั้นได้มาจากข้อมูลจริง ในสภาวะการทำงานจริง และสถานที่ปฏิบัติงานจริง โดยผลของสาเหตุอยู่ที่ปลายสุดในแนวนอนของแผนผังแสดงเหตุและผล และสุดปลายของแนวนอนจะเป็นผลของสาเหตุ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นจะมีต้นเหตุของปัญหาที่เป็นสาเหตุของปัญหาหลัก ๆ แยกแขนงออกจากเส้นแนวนอนที่ชี้ไปยังผลของสาเหตุ โดยตัวอย่างของแผนผังแสดงเหตุและผล แสดงดังภาพที่ 2-5



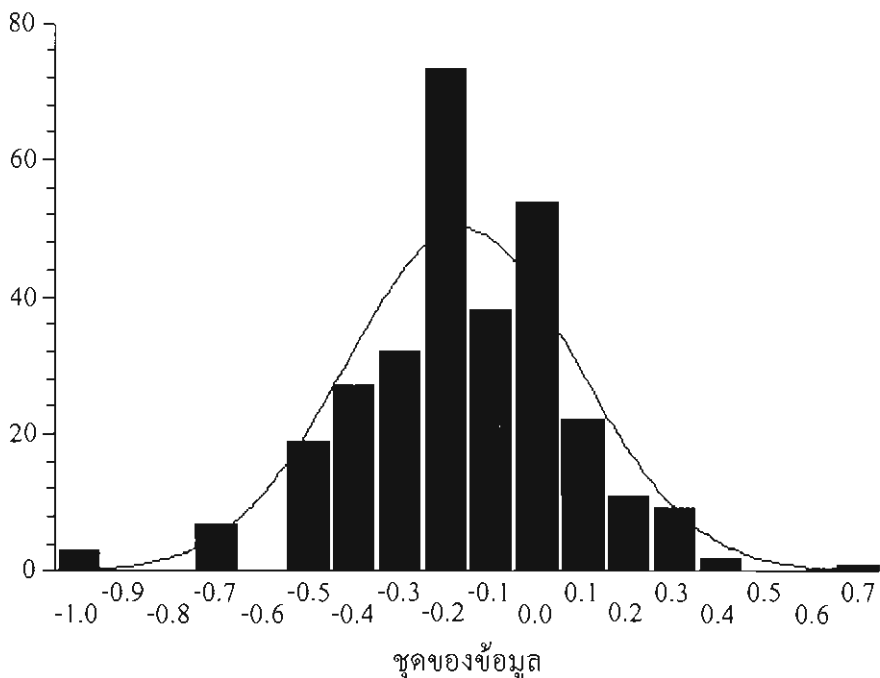
ภาพที่ 2-5 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล

เครื่องมือชนิดที่ 4 แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram) ใช้แสดงค่าของข้อมูลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวว่ามีแนวโน้มไปในทางใด เพื่อที่จะใช้หาความสัมพันธ์ที่แท้จริง โดยตัวแปร X คือตัวแปรอิสระ หรือค่าที่ปรับเปลี่ยน และตัวแปร Y คือตัวแปรตาม หรือผลที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าของตัวแปร X โดยตัวอย่างของแผนผังการกระจาย แสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างแผนผังการกระจาย

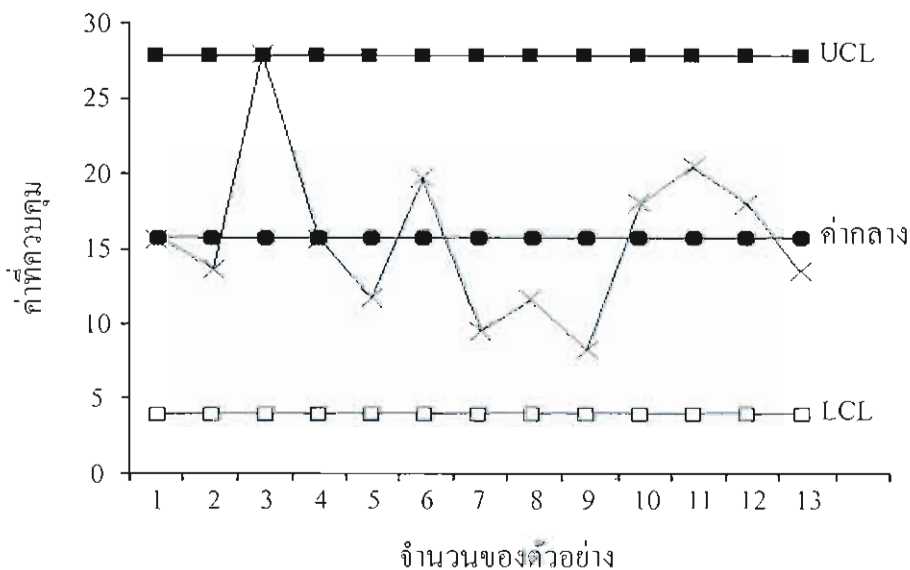
เครื่องมือชนิดที่ 5 ฮิสโตแกรม (Histogram) ใช้ดูความแปรปรวนของกระบวนการ โดยสังเกตรูปร่างของฮิสโตแกรมที่สร้างขึ้นจากข้อมูลที่ได้มาโดยการสุ่มตัวอย่างเป็นกราฟแท่งสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากันและมีด้านข้างติดกัน หลักการของฮิสโตแกรมเป็นการนำเสนอข้อมูลที่ต้องการสื่อความหมายให้เข้าใจได้ง่าย เป็นเครื่องมือที่แสดงด้วยกราฟแท่งจากชุดข้อมูลจากการตรวจวัด โดยการแบ่งช่วงสเกลขนาดของข้อมูลให้มีช่วงที่เท่า ๆ กัน เพื่อแบ่งช่วงขนาดวัดของข้อมูล โดยความสูงของแท่งกราฟจะหาจากความถี่หรือจำนวนของข้อมูลที่มีอยู่ในแต่ละช่วงค่าวัดของข้อมูลชุดนั้น ๆ รูปร่างของกราฟแท่งแต่ละรูปเทียบกับค่ากำหนดของงานนั้น ๆ ข้อมูลที่ใช้เป็นฐานในการเขียนควรมีข้อมูลไม่ต่ำกว่า 30 ข้อมูล โดยตัวอย่างของฮิสโตแกรม แสดงดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ฮิสโตแกรม

เครื่องมือชนิดที่ 6 แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) ได้รับการออกแบบเฉพาะเพื่อความสะดวก ความถูกต้องไม่ยุ่งยากในการบันทึกข้อมูลสำหรับการตัดสินใจ การบันทึกข้อมูลจะทำได้พร้อมกับการปฏิบัติงาน โดยการเก็บข้อมูลจะทำได้ควบคุมติดตามผลการดำเนินงาน การตรวจสอบและการวิเคราะห์สาเหตุของความไม่สอดคล้องในกระบวนการผลิต ทำการออกแบบให้เหมาะสมกับกระบวนการ เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ตรงความต้องการจริง

เครื่องมือชนิดที่ 7 แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือแผนภูมิระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคที่ระบุคุณสมบัติทางคุณภาพข้อใดข้อหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมเทียบกับเวลาเพื่อใช้เฝ้าระวัง และติดตามกระบวนการผลิตขึ้นตอนใดขึ้นตอนหนึ่ง โดยการตรวจวัดลักษณะทางคุณภาพซึ่งอาจเป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่วัดค่าได้ (Variable) หรือข้อมูลเชิงคุณภาพที่วัดค่าไม่ได้แต่แสดงโดยจำนวนนับ (Attribute) แล้วบันทึกลงในแผนภูมิซึ่งประกอบด้วยเส้นแบ่งเขต 3 เส้น ได้แก่ เส้นค่ากลาง เส้นแสดงขอบเขตควบคุมบน (Upper Specification Limit, *USL*) และเส้นแสดงขอบเขตควบคุมล่าง (Lower Specification Limit, *LSL*) โดยวัตถุประสงค์ของแผนภูมิควบคุม คือ การควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้รู้ว่ ณ เวลาใดที่มีปัญหาเรื่องคุณภาพ ทั้งนี้เพื่อแก้ไขปรับปรุงการวิเคราะห์กระบวนการผลิตเพื่อให้กลับสู่สภาวะปกติ โดยตัวอย่างของแผนภูมิควบคุม แสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แผนภูมิควบคุม

4. การวิเคราะห์ข้อบกพร่อง และผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis)

Industrial Technology Review (2543, หน้า 101 – 105) กล่าวว่า การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ โดยพิจารณาว่ามีข้อบกพร่องอะไรบ้างที่มีโอกาสเกิดขึ้น และข้อบกพร่องมีผลกระทบรุนแรงมากน้อยเพียงใด มีระบบในการตรวจจับข้อบกพร่องก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการถัดไปหรือไม่ มีความยากในการตรวจจับเพียงใด การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ คือการสร้างระบบในการป้องกันหรือลดโอกาสการเกิดลักษณะ

ข้อบกพร่อง กำจัดสาเหตุของข้อบกพร่อง รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับข้อบกพร่องให้พบก่อนถูกส่งเข้าสู่กระบวนการถัดไป ซึ่งส่งผลให้การร้องเรียนของลูกค้าต่อสินค้า หรือบริการที่ส่งมอบลดลง ความพึงพอใจของลูกค้าอยู่ในระดับที่สูงขึ้น โดยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่อง และผลกระทบมีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 จัดตั้งทีมงานเพื่อวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

ขั้นตอนที่ 3 ระดมสมองหาลักษณะข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ประเมินผลกระทบต่อระบบ และหาสาเหตุของข้อบกพร่องแต่ละรายการ พร้อมวิธีการตรวจจับหาข้อบกพร่อง

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินตัวเลขความเสี่ยงขึ้นา (Risk Priority Number; RPN) โดยค่า RPN คือ ผลคูณของระดับความรุนแรงของผลกระทบ และ โอกาสหรือความถี่ของสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง และระดับความสามารถในการตรวจจับ โดยวิธีการกำหนดค่าความรุนแรงของผลกระทบ โอกาสเกิดและความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่อง การให้คะแนนหรือกำหนดค่าความรุนแรงของผลกระทบ โอกาสเกิดและความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องในกระบวนการที่นิยมใช้ระดับคะแนน 1 ถึง 10 คะแนน โดยถ้าชิ้นส่วนใด กระบวนการใด ขั้นตอนใด ระบบใดมีความรุนแรงของผลกระทบน้อย โอกาสเกิดข้อบกพร่องต่ำ และมีความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องได้สูง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-3

$$\text{ตัวเลขความเสี่ยงขึ้นา (RPN)} = \text{ความรุนแรง} \times \text{การตรวจพบ} \times \text{ความถี่} \quad (2-3)$$

การจัดอันดับความรุนแรง การจัดอันดับการตรวจพบ และอันดับความถี่ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ปัญหา แสดงดังตารางที่ 2-3, 2-4, และ 2-5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-3 การจัดอันดับความรุนแรง

ผลกระทบ	ภาวะรุนแรงของผลกระทบ ต่อลูกค้า	ภาวะรุนแรงของผลกระทบ ต่อการผลิตหรือการประกอบ	อันดับ
อันตรายโดย ไม่มีการเตือน ล่วงหน้า	มีอันดับความรุนแรงที่สูงมาก เมื่อปัญหา หรือข้อบกพร่องที่ เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อยานยนต์ และ หรือมีส่วนร่วมที่ไม่สอดคล้อง กับมาตรฐานหรือกฎระเบียบ ของรัฐบาล ข้อบกพร่องที่จะเกิด ขึ้นโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	อาจทำให้พนักงาน หรือเครื่องมือ เครื่องจักร หรือการประกอบได้ รับอันตรายโดยไม่มีการเตือน ล่วงหน้า	10
อันตรายโดย ไม่มีการเตือน ล่วงหน้า	มีอันดับความรุนแรงสูงมากเมื่อ ปัญหา หรือข้อบกพร่องที่ เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อยานยนต์ และ หรือมีส่วนร่วมที่ไม่สอดคล้อง กับมาตรฐาน หรือกฎระเบียบ ของรัฐบาล ข้อบกพร่องจะ เกิดขึ้น โดยมีการเตือนล่วงหน้า	อาจทำให้พนักงาน หรือเครื่องมือ เครื่องจักร หรือการประกอบ ได้รับอันตรายโดยมีการเตือน ล่วงหน้า	9
สูงมาก	ชิ้นส่วนยานยนต์ไม่ทำงาน และ ไม่สามารถใช้งานหลัก ๆ ได้ หรือสูญเสียหน้าที่การทำงาน หลัก	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดอาจถูกทิ้ง หรือ ชิ้นส่วนยานยนต์ต้องถูกนำไป ซ่อมในแผนกซ่อม โดยใช้เวลา ซ่อมมากกว่า 1 ชั่วโมง	8
สูง	ชิ้นส่วนยานยนต์ทำงานได้ แต่ ถูกลดระดับสมรรถนะ ลูกค้าไม่ พอใจมาก	อาจต้องมีการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ และมีบางส่วน (น้อยกว่า 100% จะถูกทิ้งหรือชิ้นส่วนยานยนต์ที่ ถูกนำไปซ่อมในแผนกซ่อมใช้ เวลาการซ่อมอยู่ในช่วงครึ่งชั่วโมง ถึง 1 ชั่วโมง	7

ตารางที่ 2-3 การจัดอันดับความรุนแรง (ต่อ)

ผลกระทบ	ภาวะรุนแรงของผลกระทบ ต่อลูกค้า	ภาวะรุนแรงของผลกระทบ ต่อการผลิตหรือการประกอบ	อันดับ
ปานกลาง	ขึ้นส่วนงานขนัตทำงานแต่ขาด ความสะดวกสบายในการ ดำเนินงานลูกค้าเกิดความไม่ พอใจ	ขึ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) จะต้องทิ้งไปโดย ไม่มีการคัดแยก หรือขึ้นส่วนงาน ขนัตต้องถูกนำไปซ่อมในแผนก ซ่อม โดยใช้เวลาน้อยกว่าครึ่ง ชั่วโมง	6
ต่ำ	ขึ้นส่วนงานขนัตทำงานได้โดย ความสะดวก แต่ลดทอน สมรรถนะของขึ้นส่วน	หรือผลิตภัณฑ์ทั้งหมดอาจต้องมี การแก้ไขใหม่ หรือขึ้นส่วนงาน ขนัตถูกนำไปแก้ไขนอก สายการผลิตโดยไม่ต้องส่งไป แผนกซ่อม	5
ต่ำมาก	ความพอดี และความเรียบร้อย ไม่เป็นไปตามความต้องการ มี เสียงรบกวน หรือเกิดเสียงดัง ลูกค้าส่วนใหญ่ (มากกว่า 75%) สามารถสังเกตเห็นข้อบกพร่อง นี้	หรือผลิตภัณฑ์อาจถูกคัดเลือกโดย ไม่มีการทิ้ง และมีบางส่วน (น้อย กว่า 100%) ถูกนำไปแก้ไขใหม่	4
เล็กน้อย	ความพอดี และความเรียบร้อย ไม่เป็นไปตามความต้องการ มีเสียงรบกวนหรือเกิดเสียงดัง ครึ่งหนึ่งของลูกค้าสามารถ สังเกตเห็นข้อบกพร่องนี้	ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) อาจถูกแก้ไขใหม่ โดยไม่มี การทิ้ง การแก้ไขจะทำที่ สายการผลิต แต่นอกสถานีนงาน	3

ตารางที่ 2-3 การจัดอันดับความรุนแรง (ต่อ)

ผลกระทบ	ภาวะรุนแรงของผลกระทบ ต่อลูกค้า	ภาวะรุนแรงของผลกระทบ ต่อการผลิตหรือการประกอบ	อันดับ
เล็กน้อยมาก	ความพอดี และความเรียบร้อย ไม่เป็นไปตามความต้องการมี เสียงรบกวน หรือเกิดเสียงดัง ลูกค้าส่วนหนึ่ง (25%) สามารถ สังเกตเห็นข้อบกพร่องนี้	หรือผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อย กว่า 100%) อาจถูกแก้ไขใหม่ โดย ไม่มีการทิ้ง การแก้ไขจะทำ ณ จุด ทำงานในสถานีนงาน	2
ไม่มี	ไม่มีผลกระทบใด ๆ	หรือทำให้พนักงาน หรือการ ทำงานเกิดความไม่สะดวก เล็กน้อย โดยไม่มีผลกระทบต่อ คุณภาพงาน หรือไม่มีผลกระทบ ใด ๆ	1

ตารางที่ 2-4 การจัดอันดับการตรวจพบ

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภท ของการ ตรวจสอบ			วิธีการตรวจจับ	อันดับ
		A	B	C		
เกือบเป็นไป ไม่ได้	ไม่สามารถ ตรวจจับ ข้อบกพร่องได้			×	ไม่สามารถตรวจจับหรือตรวจ สอบได้	10
ห่างไกลมาก	การควบคุมอาจจะ ไม่สามารถตรวจ พบข้อบกพร่องได้			×	การควบคุมหมายถึงการใช้วิธี การตรวจทางอ้อม หรือใช้วิธี การสุ่มตรวจสอบ	9

ตารางที่ 2-4 การจัดอันดับการตรวจพบ (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภทของการตรวจสอบ			วิธีการตรวจจับ	อันดับ
		A	B	C		
ห่างไกล	มีความเป็นไปได้ น้อยที่การควบคุม			×	ควบคุมโดยการตรวจสอบด้วย สายตาเท่านั้น (Visual Check)	8
น้อยมาก	จะสามารถตรวจ พบข้อบกพร่องได้			×	ควบคุมโดยการตรวจสอบซ้ำ ด้วยสายตา (Double Visual Check)	7
ต่ำ	การควบคุมอาจจะ ตรวจพบได้		×	×	ควบคุมได้โดยการใช้วิธีทาง สถิติ	6
ปานกลาง			×		ควบคุมด้วยการใช้ Gauge ตรวจสอบชิ้นงาน 100% หลังจากที่งานออกมาจาก สายการผลิตแล้ว (ตรวจพบ หลังจากที่งานออกมาจาก สายการผลิตแล้ว	5
ปานกลาง ค่อนข้างสูง	การควบคุมมี โอกาสตรวจสอบ ข้อผิดพลาดได้	×	×		มีการตรวจจับความผิดพลาด ในระหว่างการทำงาน	4
ปานกลาง ค่อนข้างสูง	การควบคุมมี โอกาสตรวจสอบ ข้อผิดพลาดได้	×	×		หรือมีการใช้ Gauge ในช่วงที่ ทำการ Set Up และมีการ ตรวจสอบ First-Piece (สำหรับกรณี Set Up เท่านั้น)	4

ตารางที่ 2-4 การจัดอันดับการตรวจพบ (ต่อ)

การตรวจพบ	เกณฑ์	ประเภท ของการ ตรวจสอบ			วิธีการตรวจจับ	อันดับ
		A	B	C		
สูง	การควบคุมมี โอกาสสูงมากที่ จะตรวจสอบข้อ ผิดพลาด	×	×		มีการตรวจจับในสายการผลิต หรือเป็นการตรวจจับความ ผิดพลาดในระหว่างการทำงาน โดยมีการกรองหลายชั้นในการ ยอมรับงานตั้งแต่การส่งมอบ เลือกติดตั้ง ทวนสอบ โดยไม่ ยอมรับชิ้นส่วนที่ผิดพลาด	3
สูงมาก	การควบคุมมี โอกาสตรวจจับ ข้อผิดพลาดได้ ค่อนข้างแน่นอน	×	×		มีการตรวจจับความผิดพลาด ในสถานีนงาน มีระบบอัตโนมัติ ในการตรวจ และมีระบบ อัตโนมัติในการตรวจ และมี ระบบอัตโนมัติในการหยุด ข้อขัดข้อง โดยสามารถดักจับ ชิ้นงานที่มีปัญหาไม่ให้ส่งผ่าน ไปได้	2
สูงมาก	การควบคุมมี โอกาสตรวจจับ ข้อผิดพลาดได้ แน่นอน	×			ชิ้นงานที่มีปัญหาไม่สามารถ ถูกผลิตขึ้นมาได้ เพราะมีการ ป้องกันความผิดพลาดตั้งแต่ การออกแบบกระบวนการ หรือผลิตภัณฑ์แล้ว	1

ตารางที่ 2-5 การจัดอันดับความถี่

โอกาสเกิดขึ้น		อัตราข้อบกพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้น	C_{pk}	อันดับ
สูงมาก	เกิดข้อผิดพลาด	≥ 100 ใน 1000	< 0.55	10
	เสมอ	50 ใน 1000	≥ 0.55	9
สูง	เกิดข้อผิดพลาด	20 ใน 1000	≥ 0.78	8
	บ่อย ๆ	10 ใน 1000	≥ 0.86	7
ปานกลาง	เกิดข้อผิดพลาด	5 ใน 1000	≥ 0.94	6
	เป็นครั้งคราว	2 ใน 1000	≥ 1.00	5
		1 ใน 1000	≥ 1.10	4
ต่ำ	เกิดข้อผิดพลาด	0.5 ใน 1000	≥ 1.20	3
	เล็กน้อย	0.1 ใน 1000	≥ 1.30	2
ห่างไกล	แทบจะไม่เกิดข้อผิดพลาดเลย	≤ 0.01 ใน 1000	≥ 1.67	1

ขั้นตอนที่ 6 วางมาตรการการปรับปรุง โดยจัดลำดับความสำคัญตามค่า RPN จากค่ามากไปค่าน้อย (ตัวเลขยิ่งน้อยยิ่งดี ถ้ายิ่งมากต้องรีบหามาตรการดำเนินการแก้ไขหรือป้องกัน)

ขั้นตอนที่ 7 ทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการติดตามผลและทบทวนค่า RPN ใหม่ เทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ จะใช้เมื่อข้อบกพร่องมีโอกาสดังขึ้นเป็นจำนวนมาก และยากที่จะตัดสินใจว่าควรจัดการกับปัญหาข้อใดก่อน การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบควรนำมาใช้กับงานใหม่ สินค้าชนิดใหม่ กระบวนการใหม่ เพื่อลดความผิดพลาด หรือโอกาสในการเกิดลักษณะข้อบกพร่องเมื่อมีการผลิตจริง โดยประโยชน์ของการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบนั้น เพื่อให้ทราบปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้น ทำให้สามารถออกแบบและวางแผนควบคุมก่อนที่ปัญหาเกิดได้อย่างถูกต้อง ลดความเสี่ยงในการผลิต การประกอบ และการใช้งานผลิตภัณฑ์ และเป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการ เพราะการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องเป็นเอกสารที่ต้องมีการแก้ไข ปรับปรุงให้เหมาะสมกับสถานการณ์ตลอดเวลา

5. การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการทดลอง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ และหาข้อหาข้อสรุปว่าปัจจัยนำเข้า (Input) ใด ๆ ที่มีผลต่อสิ่งที่จะให้ ความสนใจในกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการออกแบบการทดลองจะมีขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอนคือ การศึกษาปัญหา การกำหนด Response ที่ต้องการศึกษา การกำหนดปัจจัยที่ต้องการ ควบคุม และระดับของปัจจัย การกำหนดรูปแบบการทดลอง การทดลองและการเก็บข้อมูล การ วิเคราะห์ข้อมูล การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาปัญหา โดยในขั้นตอนนี้ผู้วิเคราะห์ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไร ต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง เพื่อกำหนดเป้าหมายในการศึกษาให้ชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนนี้ บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจกระบวนการ ได้ดียิ่งขึ้น และนำไปสู่แนวทางการ แก้ปัญหาในที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนด Response ที่ต้องการศึกษา เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้อง กำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่มั่นใจได้ว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงของกระบวนการที่ ทำการศึกษาอยู่ อาจเป็นผลมาจากการทำ SPC ทั้งนี้ต้องมั่นใจว่าระบบการวัดมีคุณภาพเพียงพอ เนื่องจากระบบการวัดที่ไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response ไม่ชัดเจน เพราะผลการทดลองจะบ่งชี้ความแตกต่างของผลของปัจจัยได้เฉพาะปัจจัยที่ส่งผลสูง ๆ เท่านั้น ในขณะที่ปัจจัยที่ส่งผลระดับต่ำถึงปานกลางจะไม่สามารถแบ่งแยกได้

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และระดับของปัจจัย เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำ การทดลองต้องเลือกปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อ Response พร้อมทั้งระดับของแต่ละปัจจัยที่ ปรับเปลี่ยนได้ โดยต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสภาพการดำเนินการจริง ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูล จากผู้เชี่ยวชาญและประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ หากกำหนดจำนวนปัจจัยและระดับ ของปัจจัยไม่ครอบคลุมจะทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริง ในขณะที่ การกำหนดมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนและเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีจำนวน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ผู้ทำการทดลองสามารถคัดกรองปัจจัยที่ต้องการการทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment) ก่อนที่จะทำการทดลองโดยละเอียดกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริงต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การกำหนดรูปแบบการทดลอง โดยเมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยาก ผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบ (Design) ของการทดลอง ซึ่งรวมถึงขนาด ตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (จำนวน Replication) การกำหนดลำดับการทดลอง อย่างสุ่ม เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 การทดลองและการเก็บข้อมูล โดยผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูลจะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่มจะส่งผลให้อิทธิพลของ Noise Factor ไม่กระจายเฉลี่ย ทำให้ผลการทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้าหรือครั้งอื่น ๆ (ไม่อิสระต่อกัน) หรือมี Autocorrelation ระหว่างข้อมูลจากการทดลองเป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 การวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิ การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์มีซอฟต์แวร์ทางสถิติช่วยในการวิเคราะห์หลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติเพื่อการแปลความหมายที่ถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง โดยเมื่อทราบผลการวิเคราะห์การสรุปผลและการนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือ เช่น แผนภูมิเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ควรมีผลการทดลองเพื่อยืนยันข้อเสนอแนะการปรับปรุงก่อนการประยุกต์ใช้จริง นอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือ SPC ที่เหมาะสมต่อไปด้วย

โดยขั้นตอนทั้งหมดนั้น ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 เป็นขั้นตอนเตรียมการทดลอง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้น และได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือนำไปสู่การปรับปรุงได้อย่างแท้จริง โดยการดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 7 สามารถทำเป็นรอบ ๆ ได้จากการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย ซึ่งการทดลองโดยละเอียดเพื่อบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response อย่างแท้จริง และการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่มีผลอย่างเหมาะสม

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อ Response ได้ทั้งแบบ Main Effect และ Interaction แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ต้องการเวลาและทรัพยากรในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อปัจจัยมากขึ้น การออกแบบอาจแบ่งเป็นสองลักษณะตามลำดับของแต่ละปัจจัย คือเมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้นไป โดยในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องคือ

ระดับของปัจจัย A สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., a แทนด้วย i

ระดับของปัจจัย B สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., b แทนด้วย j

ระดับของปัจจัย C สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., c แทนด้วย k

.....
จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ หรือ Replication แทนด้วย n

ผลการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B, และ C ระดับ i, j , และ k

ความล่าช้าครั้งที่ n แทนด้วย Y_{ijkn}

ตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองกรณี 2 ปัจจัย A จำนวน a ระดับ และปัจจัย B จำนวน b ระดับจะได้ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ตัวอย่างข้อมูลของการทดลอง 2 ปัจจัย

		ปัจจัย B			
		1	2	...	b
ปัจจัย A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$...	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$...	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	A	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$...	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

ในการออกแบบการทดลองผู้วิเคราะห์ต้องการทราบว่าปัจจัยได้บ้างส่งผลต่อ Response อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประเมินได้จากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยแล้วทำให้ Response เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบ Response เมื่อมีประชากรมากกว่า 2 กลุ่มนั่นเอง ดังนั้นการวิเคราะห์จึงทำได้โดยการประยุกต์หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

ข้อมูลจากตารางที่ 7 เมื่อ y_{ijk} แทน Response จากการทดลองที่ระดับ i^{th} ของปัจจัย A ระดับปัจจัย j^{th} ของปัจจัย B ครั้งที่ k^{th} ซึ่งจะมีข้อมูลทั้งหมด abn ตัว จากการทดลองด้วยลำดับแบบสุ่ม abn ครั้ง ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อ Response คงที่ และ Response จากการทดลองสามารถแทนได้ด้วยตัวแบบทางสถิติดังสมการที่ 2-4

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-4)$$

เมื่อ μ แทน ค่าเฉลี่ยรวมของ Response
 τ_i แทน อิทธิพลของปัจจัย A ที่ระดับที่ i^{th}
 β_j แทน อิทธิพลของปัจจัย B ที่ระดับที่ j^{th}
 $(\tau\beta)_{ij}$ แทน อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B ที่ระดับ i^{th} และ j^{th}
 ε_{ijk} แทน ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลองที่ระดับ $i^{\text{th}}, j^{\text{th}}$ ครั้งที่ k^{th}

โดย ε_{ijk} จะต้องมีแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 หรือ $NID(0, \sigma^2)$ ซึ่งอธิบายได้ว่าหากการทดลองเป็นไปแบบสุ่มแล้ว ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมอื่น ๆ จะต้องกระจายกับ Response ทุก ๆ ตัว ซึ่งอาจสูงบ้างต่ำบ้าง แต่โดยเฉลี่ยแล้วความคลาดเคลื่อนทางด้านสูงและต่ำควรสมดุลกัน และความคลาดเคลื่อนจากการทดลองแต่ละครั้งจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

สมการที่ 2-4 อธิบายได้ว่าค่าของ Response จากการทดลองแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับ อิทธิพลหลักของปัจจัย A และ B และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย AB ซึ่งแทนได้ด้วย $\tau_i, \beta_j,$ และ $(\tau\beta)_{ij}$ ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ซึ่งต้องการทดสอบสมมติฐานว่า อิทธิพลของปัจจัย A มีผลหรือไม่ อิทธิพลของปัจจัย B มีผลหรือไม่ และอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่ โดย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

อิทธิพลของปัจจัย A มีผลหรือไม่

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots, \tau_a$$

$$H_1: \tau_i \neq \tau_j; i \neq j \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลของปัจจัย B มีผลหรือไม่

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots, \beta_b$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_j; i \neq j \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลของปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots, (\tau\beta)_{ab}$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq (\tau\beta)_{kl}; ij \neq kl \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

โดยถ้าปัจจัย A ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Response แล้วจะได้ค่า τ_i ต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อทดสอบสมมติฐานก็จะไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ สำหรับปัจจัย B และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะต้องประเมินผลรวมกำลังสอง (Sum of Square, SS) ของความผันแปรเป็นดัชนีความผันแปร โดยความผันแปรรวม (Total Variation) ซึ่งประเมินจาก Sum of Square of Total (SS_T) จะประกอบด้วยความผันแปรจากปัจจัย ประเมินจาก Sum of Square of Treatment (SS_T) และความผันแปรความผิดพลาดของการทดลองหรือปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งควบคุม "ไม่ได้" ประเมินจาก Sum of Square of Error (SS_E) โดยแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-4

สิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบการทดลอง คือต้องทำตามลำดับการสุ่มจากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้การทดลองที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ได้ อย่างน่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง โดยผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ

6. สมการถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regressions)

สมการเชิงซ้อน เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว และตัวแปรตาม 1 ตัว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้เป็นความสัมพันธ์ อยู่ในรูปของ สมการเส้นตรง ใช้อธิบายและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง Y มากที่สุด เมื่อ Y คือตัวแปรตาม สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 2-5

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (2-4)$$

เมื่อ Y	แทน ตัวแปรตาม
x_1, x_2, x_3, \dots	แทน ตัวแปรอิสระ
β_0	แทน จุดตัดบนแกน Y
$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$	แทน ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Regression Coefficient)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยในอุตสาหกรรมยานยนต์

พิชิต สุขเจริญพงษ์ (2553) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการพ่นสีรถยนต์ เพื่อเสนอระดับที่เหมาะสมในการพ่นสีรถยนต์ และช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายจากการพ่นซ่อมชิ้นงานในกระบวนการผลิตลง โดยก่อนทำการศึกษาพบว่าค่าความสว่างที่วัดได้จากกระบวนการพ่นสีรถยนต์มีค่าไม่ตรงตามค่ามาตรฐาน ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นจากการพ่นซ่อมชิ้นงานที่บกพร่องที่เกิดจากความต่างของเฉดสีหลังการพ่นไม่คงที่ ดังนั้นจึงได้ทำการการศึกษากระบวนการดังกล่าวโดยอาศัยความรู้ และความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญ รวมถึงเอกสารที่เกี่ยวข้อง โดยจากการศึกษาพบว่า มีปัจจัยที่มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความสว่างของสีคือ ความหนืด อัตราการไหล ความดันลม และระยะห่างในการพ่น โดยทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป พบว่าความหนืด อัตราการไหล ความดันลม และระยะห่างในการพ่นมีผลต่อค่าความสว่างของสีบรอนซ์เงินอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และนำ 4 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ค่าความสว่างมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากขึ้น เมื่อเทียบกับก่อนการปรับปรุงซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ และเพิ่มความสามารถของกระบวนการพ่นสีรถยนต์

2. งานวิจัยในอุตสาหกรรมเคมี

อนันต์ เศรษฐพฤทธิ (2548) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในปฏิกิริยาการรีฟอร์มเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ซึ่งประกอบแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลคือ คือ อุณหภูมิ (300 และ 500 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล (3:1 และ 6:1) เวลาสัมผัส (0.5 และ 1.0 มิลลิวินาที) ของตัวเร่งปฏิกิริยา-นาที่ต่อผลิตภัณฑ์ของสารตั้งต้น) และตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล-อะลูมินา และ นิกเกิล-แมกนีเซีย) โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เมื่อ k คือ จำนวนปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น และหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยานี้ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ อุณหภูมิสูง เวลาสัมผัสสูง อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอลต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-อะลูมินา และอุณหภูมิสูง อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอลสูง เวลาสัมผัสต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-แมกนีเซีย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง

วีรเทพ เฉลิมสมิทธิชัย (2550) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการปรับปริมาณธาตุที่เป็นส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กที่ใช้ในการผลิตแท่งเหล็กดิบ เพื่อศึกษาปริมาณธาตุที่จะทำให้เกิดความบกพร่องของเหล็กดิบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ที่ส่งผลให้เหล็กหล่อที่ผลิตจากเหล็กดิบนี้มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด โดยจากการศึกษาพบว่า มีปัจจัยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อ คือ ปริมาณคาร์บอน ปริมาณแมงกานีส ปริมาณกำมะถัน ปริมาณซิลิกอน และปริมาณฟอสฟอรัส โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เมื่อ k คือ จำนวนปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งผลการศึกษาที่ระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัส ไม่มีระดับนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อ และเมื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อมาทำการออกแบบการทดลองอีกครั้ง โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะได้สมการถดถอยของปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรง คือ $Y = 50.64 + 1.25A + 0.75B + 0.13C + 0.15D$ โดยได้คำตอบของสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรง (Y) มากที่สุดคือ ปริมาณคาร์บอน (A) ที่ 0.20 %/kg ปริมาณแมงกานีส (B) ที่ 0.60 %/kg ปริมาณกำมะถัน (C) ที่ 0.05 %/kg และปริมาณซิลิกอน (D) ที่ 0.50 %/kg เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ ในกระบวนการทำงานจริง ไม่พบความบกพร่องที่เกิดขึ้นบนเหล็กดิบ และเมื่อนำเหล็กดิบไปผลิตเป็นเหล็กหล่อ พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเหล็กหล่อที่ได้จะมีค่าระหว่าง 52.34 kg/mm^2 ถึง 55.08 kg/mm^2 ซึ่งผลวิจัยนี้สามารถลดความบกพร่องของเหล็กดิบได้ 100%

3. งานวิจัยในอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไป

พิทักษ์ พนาวาน (2550) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์กาวที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นรองสินค้าที่อัดจากฟางข้าวและใยมะพร้าวในอัตราส่วนร้อยละ 50 ต่อ 50 เพื่อศึกษาหาร้อยละของปริมาณกาวที่เหมาะสมในการผลิต การทนต่อแรงดึง และการทนต่อแรงกระแทกของแผ่นรองสินค้า โดยจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ร้อยละของกาวที่อัดเส้นใย อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อนในเวลา 4 นาที โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อต่อเปอร์เซ็นต์กาวที่เหมาะสม คือ ร้อยละของกาวที่อัดเส้นใย (ร้อยละ 12, 16, 20 และ 25 โดยน้ำหนักเส้นใยแห้ง) และอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปร้อน (150 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส) และเมื่อพิจารณาจากสมบัติการต้านทางแรงดึงและแรงกระแทกของแผ่นรองสินค้าที่ผลิตได้ พบว่าสมบัติการต้านทางแรงดึงมีค่าอยู่ระหว่าง 1185.7 MPa ถึง 3106.5 MPa และสมบัติการต้านทางแรงกระแทกมีค่าอยู่ระหว่าง 14.34 J/m ถึง 33.09 J/m โดยค่าการต้านทางแรงดึงและแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นและปริมาณกาวเพิ่มขึ้น

ประเสริฐ ชุมปัญญา (2554) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปรีออนด้วยระบบสูญญากาศสำหรับพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตรซึ่งปัญหาที่พบในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปรีออนสูญญากาศ คือ มีความหนาไม่สม่ำเสมอ โดยจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความหนาของชิ้นงาน คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการสูญญากาศ ระยะเวลาในการให้ลมเป่า และ ระยะเวลาในการให้ลมเย็น โดยทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง (Single Replicate) ซึ่งผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิในการให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 34 วินาที ระยะเวลาสูญญากาศ 36 วินาที ระยะเวลาให้ลมเป่า 19 วินาที และให้ลมเย็น 9 วินาที จะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้) มีความหนาเพิ่มขึ้น

Dong-Woo Kim (2008) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงผลึกในการเจาะรูระดับไมโคร เพื่อลดแรงผลึกในการเจาะรูระดับไมโครสำหรับกระบวนการสิ่งทอในปัจจุบัน โดยจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจาะรูมี 3 ชนิด คือ อัตราการป้อน ขั้นตอนการป้อน และความเร็วในการตัด โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $L_{27}(3^3)$ และใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า อัตราการป้อน ขั้นตอนการป้อน และความเร็วในการตัด เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสถานะการเจาะรู และพบว่าอัตราการป้อนมีผลกระทบมากที่สุด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการเจาะรู

M. I. Hussain, Z. M. Zain และ M. S. Salleh (2009) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษารอยขุ่นและการแบ่งเป็นชั้นบนส่วนประกอบของแผ่นกระดาษ ซึ่งวัสดุที่เป็นส่วนประกอบที่ไม่เหมือนกันสองชนิดหรือมากกว่า ด้วยเทคโนโลยีที่หลากหลายในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ และใช้ระบบการผลิตแบบใช้มือจัด (Hand-Lay-Up) แผ่นกระดาษกับสายการผลิตที่มีเทคโนโลยีสูง โดยจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ทำให้เกิดรอยขุ่นและการแบ่งเป็นชั้นบนส่วนประกอบของแผ่นกระดาษ คือ อุณหภูมิ ความดัน เวลาการจุ่ม อัตราการให้ความร้อน อัตราการหล่อเย็น และขนาดมิติของชิ้นส่วน โดยทำการออกแบบการทดลอง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยการลดของเสียของผลิตภัณฑ์ให้มีน้อยที่สุด ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผล คือ อุณหภูมิ ความดัน เวลาการจุ่ม อัตราการให้ความร้อน อัตราการหล่อเย็น และขนาดมิติของชิ้นส่วน โดยหลังจากการทดลองสามารถคาดการณ์ที่ตั้งกระบวนการ ได้อย่างดี รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการ

A. Vairis (2009) ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษากระบวนการเชื่อม โดยใช้วิธีของทาคุชิ โดยจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานตามแนวจากการเชื่อม คือ ความถี่ของการแกว่ง พลังงานที่จ่าย และแรงดันที่ใช้ โดยทำการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi method of factorial design of experiments) ซึ่งจำนวนครั้งของการทดลองสามารถลดปัจจัยที่สำคัญทางสถิติ และสามารถกำหนดปัจจัยที่จำเป็นได้ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ความถี่ของการแกว่ง และพลังงานที่จ่าย ไม่มีผลต่อแรงเสียดทานตามแนวจากการเชื่อม มีเพียงแรงดันที่ใช้เท่านั้นที่มีผลต่อแรงเสียดทานตามแนวจากการเชื่อมของ Ti6Al4V

บทที่ 3

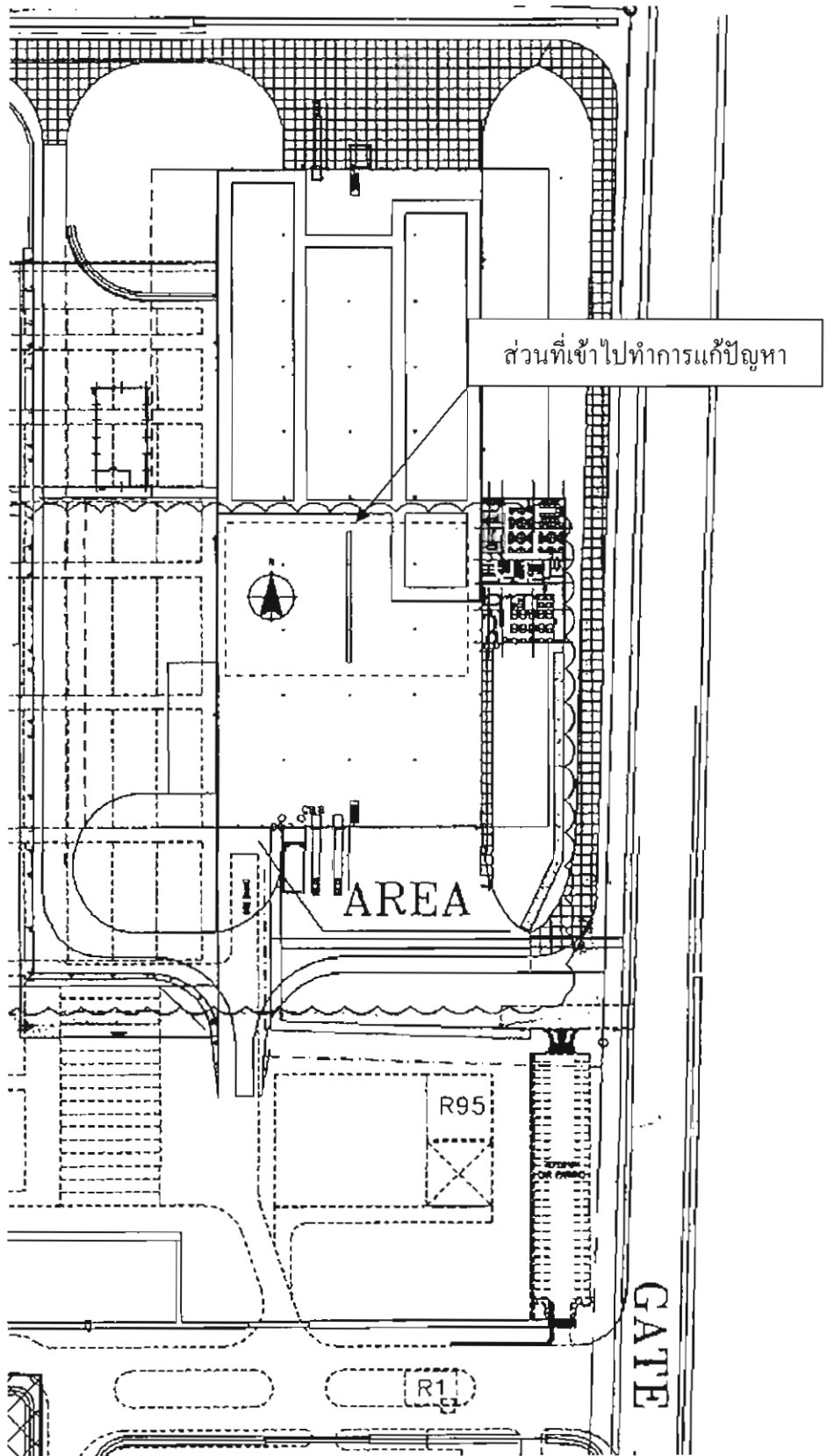
วิธีการดำเนินการวิจัย

ข้อมูลทั่วไปของสถานประกอบการ

1. ข้อมูลทั่วไปของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษา คือ บริษัท เจนเนอรัล มอเตอร์ส พาวเวอร์เทรน (ประเทศไทย) จำกัด ก่อตั้งขึ้นเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2551 ในพื้นที่กว่า 9 ไร่ ภายใต้พื้นที่ของศูนย์การผลิตรถยนต์เซฟโรเลต บริษัท เจนเนอรัล มอเตอร์ส (ประเทศไทย) จำกัด ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง โดยศูนย์การผลิตเครื่องยนต์ดีเซลแห่งนี้ ได้พัฒนาและผลิตเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับรถเซฟโรเลต เพื่อจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ โดยบริษัท เจนเนอรัล มอเตอร์ส พาวเวอร์เทรน (ประเทศไทย) จำกัด มีศักยภาพในการผลิตเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 2.5 ลิตร และ 2.8 ลิตร มากกว่า 100,000 เครื่องต่อปี ด้วยแรงงาน และผู้เชี่ยวชาญ 400 คน ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลนี้ได้รับการออกแบบ และพัฒนาโดยบริษัท เจนเนอรัล มอเตอร์ส และบริษัท วีเอ็ม มอเตอร์ริ เอสพี เอ ประเทศอิตาลี

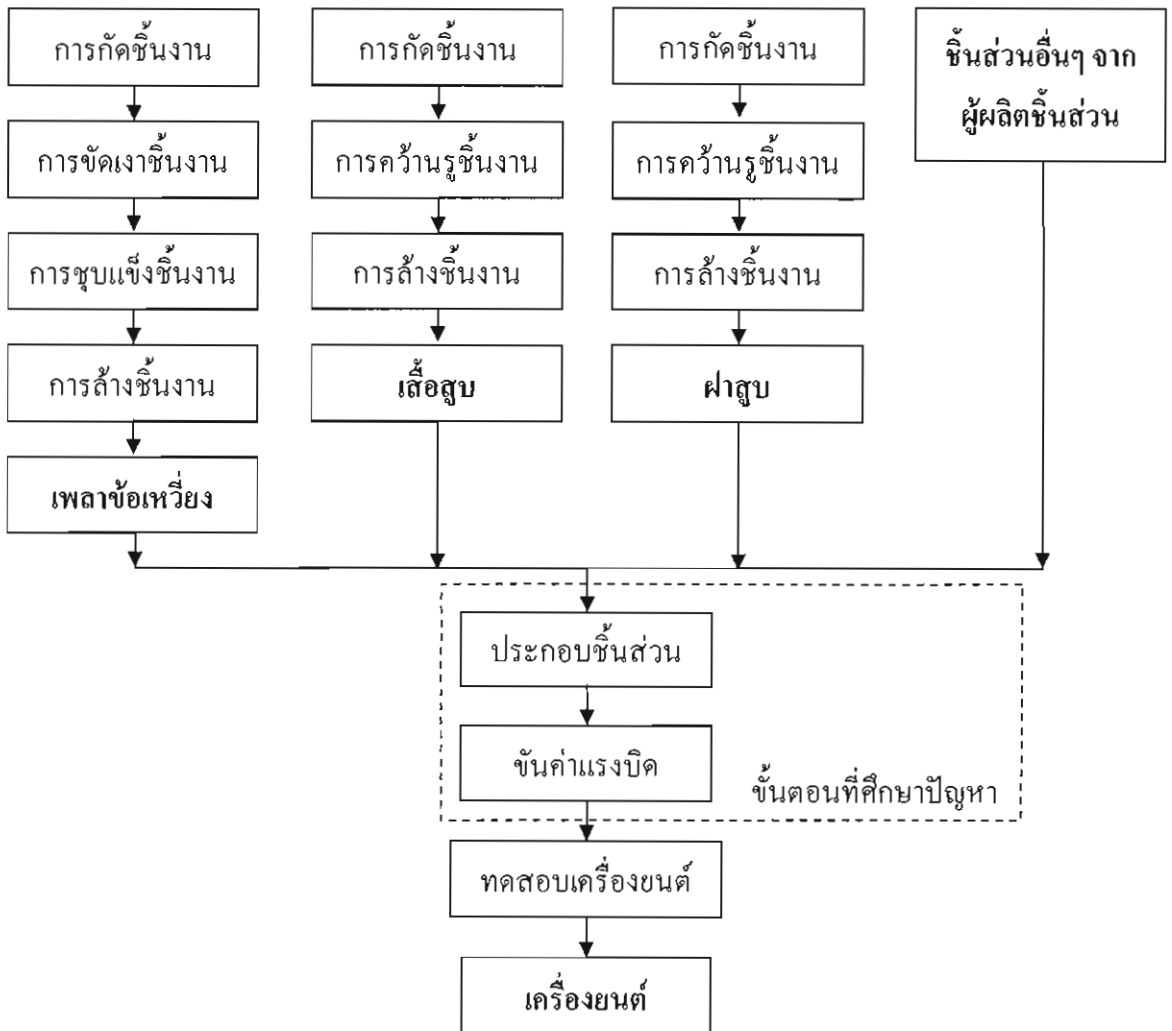
ส่วนงานของฝ่ายผลิตจะประกอบด้วย ส่วนขึ้นรูปเพลาช้อเหวี่ยง (Crankshaft Machining) ส่วนขึ้นรูปฝาสูบและเสื้อสูบ (Cylinder Head and Block Machining) และสายการประกอบเครื่องยนต์ (Engine Assembly Line) ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการแก้ไขปัญหาในการประกอบชิ้นงานเข้ากันด้วย โบลท์ในแต่ละส่วนของสายการประกอบเครื่องยนต์ ดังแสดงดังภาพที่ 3-1 โดยกระบวนการประกอบเครื่องยนต์โดยรวมจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 3-1 แผนผังโรงงาน

2. กระบวนการประกอบเครื่องยนต์โดยรวม

กระบวนการประกอบเครื่องยนต์นั้น เริ่มจากกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนหลักสามชิ้นส่วนคือ เพลาค้อเหวี่ยง ฝาสูบ และเสื้อสูบ จากนั้นนำไปประกอบที่สายการประกอบเครื่องยนต์ เพื่อประกอบเข้ากับชิ้นส่วนต่าง ๆ จากผู้ผลิตชิ้นส่วนภายนอก และเนื่องจากในกระบวนการมีปัญหาโบลท์ที่ใช้ประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันเกิดการขาดระหว่างกระบวนการขันแรงบิด ผู้วิจัยจึงเข้าไปศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการขันแรงบิด เพื่อหาแนวทางแก้ไข โดยมีกระบวนการผลิตดังภาพที่ 3-2 โดยผู้ทำการศึกษาได้ทำการศึกษาใน 2 กระบวนการ คือ กระบวนการประกอบชิ้นส่วนด้วยการขัน โบลท์ และกระบวนการขันค่าแรงบิดที่ใช้ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน



ภาพที่ 3-2 กระบวนการประกอบเครื่องยนต์

วิธีการดำเนินงาน

ผู้ทำงานศึกษาวางแผนการดำเนินงานได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษากระบวนการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาปัญหาในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วน และรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา และสรุปสาเหตุของปัญหา

ขั้นตอนที่ 4 การหาแนวทางการปรับปรุง

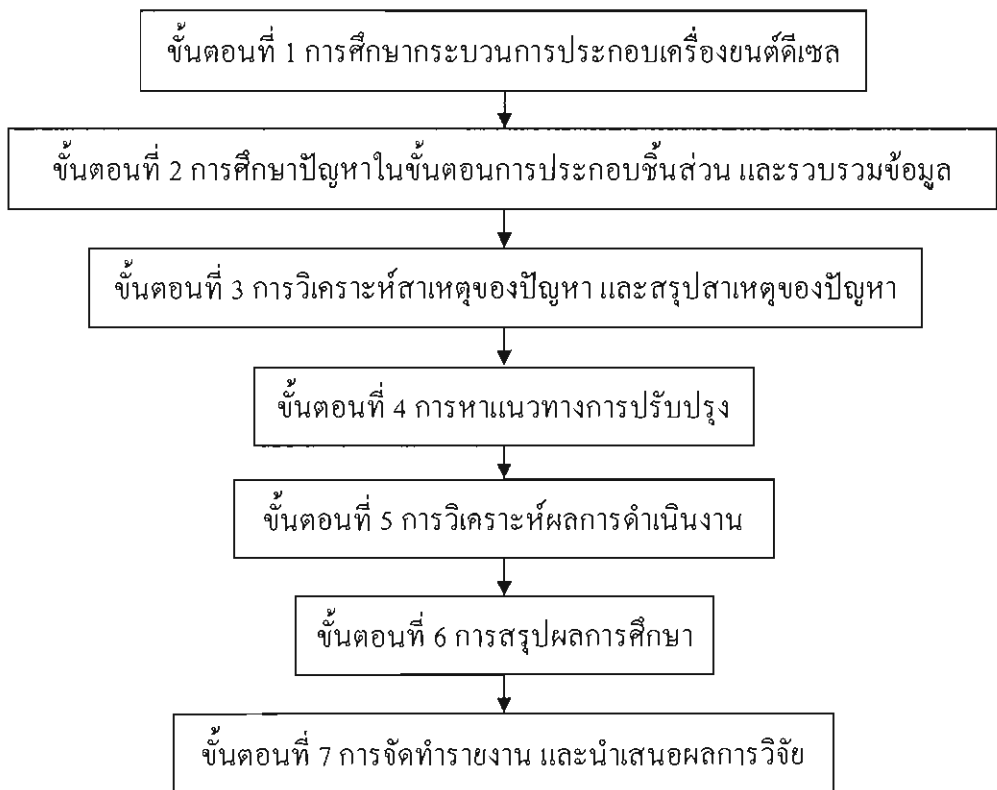
ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลการวิจัย

ขั้นตอนที่ 7 จัดทำรายงาน และนำเสนอรายงานการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานทั้ง 7 ขั้นตอน สามารถนำมาเขียนผังลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษาดังภาพที่ 3-3



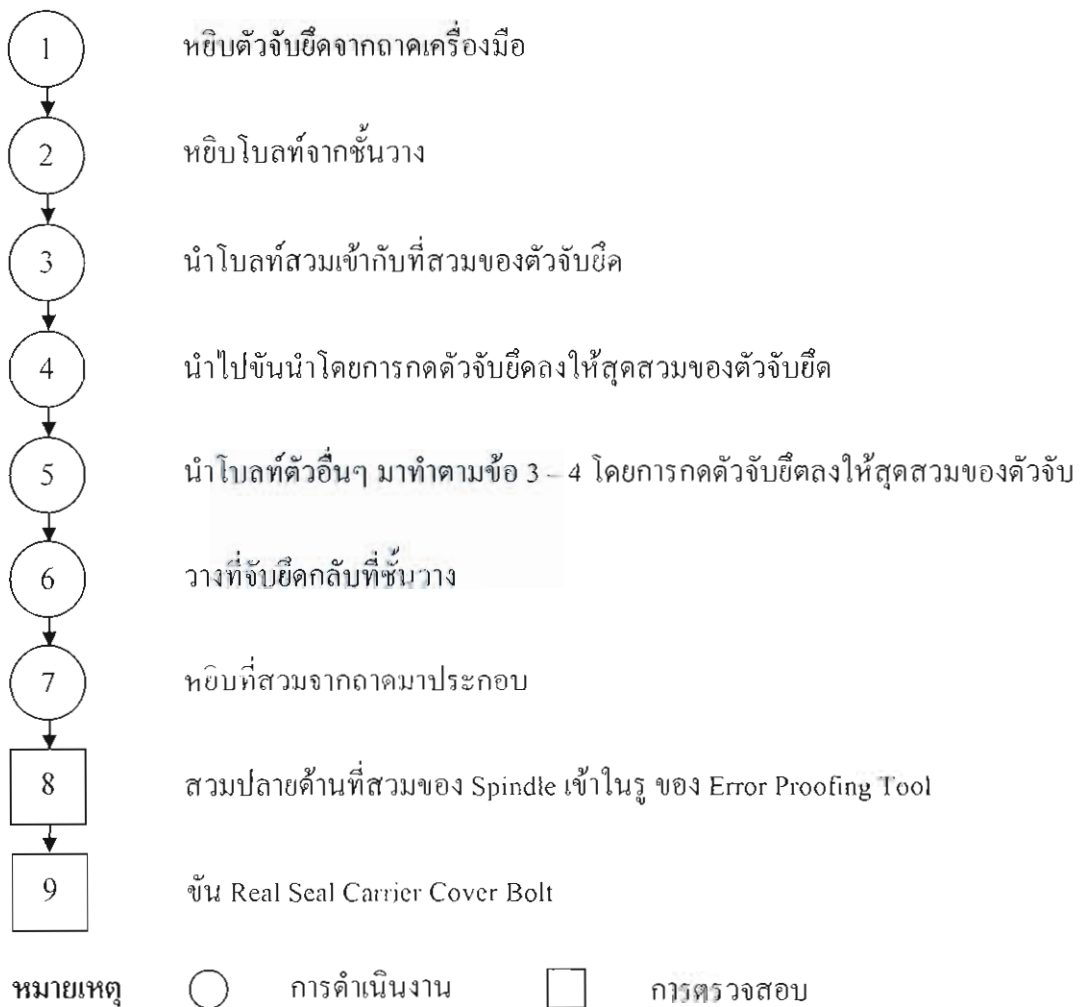
ภาพที่ 3-3 แผนผังลำดับขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

การดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานการศึกษาที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. การศึกษากระบวนการประกอบเครื่องยนต์ดีเซล

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษากระบวนการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน โดยการขันด้วยโบลท์ และการขันค้ำแรงบิดในกระบวนการผลิต โดยพบของเสียเป็น โบลท์ที่ขาดจากกระบวนการขันค้ำแรงบิด ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษขั้นตอนการประกอบชิ้นงาน โดย แสดงผังแผนภูมิกระบวนการไหลดังภาพที่ 3-4



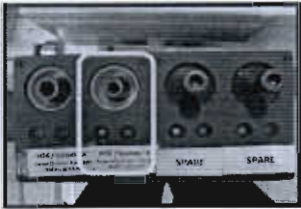


ภาพที่ 3-4 แผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน

แผนภูมิกระบวนการไหลข้างต้น สามารถแสดงรายละเอียดของวิธีการขัน โบลท์และขัน
 ค่าแรงบิดที่ใช้ในกระบวนการประกอบเครื่องยนต์ มีขั้นตอนที่แสดงดังตารางที่ 3-1 และ 3-2
 ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 วิธีการขัน โบลท์ที่ใช้ในกระบวนการประกอบเครื่องยนต์

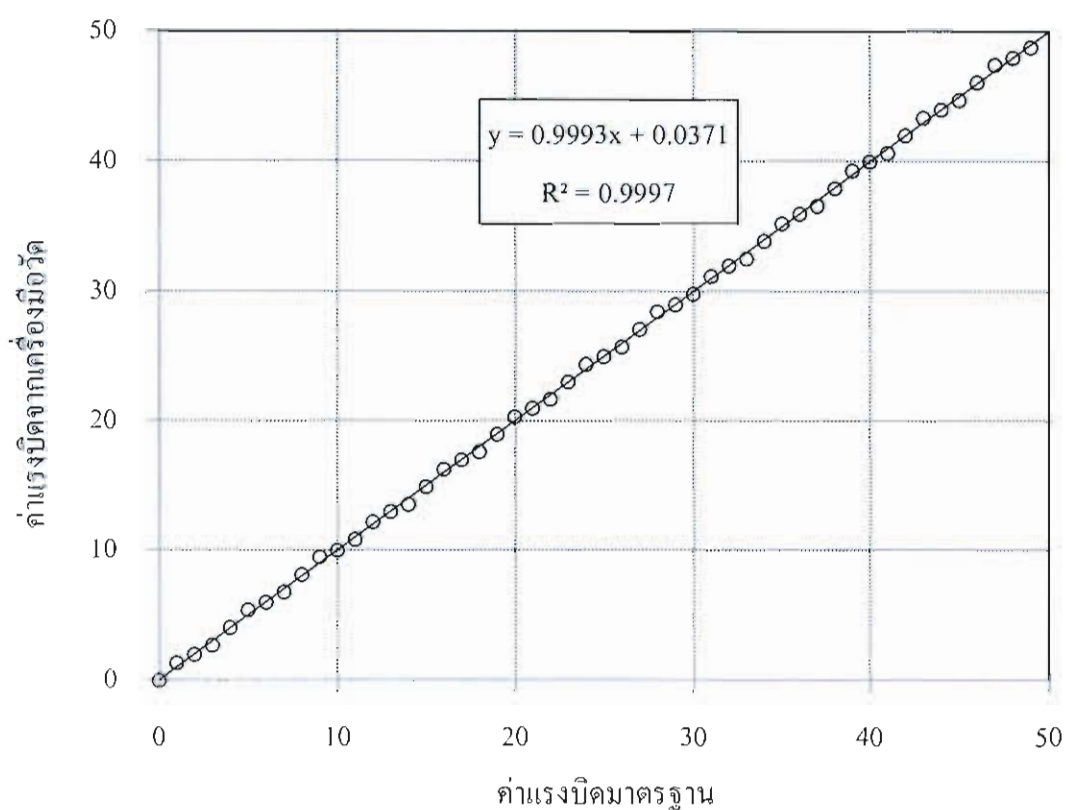
ลำดับงาน	ขั้นตอน	การปฏิบัติ	เหตุผล
1	หยิบตัวจับยึดจากถาด เครื่องมือ	หยิบด้วยมือขวา	
2	หยิบโบลท์ 6 ตัวจากชั้นวาง	หยิบด้วยมือซ้าย	
3	นำโบลท์ 1 ตัวสวมเข้ากับที่ สวมของตัวจับยึด	สวมเข้ากับที่สวมให้สุด	ป้องกัน โบลท์หล่น
4	นำไปขันน้าในตำแหน่งที่ 1 โดยการกดตัวจับยึดลงให้สุด	ตั้งตัวจับยึดให้ตรง	กัน โบลท์ป็นเกลียว ตอนขันน้า
5	นำโบลท์อีก 5 ตัวมาทำตาม ข้อ 3 - 4	ขันน้าตรงตำแหน่งที่ 2 - 6 ให้ครบ 5 ตัว	
6	วางที่จับยึดกลับที่ชั้นวาง		

ตารางที่ 3-2 วิธีการขันค่าแรงบิดที่ใช้ในกระบวนการประกอบเครื่องยนต์

ลำดับงาน	ขั้นตอน	การปฏิบัติ	เหตุผล
1	 <p>หีบที่สวมจากถาดมาประกอบกับ Single Spindle</p>	 <ul style="list-style-type: none"> - ตั้งเกตุสัญญาณไฟถาดที่สวมเมื่อหีบแล้วจะเปลี่ยนสี - ตรวจสอบสภาพ Single Spindle ก่อนใช้งาน 	 <ul style="list-style-type: none"> - ป้องกันการหีบที่สวมผิด - เพื่อให้พร้อมต่อการใช้งาน
2	<p>สวมปลายด้านที่สวมของ Spindle เข้าในรู ของ Error Proofing Tool</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Error Proofing จะมีไฟขึ้นที่จุดขัน เมื่อ - สวม Spindle เข้าไปในรู ไฟที่ด้ามเปลี่ยนสี 	<ul style="list-style-type: none"> - หมายถึงพร้อมใช้งาน
3	<p>ขัน Real Seal Carrier Cover Bolt ทั้ง 6 จุด</p>	<ul style="list-style-type: none"> - จับ Spindle ด้วยมือทั้ง 2 ข้างอย่างกระชับ - ขันแน่นตามลำดับสัญญาณไฟของ Error Proofing - ขันให้ครบ 6 จุด - จนครบแล้วไฟที่ Error Proofing จะดับหมดและไฟที่ด้าม Spindle เปลี่ยนสี 	<ul style="list-style-type: none"> - ป้องกันการสะบัดของ Spindle - ป้องกันการขันผิดลำดับงานเพื่อบ่งชี้ว่าขันครบลำดับงานแล้ว

การเข้าไปศึกษากระบวนการ ผู้วิจัยพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นในขั้นตอนการขัน Real Seal Carrier Cover โดยปัญหาที่พบคือ โบลท์จะขาด โดยที่ค่าแรงบิดยังไม่ถึงค่าที่กำหนด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการศึกษากระบวนการประกอบชิ้นงานขั้นตอนนี้เพียงขั้นตอนเดียว

ในกระบวนการขันค่าแรงบิดนั้น การวิเคราะห์ระบบการวัด เป็นสิ่งจำเป็นต่อค่าที่วัดได้ จากการควบคุมกระบวนการ ซึ่งทางบริษัทกรณีศึกษาได้มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดค่าแรงบิดในห้องปฏิบัติการ โดยทำการวัดค่าแรงบิดเทียบกับค่ามาตรฐานตั้งแต่ 0 ถึง 50 นิวตัน-เมตร ซึ่งเป็นค่าแรงบิดสูงสุดของเครื่องมือวัดค่าแรงบิดที่จะใช้ในการทดลอง โดยผลของการสอบเทียบแสดงดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 แผนภูมิที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิด

ค่าแรงบิดของเครื่องมือวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานในภาพที่ 3-5 พบว่า ค่าความชันมีค่าเท่ากับ 0.9993 ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 และค่า R-Square มีค่า 99.97% ซึ่งหมายความว่า ค่าแรงบิดของเครื่องมือวัดมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมาก จึงสรุปได้ว่าเครื่องมือวัดที่ใช้ในกระบวนการขันค่าแรงบิดมีความเสถียรสูง สามารถใช้ในการทดลองได้

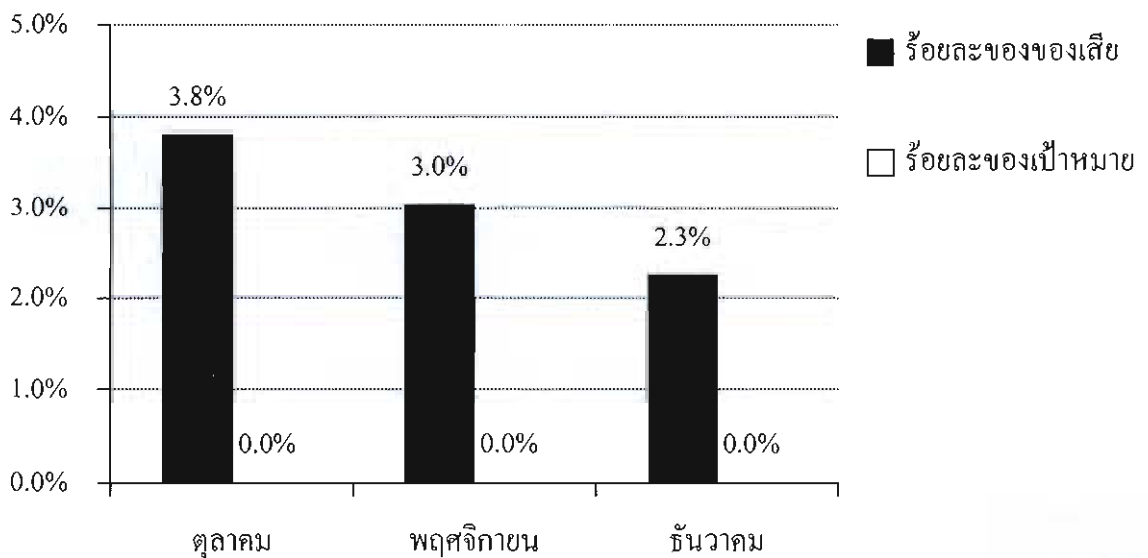
2. การศึกษาปัญหาในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วน และรวบรวมข้อมูล

การศึกษาข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา และศึกษากระบวนการผลิต บริษัทกรณีศึกษามีเป้าหมายของเสียต้องเป็นศูนย์ เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของลูกค้า ผู้วิจัยได้เข้าไปศึกษากระบวนการผลิต และเก็บข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการทั้งหมด 3 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม ถึงเดือนธันวาคม พุทธศักราช 2553 โดยพบว่ามียอดของเสียของเครื่องยนต์ก่อนที่จะทำการซ่อมแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 3-3 จำนวนของเสียที่เกิดจากการประกอบเครื่องยนต์

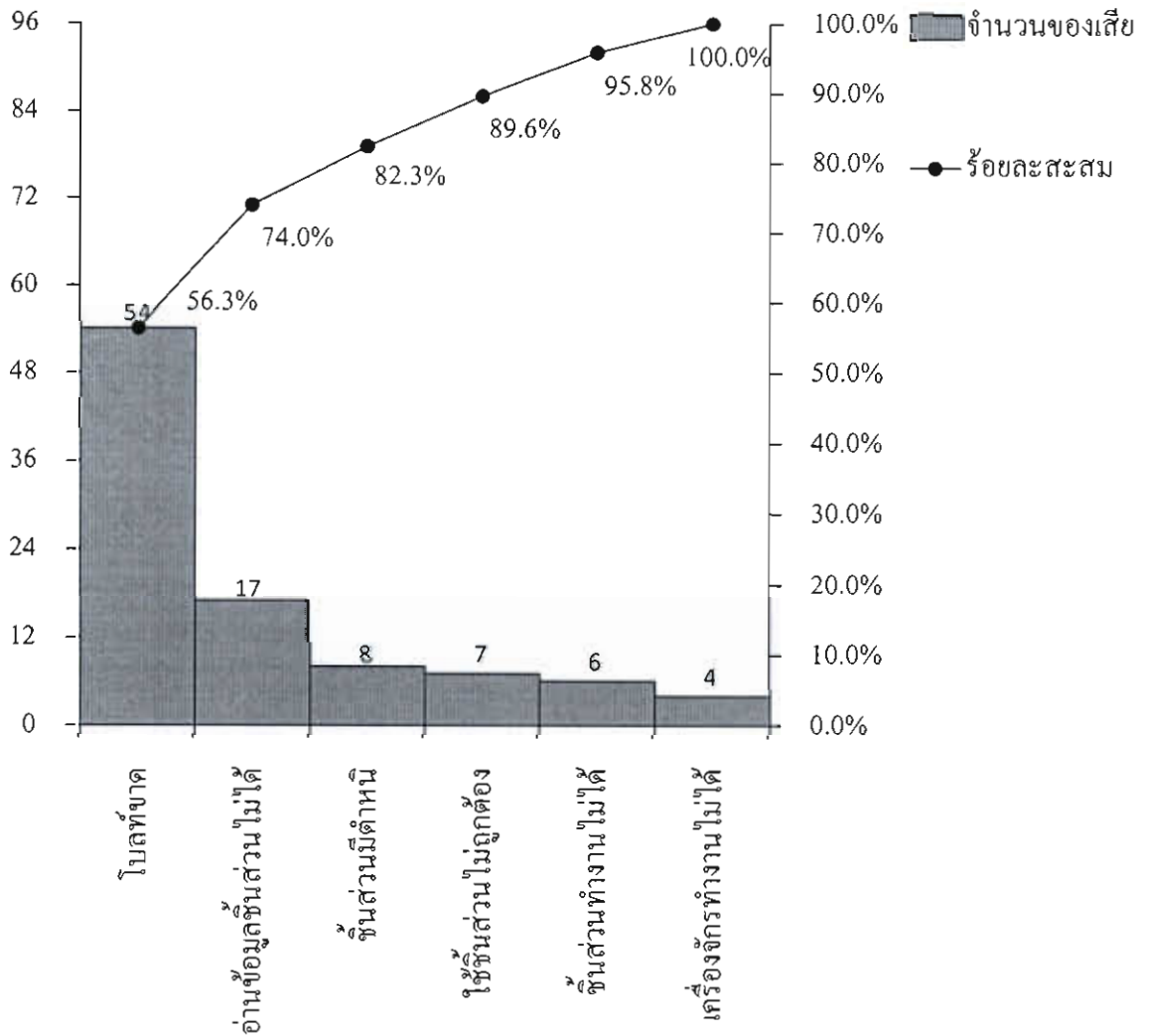
เดือน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม
จำนวนที่ผลิต (เครื่อง)	815	986	1,551
จำนวนของเสีย (เครื่อง)	31	30	35
ร้อยละของของเสีย (%)	3.80 %	3.04 %	2.26 %

ข้อมูลของเสียที่เกิดจากกระบวนการประกอบเครื่องยนต์ในตารางที่ 3-3 นำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 แผนภูมิแสดงจำนวนของเสียที่เกิดจากการประกอบเครื่องยนต์

ข้อมูลของเสียในตารางที่ 3-3 สามารถทำการแยกประเภทของของเสียที่เกิดขึ้นเพื่อให้เห็นของเสียอย่างชัดเจน ผู้ทำการศึกษา นำรายละเอียดของข้อมูลของเสียมาเขียนเป็นแผนภูมิพारेโต ดังภาพที่ 3-7



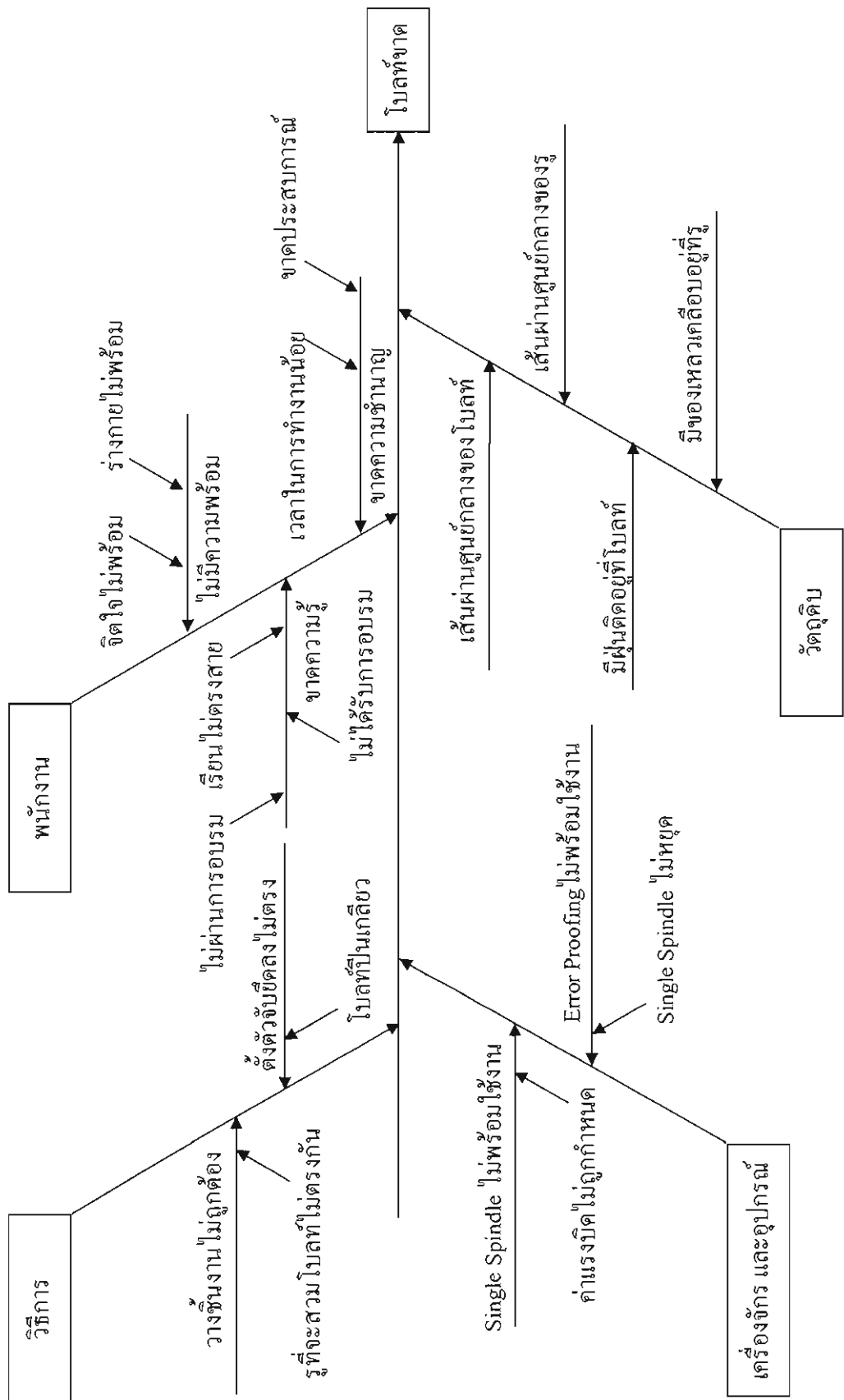
ภาพที่ 3-7 แผนภูมิพारेโตแสดงปัญหาทั้งหมดของการประกอบเครื่องยนต์

ผลการวิเคราะห์จากแผนผังพारेโตในภาพที่ 3-7 ของปัญหาทั้งหมดของการประกอบเครื่องยนต์ พบว่ามีของเสียจากโบลท์ขาดมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 56.3 ของปัญหาของเสียทั้งหมด โดยปัญหานี้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของลูกค้า และส่งผลต่อดัชนีทุนในการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปัญหาการขาดของโบลท์ขาดมาทำการแก้ไขปัญหา

3. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา และสรุปสาเหตุของปัญหา

การศึกษากระบวนการผลิตในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วน และกระบวนการขึ้นค่าแรงบิด พบว่าสิ่งที่เกี่ยวข้องกับการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดปัญหาโบลท์ขาด สามารถแบ่งออกได้จากวิธีการ พนักงาน เครื่องจักรและอุปกรณ์ และวัตถุดิบ

ผู้วิจัยได้นำสิ่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมาวิเคราะห์ ด้วยแผนภาพแสดงเหตุและผล ดังภาพที่ 3-8 เพื่อค้นหาสาเหตุหลาย ๆ อย่าง ที่อาจส่งผลทำให้เกิดปัญหาโบลท์ขาด และทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่อง เพื่อประเมินความเสี่ยงและโอกาสที่จะเกิดขึ้นของปัญหา โดยผู้วิจัยได้ร่วมทำการวิเคราะห์กับผู้ที่เกี่ยวข้องในบริษัทกรณีศึกษา โดยระดมความคิดเห็นในการระบุสาเหตุที่อาจส่งผลต่อการเกิดปัญหาโบลท์ขาดจากผลการศึกษากระบวนการผลิต



ภาพที่ 3-8 แผนภาพแสดงเหตุและผล

ผลการวิเคราะห์แผนภาพแสดงเหตุและผลในภาพที่ 3-8 ผู้วิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องในบริษัท ตรีศีกษา ได้ระดมความคิดและปรึกษาร่วมกัน พบว่ามี 11 สาเหตุที่น่าจะส่งผลให้เกิด โบลท์ขาด ผู้ทำการศึกษาไม่นำสาเหตุจากพนักงานไปทำการวิเคราะห์ เนื่องจากการวิเคราะห์เพื่อนำไปแก้ไข จะพิจารณาจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้เป็นอันดับแรก ซึ่งสามารถแก้ไขควบคุมได้โดยสะดวก และพนักงานเป็นสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือควบคุมได้ยาก เนื่องจากเป็นเรื่องส่วนบุคคล โดยสามารถแก้ไขโดยวิธีอื่น เช่น การฝึกอบรมก่อนทำงานจริง ดังนั้นสามารถสรุปสาเหตุที่ส่งผล ให้เกิดปัญหาโบลท์ขาดในการประกอบเครื่องยนต์ได้ทั้งหมด 8 สาเหตุ ได้ดังนี้

สาเหตุที่เกิดจากวิธีการ

สาเหตุที่ 1 รูที่จะสวมโบลท์ไม่ตรงกัน

สาเหตุที่ 2 โบลท์ปิ่นเกลียว

สาเหตุที่เกิดจากเครื่องจักรและอุปกรณ์

สาเหตุที่ 3 ค่าแรงบิดไม่ถูกกำหนด

สาเหตุที่ 4 Single Spindle ไม่หยุด

สาเหตุที่เกิดจากวัตถุดิบ

สาเหตุที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด

สาเหตุที่ 6 เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ไม่ได้ขนาด

สาเหตุที่ 7 มีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน

สาเหตุที่ 8 มีฝุ่นติดอยู่ที่โบลท์

สาเหตุของปัญหาเป็นข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้วิจัยเท่านั้น ซึ่ง ข้อมูลที่ได้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าสาเหตุใดเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โบลท์ขาด

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แผนภาพแสดงเหตุและผล นำมาทำการวิเคราะห์ด้วยการ วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ เพื่อเลือกสาเหตุหลักของปัญหามาทำการแก้ไข โดยใช้ เกณฑ์ในการประเมินในตารางที่ 4, 5 และ 6 จากทฤษฎีในบทที่ 2 มาเพื่อวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

กระบวนการผลิต	สภาพข้อบกพร่อง ที่เป็นไปได้	ผลกระทบ ที่เป็นไปได้	สาเหตุข้อบกพร่อง ที่เป็นไปได้	S	โอกาส ที่จะเกิดขึ้น	O	สถานะปัจจุบัน		D	RPN
							การป้องกัน	การตรวจสอบ		
การประกอบ	รูที่จะสวม โบลท์ ไม่ตรงกัน	โบลท์ขาด	ไม่มีตัวช่วยในการ ประกอบ	10	4	4	ไม่มี	ด้วยสายตา	2	80
การประกอบ	โบลท์ป็นเกลียว	โบลท์ขาด	ไม่มีตัวรองรับ Spindle	10	4	4	ไม่มี	ด้วยสายตา	3	120
การขันแรงบิด	ค่าแรงบิด ไม่ถูกกำหนด	โบลท์ขาด	ไม่มีเครื่องตรวจสอบ ระหว่างการใช้งาน	10	2	2	ไม่มี	จากการใช้งาน	1	20
การขันแรงบิด	Single Spindle ไม่หยุด	โบลท์ขาด	ไม่มีเครื่องตรวจสอบ ระหว่างการใช้งาน	10	2	2	ไม่มี	จากการใช้งาน	1	20
การประกอบ	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรูไม่ได้ขนาด	โบลท์ขาด	ตัวอย่างการสุ่มตรวจ ไม่เพียงพอ	10	9	9	ไม่มี	ใช้ Thread Gauge	6	540
การประกอบ	มีของเหลวเคลือบ อยู่ในรูของชิ้นส่วน	โบลท์ขาด	ตัวอย่างการสุ่มตรวจ ไม่เพียงพอ	10	8	8	สุ่มตรวจ	ด้วยสายตา	8	640

ตารางที่ 3-4 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (ต่อ)

กระบวนการผลิต	สภาพข้อบกพร่อง ที่เป็นไปได้	ผลกระทบ ที่เป็นไปได้	S	สาเหตุข้อบกพร่อง ที่เป็นไปได้	O	สถานะปัจจุบัน		D	RPN
						การป้องกัน	การตรวจสอบ		
การประกอบ	เส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์ไม่ได้นขนาด	โบลท์ขาด	10	ไม่มีมาตรการตรวจสอบ	9	ไม่มี	ใช้ Thread Gauge	3	270
การประกอบ	มีฝุ่นติดอยู่ที่โบลท์	โบลท์ขาด	10	ไม่มีมาตรการตรวจสอบ	7	ไม่มี	ด้วยสายตา	3	210

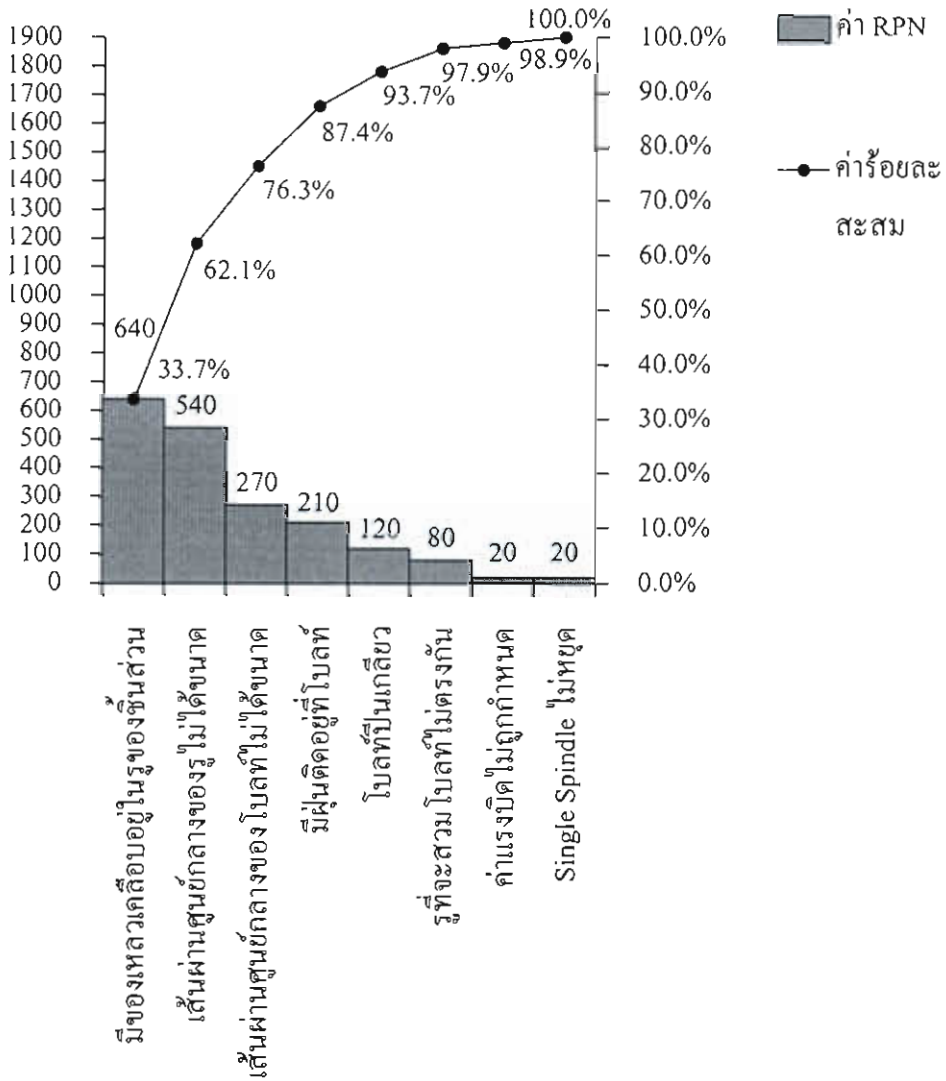
ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบจากตารางที่ 3-4 ได้มาจากการวิเคราะห์ของทีมงานผู้ที่มีประสบการณ์ของบริษัททฤษฎีศึกษา ประกอบด้วยทีมงานจากฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายผลิต และผู้วิจัย

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของทีมงานของบริษัททฤษฎีศึกษาสามารถสรุปผลได้จากตารางที่ 3-4 โดยพิจารณาค่า RPN จากมากไปน้อย ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 สรุปผลจากตารางผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ

ลำดับ	สภาพการขัดข้องที่เป็นไปได้ (Failure Mode)	ค่า RPN
1	มีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน	640
2	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด	540
3	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลต์ไม่ได้ขนาด	270
4	มีฝุ่นติดอยู่ที่โบลต์	210
5	โบลต์ปิ่นเกลียว	120
6	รูที่จะสวมโบลต์ไม่ตรงกัน	80
7	ค่าแรงบิดไม่ถูกกำหนด	20
8	Single Spindle ไม่หยุด	20

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 3-6 ผู้วิจัยได้นำสภาพการขัดข้องที่เป็นไปได้ มาเขียนเป็นแผนผังพารโตแสดงลำดับความสำคัญด้วยค่า RPN จากค่ามากไปน้อย ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 แผนผังพาเรโตแสดงสาเหตุของปัญหา

ผลการวิเคราะห์จากแผนผังพาเรโตในภาพที่ 3-9 พบว่าค่า RPN ของปัจจัยที่มีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน และปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาดมีค่า 640 และ 540 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามาก และมีความเป็นไปได้มากที่สุดที่จะเป็นปัจจัยที่ทำให้โบลท์ขาด และเนื่องจากปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์ไม่ได้ขนาด มีค่า RPN เท่ากับ 270 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด ผู้วิจัยจึงนำมาวิเคราะห์ด้วย และนอกจากนี้ ปัจจัยที่มีฝุ่นติดอยู่ที่โบลท์ มีค่า RPN เท่ากับ 210 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า RPN ของปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด ผู้วิจัยจึงนำมาวิเคราะห์ต่อเช่นกัน โดยสามารถสรุปปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงาน เพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาโบลท์ขาดมีดังนี้

ปัจจัยที่ 1 มีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน (ของเหลวที่รู)

ปัจจัยที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของรู)

ปัจจัยที่ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์)

ปัจจัยที่ 4 มีฝุ่นติดอยู่ที่เกลียวของ โบลท์ (ฝุ่นที่ โบลท์)

4. การหาแนวทางในการปรับปรุง

การสรุปปัจจัยจากการวิเคราะห์ด้วยพาเรโต ซึ่งมี 4 ปัจจัยที่มีความเสี่ยงที่นำสูง อาจมีผลต่อการขาดของโบลท์ในกระบวนการประกอบเครื่องยนต์ จึงนำปัจจัยทั้ง 4 มาเป็นปัจจัยในการออกแบบการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 มีผลต่อการขาดของโบลท์หรือไม่

การกำหนดระดับปัจจัยสามารถทำการกำหนดตามข้อกำหนดของชิ้นส่วน และลักษณะเกิดขึ้นจริงในแต่ละชิ้นส่วนได้ดังตารางที่ 3-6 โดยผู้วิจัยเลือก โบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8 มาทำการทดลอง เนื่องจากมีค่าแรงบิดสูงสุดก่อนที่โบลท์จะขาดเท่ากับ 33 ตามมาตรฐาน ISO 898-7 ซึ่งพนักงานสามารถขันให้ขาดได้ โดยใช้เครื่องมือขันค่าแรงบิดที่สามารถวัดค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 50 นิวตัน-เมตร

ตารางที่ 3-6 ระดับของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อปัญหาโบลท์ขาด

ลำดับ	ปัจจัยที่ใช้ทดลอง	ค่าตัวเลข		คุณลักษณะ			หน่วย
		น้อย	มาก	1	2	3	
1	ของเหลวที่รู	-	-	ไม่มีของเหลว	น้ำมัน	น้ำหล่อเย็น	-
2	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	6.5	6.7	-	-	-	มม.
3	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	7.7	7.9	-	-	-	มม.
4	ฝุ่นที่โบลท์	-	-	ไม่มีฝุ่น	มีฝุ่น	-	-

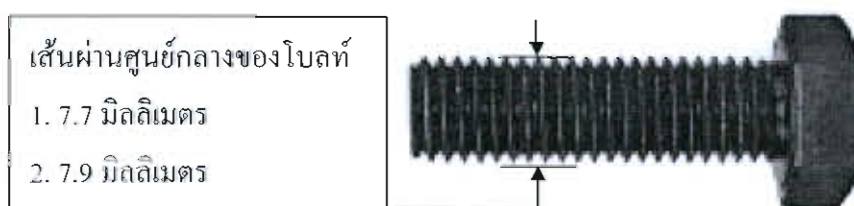
ค่าตอบสนองที่เลือกใช้ คือ ค่าแรงบิดสุดท้ายที่ทำให้โบลท์ขาด มีหน่วยการวัดเป็น นิวตัน-เมตร โดยในแต่ละปัจจัยแสดงดังภาพที่ 3-10, 3-11, 3-12, และ 3-13



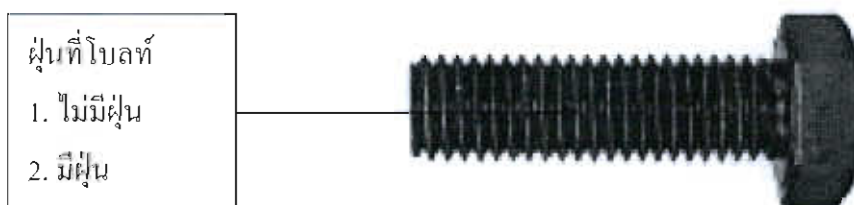
ภาพที่ 3-10 ปิจจัยมีของเหลวเคลื่อนอยู่ในรูของชิ้นส่วน (ของเหลวที่รู)



ภาพที่ 3-11 ปิจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู)



ภาพที่ 3-12 ปิจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์ไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์)



ภาพที่ 3-13 ปิจจัยมีฝุ่นติดอยู่ที่เกลียวของโบลท์ (ฝุ่นที่โบลท์)

ปิจจัยในการทดลองจากตารางที่ 3-6 มีทั้งแบบสองระดับ และสามระดับ ผู้วิจัยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบเต็มรูป โดยทดลอง 24 รอบการทดลอง ดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ค่าของปัจจัยในแต่ละรอบการทดลอง

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลาง กลางของรู	เส้นผ่านศูนย์กลาง กลางของโบลท์	ฝุ่นที่เกลียว
1	ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น
2	ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น
3	ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น
4	ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น
5	ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น
6	ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น
7	ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น
8	ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น
9	น้ำมัน	6.5 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น
10	น้ำมัน	6.7 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น
11	น้ำมัน	6.5 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น
12	น้ำมัน	6.7 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น
13	น้ำมัน	6.5 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น
14	น้ำมัน	6.7 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น
15	น้ำมัน	6.5 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น
16	น้ำมัน	6.7 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น
17	น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น
18	น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น
19	น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น
20	น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น
21	น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น
22	น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น
23	น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น
24	น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น

การดำเนินการทดลองต้องปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยทั้ง 4 เป็นไปตามตารางที่ 3-7 และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง รวมทั้งหมด 240 หน่วยการทดลอง สามารถออกแบบตารางเก็บข้อมูลของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดได้ดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 แผ่นตรวจสอบเพื่อบันทึกผลสำหรับความหนาของชิ้นงาน

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
.					
.					
.					
240					

การเตรียมการดำเนินงานในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขาดของโบลท์ ดำเนินงานตามการออกแบบการทดลอง เก็บข้อมูลแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด นำผลไปวิเคราะห์เพื่อกำจัดปัจจัยที่มีผลทำให้โบลท์ขาด ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล และเพื่อสรุปปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขันค่าแรงบิด โดยขั้นตอนการเตรียมผลการดำเนินงานต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดลอง 240 ชิ้น โดยวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของชิ้นงาน และบันทึกผล

ขั้นตอนที่ 2 การดำเนินการทดลองตามตาราง 3-8

ขั้นตอนที่ 3 การเก็บข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดในแต่ละรอบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ตามขั้นตอน โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่าแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลต่อการขาดของโบลท์วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลองโดยการทดสอบค่าเศษเหลือ ว่าเป็นไปตามหลัก $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนมีค่าคงตัว และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อการขาดของโบลท์ด้วยแผนภูมิของข้อมูลการทดลอง วิเคราะห์ด้วยแบบสมการถดถอย วิเคราะห์ข้อมูลด้วยฟังก์ชัน และทำการทดลองนอกสายการผลิต โดยกำหนดค่าปัจจัยที่ได้จากการทดลอง และทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots, \beta_a$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_j; i \neq j \text{ อย่างน้อย 1 คู่} \quad \text{กำหนด } \alpha = 0.05$$

เนื้อหาที่แสดงในบทนี้ได้แสดงการดำเนินงานการศึกษาอิสระ โดยข้อมูลในส่วน of ผลการดำเนินงานแสดงไว้ในบทที่ 4 และการสรุปผลการศึกษาแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 5

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัย

การศึกษาและเก็บข้อมูล โดยอาศัยเครื่องมือทางสถิติที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลอง เพื่อลดจำนวนหรือสัดส่วนของการขาดของ โบลท์ในกระบวนการขันค่าแรงบิด โดยในการทดลอง จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงบิดสูงสุดที่โบลท์สามารถทนได้ก่อนขาด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดวิธีการขันค่าแรงบิดให้ได้ตามมาตรฐาน โดยที่ไม่เกิดการขาดของโบลท์อีกต่อไป โดยใช้โปรแกรม Minitab* ซึ่งเป็น โปรแกรมทางสถิติเป็นตัวประมวลผลและวิเคราะห์ผล เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพของให้เป็นไปตามข้อกำหนด และเพื่อให้กระบวนการประกอบเครื่องยนต์ เป็นไปตามเป้าหมายของบริษัท โดยผลการดำเนินงานของการศึกษามีรายละเอียดในการเตรียมการ และการดำเนินงานดังนี้

1. การเตรียมชิ้นงานจำนวน 240 ชิ้น

เตรียมชิ้นงานที่ได้ทำการเจาะรูและทำเกลียวขนาด M8 จำนวน 240 ชิ้นงาน โดยทำการวัดขนาด และนำมาทำให้มีปัจจัยต่าง ๆ ตามตารางที่ 3-6 และจำแนกจำนวนตามระดับของแต่ละปัจจัยดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 จำนวนของชิ้นงานที่ได้ทำการเจาะรูและทำเกลียวขนาด M8 ที่ใช้ในการทดลอง

ระดับของปัจจัย	ไม่มีของเหลว	น้ำมัน	น้ำหล่อเย็น
เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร	40 ชิ้นงาน	40 ชิ้นงาน	40 ชิ้นงาน
เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.7 มิลลิเมตร	40 ชิ้นงาน	40 ชิ้นงาน	40 ชิ้นงาน

เตรียม โบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8 จำนวน 240 ตัว โดยทำการวัดขนาด และนำมาทำให้มีปัจจัยต่าง ๆ ตามตารางที่ 3-6 และจำแนกจำนวนตามระดับของแต่ละปัจจัยดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 จำนวนของ โบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8 ที่ใช้ในการทดลอง

ระดับของปัจจัย	ไม่มีฝุ่น	มีฝุ่น
เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.7 มิลลิเมตร	60 ตัว	60 ตัว
เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 มิลลิเมตร	60 ตัว	60 ตัว

2. การดำเนินการทดลอง

นำชิ้นงานไปทดสอบการขัน โบลท์ และการขันค่าแรงบิด โดยพนักงานที่ปฏิบัติงานในสายการผลิต โดยผู้วิจัยเป็นผู้จ่ายชิ้นงานในการทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามลำดับของการสุ่มด้วยโปรแกรม Minitab[®] และบันทึกค่าแรงบิดที่ได้จากการทดสอบ

3. การเก็บข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดของแต่ละรอบการทดลอง

ทำการขัน โบลท์ให้ขาด และบันทึกค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่ทำให้โบลท์ขาด ตัวอย่างผลการทดลองดังตารางที่ 4-3 โดยเก็บข้อมูลทั้งหมดจำนวน 240 ครั้ง ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4-3 ข้อมูลค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
1	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
2	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
3	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	27
4	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
5	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
6	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
7	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
8	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	27
9	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
10	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
11	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	28
12	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	19
13	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
14	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
15	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	19
16	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	20
.
.
.
240	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	24

เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนครั้งในการทดลองมีความเพียงพอ ผู้ศึกษาจึงทำการทดสอบ z-test และ t-test ด้วยโปรแกรม Minitab[®] เพื่อหาจำนวนครั้งในการทดลองที่เพียงพอ ที่ความเชื่อมั่น 95% ($\beta = 0.05$) และ 3σ โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 การทดสอบเพื่อหาจำนวนครั้งในการทดลองที่เหมาะสม

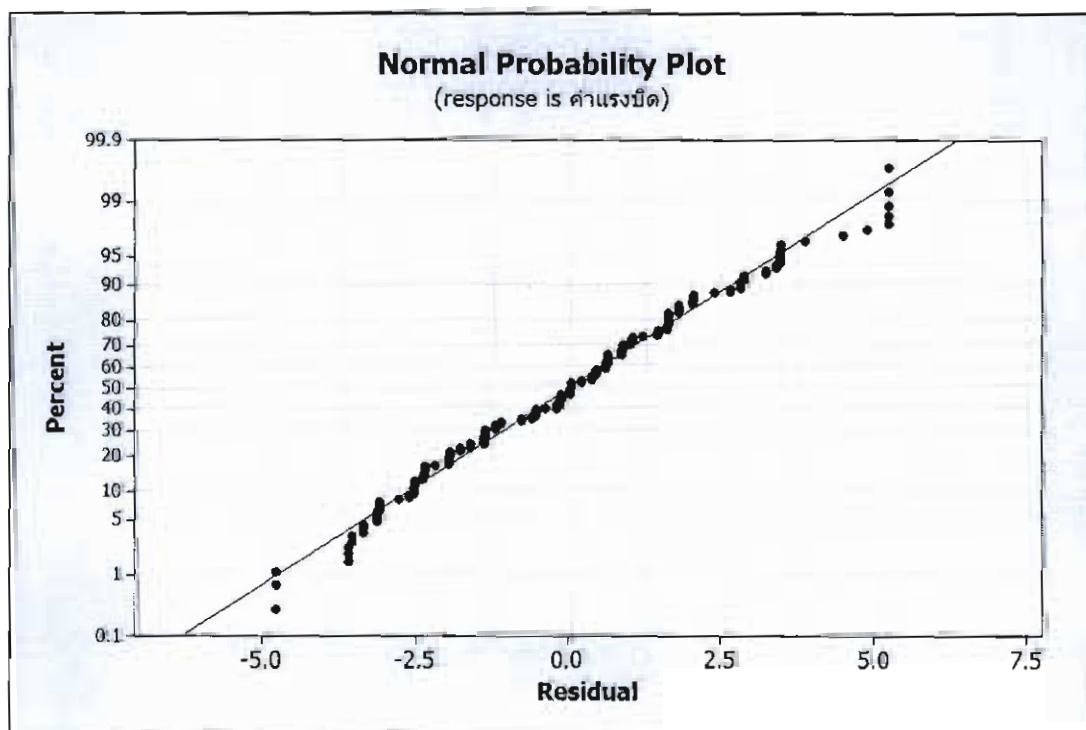
ของเหลวที่รู้	การทดลอง			ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนครั้ง	
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์	ฝุ่นที่โบลท์		z-test	t-test
ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น	2.00	6	8
ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น	2.06	7	9
ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.75	5	7
ไม่มีของเหลว	6.7 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น	1.83	5	8
ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.70	5	7
ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น	1.23	3	5
ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.16	2	5
ไม่มีของเหลว	6.5 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น	1.29	3	5
น้ำมัน	6.7 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น	2.15	7	9
น้ำมัน	6.7 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น	1.70	5	7
น้ำมัน	6.7 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น	2.22	8	10
น้ำมัน	6.7 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น	2.01	6	9
น้ำมัน	6.5 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.85	5	8
น้ำมัน	6.5 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น	1.49	4	6
น้ำมัน	6.5 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.58	4	6
น้ำมัน	6.5 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น	1.62	4	7
น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น	2.01	6	9
น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น	2.16	7	9
น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.35	3	5
น้ำหล่อเย็น	6.7 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น	1.43	3	6
น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.9 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.73	5	7
น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.9 มม.	มีฝุ่น	1.83	5	8
น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.7 มม.	ไม่มีฝุ่น	1.56	4	6
น้ำหล่อเย็น	6.5 มม.	7.7 มม.	มีฝุ่น	1.40	2	6

ผลการทดสอบในตารางที่ 4-4 แสดงจำนวนที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบ z-test และ t-test นั้นมีค่าไม่เกิน 10 ครั้ง ซึ่งเป็นค่าที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองไว้แล้ว จึงกล่าวได้ว่าได้เพียงพอต่อการที่จะนำค่าที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

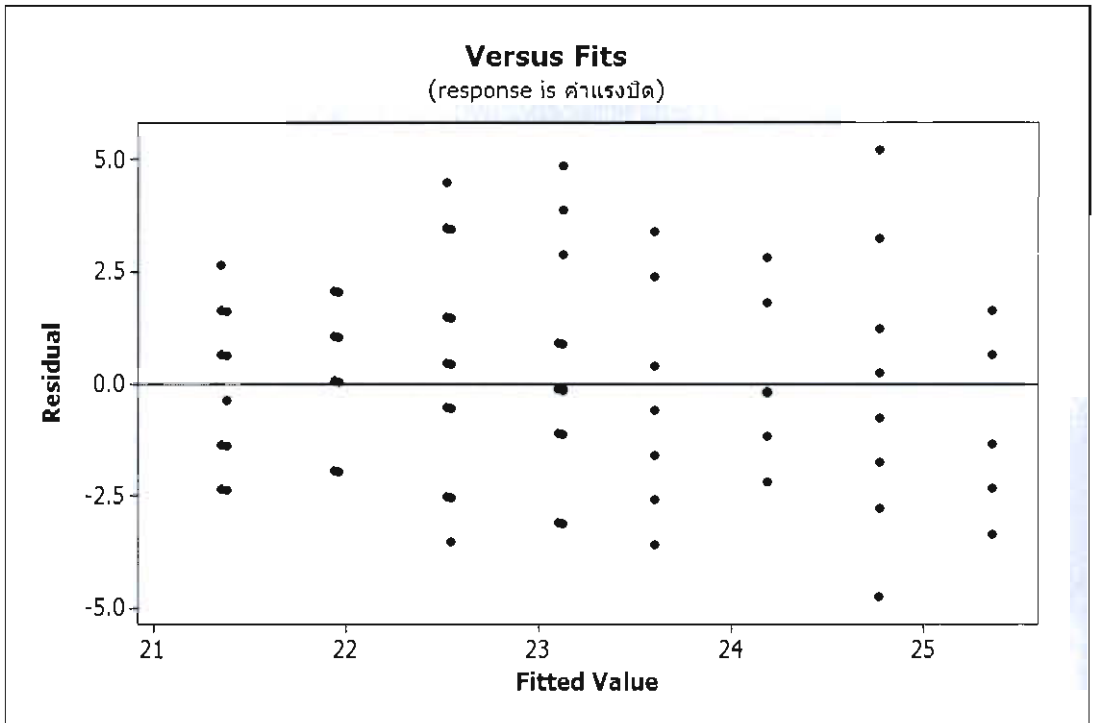
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลในตารางที่ 4-3 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab® ดังนี้

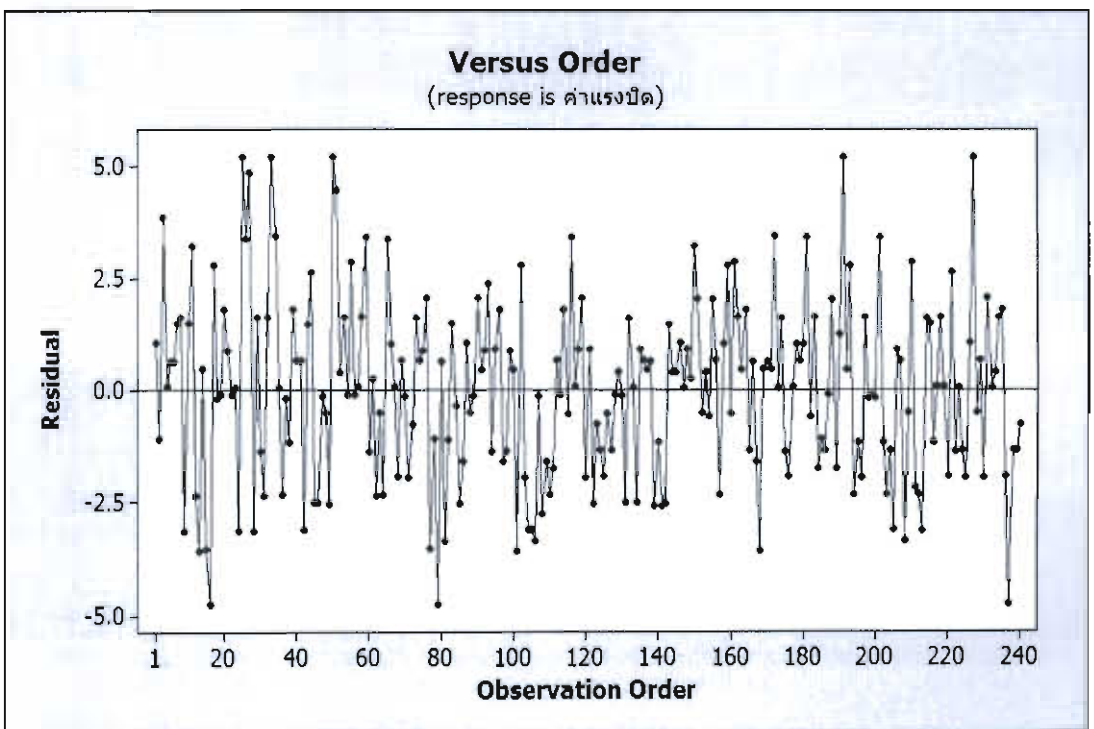
การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ โดยผลการทดลองสามารถประเมินการทดลองโดยการลดรูปได้ เนื่องจากรูปแบบสุดท้ายสามารถสร้างแผนภาพของค่าส่วนตกค้าง เพื่อประเมินรูปแบบโดยอยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานของการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง ความเป็นอิสระของค่า ส่วนตกค้าง และการสุ่มอย่างอิสระ โดยการลดรูปได้ผลดังภาพที่ 4-1, 4-2 และ 4-3



ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนต่างของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด



ภาพที่ 4-2 การกระจายของค่าส่วนตกค้าง Fitted Value ของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด



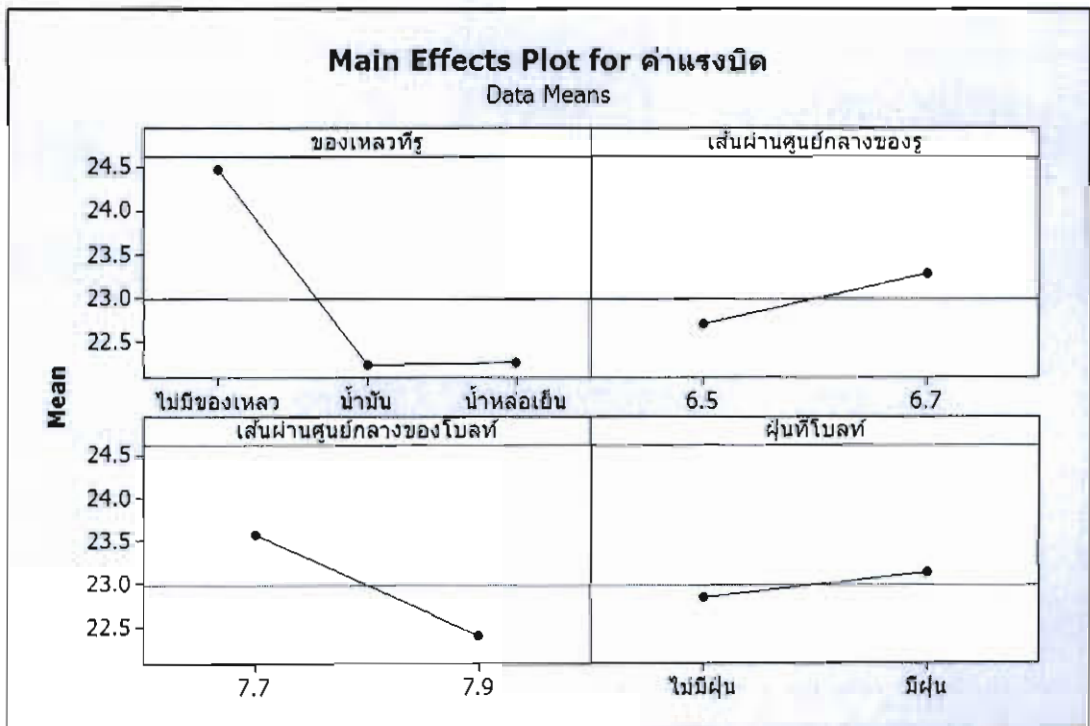
ภาพที่ 4-3 การกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง พิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้ทดสอบการแจกแจงแบบปกติในภาพที่ 4-1 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างในภาพที่ 4-2 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง เทียบกับ Fitted Value ของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด ซึ่งพบว่าค่าส่วนต่างในแต่ละระดับของพารามิเตอร์ที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์หรือข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) โดยการพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายในภาพที่ 4-3 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้างของชิ้นงาน พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้างมีความเสถียร เนื่องจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะแบบสุ่ม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย โดยจากการป้อนข้อมูลจากตารางที่ 4-3 ลงในโปรแกรม Minitab® เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม แสดงดังภาพที่ 4-4 และ 4-5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-4 แผนภูมิของปัจจัยหลักของการขาดของโบลท์

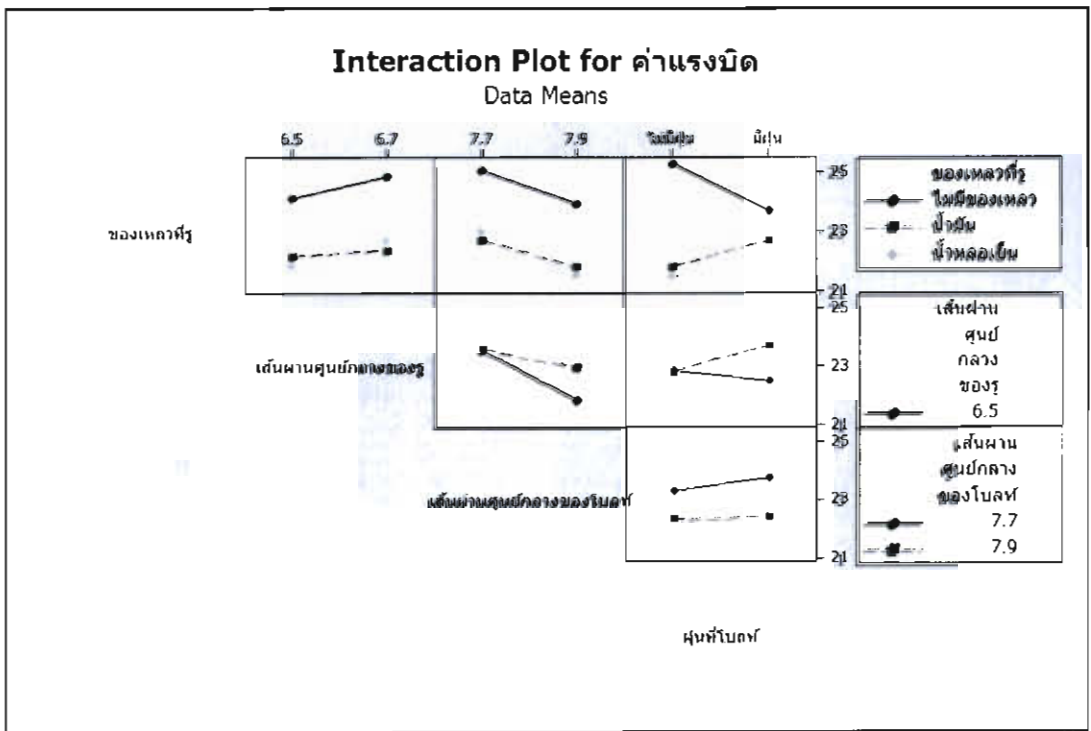
การตรวจสอบแผนภูมิปัจจัยหลักดังภาพที่ 4-4 พบว่าได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับแผนภูมิการแจกแจงปกติ

ปัจจัยของเหลวที่มีผลกระทบต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด คือ ถ้ามีของเหลวตกค้างอยู่ที่เกลียวจะส่งผลให้ค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดลดลง โบลท์ขาดง่ายขึ้น และของเหลวที่ตกค้างอยู่ที่เกลียวในส่วนของน้ำมันหล่อลื่นและน้ำหล่อเย็น ส่งผลต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดใกล้เคียงกัน และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยจึงกำหนดระดับในเชิงตัวเลขเมื่อไม่มีของเหลวให้มีค่าเป็น -1 น้ำมันให้มีค่าเป็น 1 และน้ำหล่อเย็นให้มีค่าเป็น 0

ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูมีผลกระทบต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูจะแปรผกผันกับค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด

ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์มีผลกระทบต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์จะแปรผันตรงกับค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด

ปัจจัยผู้คนที่โบลท์ต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด คือ ถ้ามีผู้ลงองค์คิดที่เกลียวของโบลท์จะส่งผลให้ค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดมากขึ้น โบลท์ขาดยาก เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยจึงกำหนดระดับในเชิงตัวเลขเมื่อไม่มีผู้คนที่ให้มีค่าเป็น -1 และไม่มีผู้คนที่ให้มีค่าเป็น +1



ภาพที่ 4-5 แผนภูมิของปัจจัยร่วมของการขาดของโบลท์

การตรวจสอบแผนภูมิปัจจัยรอง ดังภาพที่ 4-5 พบว่าปัจจัยของเหลวที่รั่ว เป็นปัจจัยร่วมกับปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์ และฝุ่นที่โบลท์ เนื่องจากเส้นกราฟในส่วนของน้ำมันและน้ำหล่อเย็นตัดกัน

ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่เป็นปัจจัยร่วมกับปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ เนื่องจากเส้นกราฟในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางขนานกัน แต่ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเป็นปัจจัยร่วมกับปัจจัยฝุ่นที่โบลท์เนื่องจากเส้นกราฟในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูตัดกัน

ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ไม่เป็นปัจจัยร่วมกับปัจจัยฝุ่นที่โบลท์ เนื่องจากเส้นกราฟในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ขนานกัน

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ได้ข้างต้น นำมาเปลี่ยนค่าในตารางที่ 18 ได้เป็นตารางที่ 20 โดยข้อมูลทั้งหมดจำนวน 240 ชิ้นงาน หลังจากเปลี่ยนค่า แสดงดังตาราง ข. ในภาคผนวก และทำการป้อนข้อมูลจากตารางที่ 20 ลงในโปรแกรม Minitab[®] เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย และตรวจสอบว่าปัจจัยของเหลวที่รั่ว เส้นผ่านศูนย์กลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์ และฝุ่นที่โบลท์ ซึ่งแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง โดยทดสอบค่าเศษเหลือตามหลัก $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนมีค่าคงตัว และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-5 โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4-5 ข้อมูลค่าแรงบิดที่มากที่สุดหลังจากเปลี่ยนค่าที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบ
การทดลอง

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ผู้หนึ่งที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
1	1	6.5	7.7	-1	23
2	1	6.5	7.9	1	22
3	0	6.5	7.9	1	27
4	1	6.5	7.7	-1	22
5	0	6.7	7.7	-1	22
6	0	6.5	7.9	1	22
7	1	6.5	7.7	-1	24
8	-1	6.7	7.7	1	27
9	0	6.7	7.7	-1	20
10	1	6.5	7.7	-1	24
11	-1	6.5	7.7	-1	28
12	0	6.5	7.9	1	19
13	-1	6.5	7.9	1	20
14	1	6.5	7.7	1	23
15	0	6.5	7.7	-1	19
16	-1	6.5	7.7	1	20
.
.
.
240	-1	6.7	7.9	1	24

ตารางที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงบิด
ที่ทำให้โบลท์ขาด

General Linear Model: ค่าแรงบิด versus ของเหลวที่รู, ศูนย์กลางของรู, เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์, ผู้คนที่โบลท์

Factor	Type	Levels	Values
ของเหลวที่รู	fixed	3	-1, 0, 1
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	fixed	2	6.5, 6.7
เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	fixed	2	7.7, 7.9
ผู้คนที่โบลท์	fixed	2	-1, 1

Analysis of Variance for ค่าแรงบิด, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ของเหลวที่รู	2	267.033	267.033	133.517	44.08	0.000
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	1	20.417	20.417	20.417	6.74	0.010
เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	1	81.667	81.667	81.667	26.96	0.000
ผู้คนที่โบลท์	1	4.817	4.817	4.817	1.59	0.209
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	2	4.633	4.633	2.317	0.76	0.467
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	2	3.733	3.733	1.867	0.62	0.541
ของเหลวที่รู*ผู้คนที่โบลท์	2	110.633	110.633	55.317	18.26	0.000
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	1	16.017	16.017	16.017	5.29	0.022
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ผู้คนที่โบลท์	1	24.067	24.067	24.067	7.95	0.005
เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	1	2.017	2.017	2.017	0.67	0.415
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	2	14.533	14.533	7.267	2.40	0.093
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ผู้คนที่โบลท์	2	45.033	45.033	22.517	7.43	0.001
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	2	28.933	28.933	14.467	4.78	0.009
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	1	29.400	29.400	29.400	9.71	0.002
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	2	58.800	58.800	29.400	9.71	0.000
Error	216	654.200	654.200	3.029		
Total	239	1365.933				

S = 1.74032

R-Sq = 52.11%

R-Sq(adj) = 47.01%

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง
และพิจารณาตาราง ANOVA ในตารางที่ 4-6 พบว่า

ปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ ของเหลวที่รู เส้นผ่านศูนย์กลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์ และฝุ่นที่โบลท์ มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000, 0.010, 0.000 และ 0.209 ตามลำดับ และที่ระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ต่อค่าของแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยหลัก ของเหลวที่รู เส้นผ่านศูนย์กลางของรู และเส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัยร่วม 2 ระดับ (Two-Way Interaction) คือ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ ของเหลวที่รู*ฝุ่นที่โบลท์ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ฝุ่นที่โบลท์ และเส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ มีค่า P-Value เท่ากับ 0.467, 0.541, 0.000, 0.022, 0.005 และ 0.415 และที่ระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ต่อค่าของแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยร่วม 2 ระดับ ของเหลวที่รู*ฝุ่นที่โบลท์ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ฝุ่นที่โบลท์ มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัยร่วม 3 ระดับ (Three-Way Interaction) คือ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ฝุ่นที่โบลท์ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ มีค่า P-Value เท่ากับ 0.093, 0.001, 0.009 และ 0.002 และที่ระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ต่อค่าของแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยร่วม 3 ระดับ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ฝุ่นที่โบลท์ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัยร่วม 4 ระดับ (Four-Way Interaction) คือ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 และที่ระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ต่อค่าของแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยร่วม 3 ระดับ ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ฝุ่นที่โบลท์ มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น เมื่อปัจจัยร่วม 4 ระดับ มีผลกระทบต่อการขาดของโบลท์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ นั้นหมายความว่า ในทุก ๆ ระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมนั้น มีผลกระทบต่อการขาดของโบลท์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ด้วยเช่นกัน

การวิเคราะห์เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าแรงบิดที่มากที่สุด ที่ทำให้โบลท์ขาด ผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแบบสมการถดถอย ดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการของค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่ทำให้โบลท์ขาด

Regression Analysis: ค่าแรงบิด versus ของเหลวที่รู, ศูนย์กลางของรู, เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์, ผู้คนที่โบลท์

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{ค่าแรงบิด} = & 1327 - 906 \text{ ของเหลวที่รู} - 204 \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} - 165 \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} - 1788 \text{ ผู้คนที่โบลท์} \\ & + 138 \text{ ของเหลวที่รู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} + 115 \text{ ของเหลวที่รู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} \\ & - 27.4 \text{ ของเหลวที่รู} * \text{ผู้คนที่โบลท์} + 25.8 \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} \\ & + 270 \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} * \text{ผู้คนที่โบลท์} + 232 \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} * \text{ผู้คนที่โบลท์} \\ & - 17.5 \text{ ของเหลวที่รู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} \\ & + 3.26 \text{ ของเหลวที่รู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} * \text{ผู้คนที่โบลท์} \\ & - 35.0 \text{ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} * \text{ผู้คนที่โบลท์} \\ & + 0.127 \text{ ของเหลวที่รู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} * \text{ผู้คนที่โบลท์} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1326.6	659.1	2.01	0.045
ของเหลวที่รู	-906.4	807.2	-1.12	0.263
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	-204.42	99.85	-2.05	0.042
เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	-164.67	84.49	-1.95	0.053
ผู้คนที่โบลท์	-1787.9	659.1	-2.71	0.007
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	137.8	122.3	1.13	0.261
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	115.0	103.5	1.11	0.268
ของเหลวที่รู*ผู้คนที่โบลท์	-27.42	10.35	-2.65	0.009
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	25.83	12.80	2.02	0.045
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ผู้คนที่โบลท์	269.83	99.85	2.70	0.007
เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	231.92	84.49	2.74	0.007
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	-17.50	15.68	-1.12	0.265
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*ผู้คนที่โบลท์	3.256	2.427	1.34	0.181
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	-35.00	12.80	-2.73	0.007
ของเหลวที่รู*เส้นผ่านศูนย์กลางของรู*เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์*ผู้คนที่โบลท์	0.1274	0.2375	0.54	0.592

S = 1.98293

R-Sq = 35.2%

R-Sq(adj) = 31.2%

การวิเคราะห์การถดถอยของสมการ ของค่าแรงบิดที่มากที่สุดที่ทำให้โบลท์ขาด โดยผล
จากตารางที่ 4-7 ได้สมการถดถอย ดังแสดงในสมการที่ 5-1

$$\begin{aligned}
\text{ค่าแรงบิด} &= 1327 + (-906 \times \text{ของเหลวที่รู้}) + (-204 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู}) \\
&+ (-165 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์}) + (-1788 \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \\
&+ (138 \times \text{ของเหลวที่รู้} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู}) \\
&+ (115 \times \text{ของเหลวที่รู้} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์}) \\
&+ (-27.4 \times \text{ของเหลวที่รู้} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \\
&+ (25.8 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์}) \\
&+ (270 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \\
&+ (232 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \\
&+ (-17.5 \times \text{ของเหลวที่รู้} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู} \\
&\times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์}) \\
&+ (3.26 \times \text{ของเหลวที่รู้} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \\
&+ (-35.0 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์} \\
&\times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \\
&+ (0.127 \times \text{ของเหลวที่รู้} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู} \\
&\times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโบลท์} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) \tag{5-1}
\end{aligned}$$

เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าแรงบิดที่มากที่สุด ที่ทำให้โบลท์ขาด ผู้ศึกษาได้พิจารณาค่า P-Value ที่ได้จากตารางที่ 21 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดมีทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ของเหลวที่รู้ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์ และฝุ่นที่โบลท์ โดยพิจารณาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมได้ดังนี้

ปัจจัยของเหลวที่รู้ เมื่อพิจารณาแผนภูมิปัจจัยหลัก ในภาพที่ 24 พบว่าปัจจัยของเหลวที่รู นั้นพบว่า ถ้ามีของเหลวตกค้างอยู่ที่เกลียวจะส่งผลให้ค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดลดลง โบลท์ขาดง่าย ดังนั้น เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนที่ต้องเจาะรูและทำเกลียวใน ต้องทำความสะอาดรูที่ทำเกลียวก่อนส่งมอบชิ้นส่วนเข้ามาในโรงงานประกอบเครื่องยนต์ เพื่อให้โบลท์ไม่ขาดเมื่อทำการขันค่าแรงบิดตามที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณา

ปัจจัยฝุ่นที่โบลท์นั้น เมื่อพิจารณาแผนภูมิปัจจัยหลัก ในภาพที่ 24 พบว่า ถึงแม้ว่าการที่มีฝุ่นติดมากับโบลท์แล้วทำให้ค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดมีค่าสูงขึ้น แต่ฝุ่นที่ติดมากับโบลท์อาจฟุ้งกระจาย และทำความสะอาดกับชิ้นส่วนอื่น หรือเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ได้ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้ผู้ผลิต โบลท์ ต้องทำความสะอาดโบลท์ก่อนส่งมอบชิ้นส่วนเข้ามาในโรงงานประกอบเครื่องยนต์

ปัจจัยเส้นผ่านศูนย์กลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์นั้น ผู้วิจัยพบว่าจากการสุ่มวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์ที่ใช้ในการทดลองนั้น อยู่ในข้อกำหนดอยู่แล้ว และเป็นไปได้ยากที่จะมีการตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู เส้นผ่านศูนย์กลางที่โบลท์ในการผลิตจริง ผู้วิจัยจึงทำการคำนวณค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดจากสมการที่ 5-1 ซึ่งเป็นสมการถอดออก และค่าของระดับปัจจัยของปัจจัยของเหลวไนรู และปัจจัยฝุ่นที่โบลท์ที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้แล้ว โดยเทียบกับข้อกำหนดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ทำเกลียว และเส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์ ซึ่งค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4-8

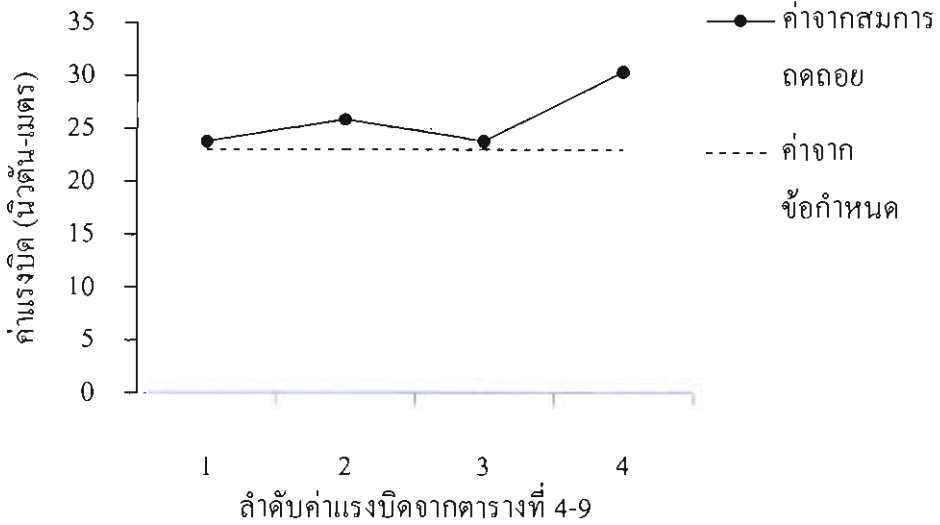
ตารางที่ 4-8 ค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)		เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)		ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
		LSL	USL	LSL	USL		
1	-1	6.647	-	7.760	-	-1	23.78
2	-1	6.647	-	-	7.972	-1	25.88
3	-1	-	6.912	7.760	-	-1	23.79
4	-1	-	6.912	-	7.972	-1	30.30

นำค่าแรงบิดที่คำนวณได้จากตารางที่ 4-8 มาเทียบกับค่าแรงบิดตามข้อกำหนดสำหรับโบลท์ M8 เกรด 8.8 ดังตารางที่ 4-9 โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 4-6

ตารางที่ 4-9 ค่าจากข้อกำหนดที่ใช้ในสายการประกอบเครื่องยนต์สำหรับ โบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8

ค่าแรงบิดสูงสุดที่ทำให้โบลท์ขาด (นิวตันเมตร, Nm)	ค่าแรงบิดสูงสุดที่ยอมรับได้ (นิวตันเมตร, Nm)	ค่าแรงบิดตามข้อกำหนด (นิวตันเมตร, Nm)		ค่าแรงบิดที่กำหนดเป็นค่า Response (นิวตันเมตร, Nm)
		ค่ามาก	ค่าน้อย	
33	24.75	23	21	23



ภาพที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากสมการถอดรอยกับข้อกำหนด

ภาพที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดจากสมการถอดรอย และค่าของระดับปัจจัยของปัจจัยของเหลวในรู และปัจจัยฝุ่นที่โบลท์ ที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้แล้ว โดยเทียบกับข้อกำหนดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ทำเกลียว และเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ มีค่ามากกว่าค่าแรงบิดตามข้อกำหนด แสดงให้เห็นว่าถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูและโบลท์อยู่ในข้อกำหนด จะไม่ส่งผลให้เกิดการขาดของ โบลท์ในกระบวนการขันค่าแรงบิด

ดังนั้นเมื่อพิจารณาข้อมูล และเหตุผลข้างต้น ผู้ศึกษาจึงได้กำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิดของโบลท์ ขนาด M8 เกรด 8.8 ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิดของ โบลท์ ขนาด M8 เกรด 8.8

ปัจจัย	ข้อกำหนด		ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม
	ค่ามาก	ค่าน้อย	
ของเหลวที่รู	ไม่ได้ถูกระบุไว้		ต้องไม่มีของเหลวติดอยู่ในรู
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู	6.912 มม.	6.647 มม.	6.912 ถึง 6.647 มม.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	7.972 มม.	7.760 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.
ฝุ่นที่โบลท์	ไม่ได้ถูกระบุไว้		ต้องไม่มีฝุ่นติดอยู่ที่โบลท์

การเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังควบคุมปัจจัยเพื่อยืนยันผลการวิจัย

ผู้วิจัยนำปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ไปควบคุมการประกอบเครื่องยนต์ โดยที่รูเกลียวต้องไม่มีของเหลวติดอยู่ กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ทำเกลียวและ โบลท์ให้เป็นไปตามข้อกำหนด และที่โบลท์ต้องไม่มีฝุ่นติดอยู่ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4-10 และเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองกับชิ้นส่วนที่ใช้โบลท์ขนาด M8 เกรด 8.8 ในการประกอบ จำนวน 30 ชิ้นงาน โดยกำหนดค่าแรงบิดไว้ 23 นิวตัน-เมตร ซึ่งหลังจากการขันค่าโบลท์แล้ว โบลท์ต้องไม่ขาด โดยข้อมูลของการทดลองหลังควบคุมปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองหลังควบคุมปัจจัย

ลำดับ	ระดับของปัจจัย				ผลการทดลอง
	ของเหลวที่รู	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	ฝุ่นที่โบลท์	
1	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
2	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
3	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
4	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
5	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
6	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
7	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
8	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
9	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
10	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
11	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
12	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
13	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
14	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
15	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
16	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด

ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองหลังควบคุมปัจจัย (ต่อ)

ลำดับ	ระดับของปัจจัย				ผลการทดลอง
	ของเหลวที่รู	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	ฝุ่นที่โบลท์	
17	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
18	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
19	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
20	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
21	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
22	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
23	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
24	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
25	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
26	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
27	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
28	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
29	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด
30	ไม่มี	6.912 ถึง 6.647 มม.	7.972 ถึง 7.760 มม.	ไม่มี	ไม่ขาด

ค่าที่ได้จากตารางที่ 4-11 สามารถสรุปค่าร้อยละของของเสีย และค่าความสามารถของกระบวนการ (C_p) หลังจากการทดลอง ซึ่งได้ทำการกำหนดปัจจัย โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของของเสีย และค่าความสามารถของกระบวนการก่อนจากการทดลองดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 การเปรียบเทียบผลหลังจากการทดลองกับก่อนการทดลอง

การทดลอง	จำนวนการผลิต / จำนวนการทดลอง	จำนวนของเสีย	ร้อยละของ ของเสีย	PPM	C_{pk}
เป้าหมาย	ตามแผนการผลิต	0	0	0	> 1.5
ก่อนการทดลอง	3,352	54	1.61	16,110	0.83
หลังการทดลอง	30	0	0	0	> 1.5

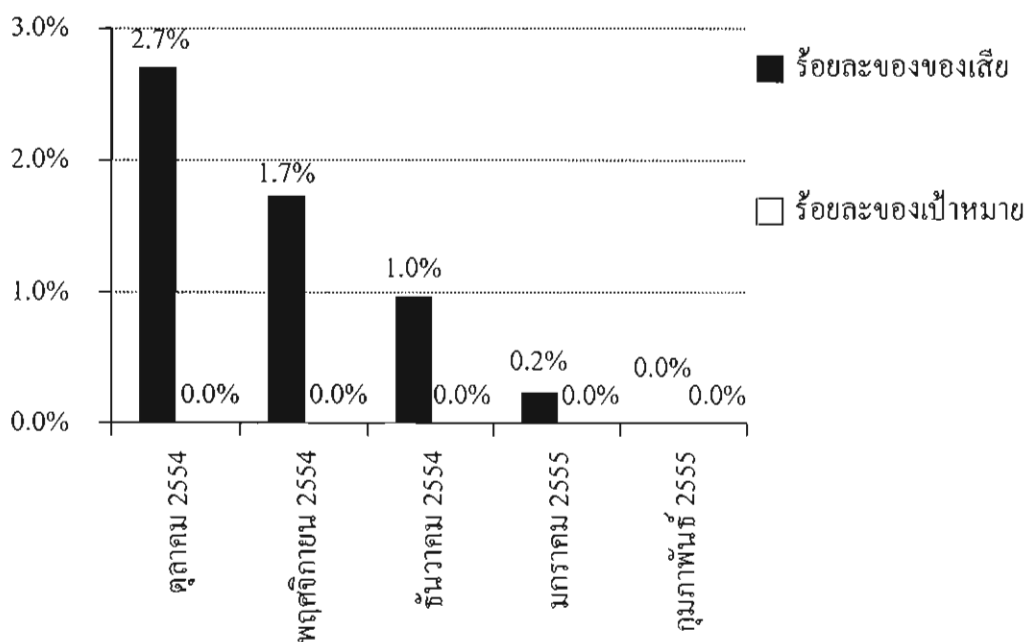
การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการทดลองพบว่า กระบวนการขั้นค่าแรงบิดในปัจจุบันมีขีดความสามารถของกระบวนการไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.83 ซึ่งน้อยกว่า 1.33 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดที่เหมาะสม เนื่องจากเกิดของเสียคือ โบลท์ขาดในกระบวนการขั้นค่าแรงบิด ซึ่งเมื่อเทียบกับเป้าหมายของบริษัทคือไม่ให้มีของเสียจากกระบวนการผลิตแล้ว จึงถือว่ายอมรับไม่ได้

การติดตามผลหลังการปรับปรุงจำนวน 30 ชิ้นงาน ไม่พบปัญหาการขาดของโบลท์ จึงเชื่อได้ว่าการปรับปรุงส่งผลให้กระบวนการดีขึ้น แต่ยังไม่มียังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอที่จะสรุปเกี่ยวกับระดับความสามารถของกระบวนการได้ ผู้วิจัยจึงอนุมานว่าถ้ากระบวนการดำเนินการด้วยระดับควบคุมตามนี้อย่างต่อเนื่อง คาดว่าจะมีค่า C_{pk} เท่ากับหรือมากกว่า 1.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถของกระบวนการนั้นมากกว่าก่อนการควบคุมปัจจัยในกระบวนการซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.83 แสดงให้เห็นว่าความสามารถของกระบวนการดีขึ้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการผลิตในช่วงที่มีปัญหาระหว่างเดือนตุลาคม ถึงเดือนธันวาคม พุทธศักราช 2554 และผู้ที่เกี่ยวข้องคาดว่าสาเหตุเกิดจากการมีของเหลวตกค้างอยู่ในรู โดยได้ทำการควบคุมไม่ให้มีของเหลวตกค้างอยู่ในรู โดยเริ่มเก็บข้อมูลในเดือนมกราคม และเดือนกุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2555 แสดงดังตารางที่ 4-13 และแผนภูมิมัดงภาพที่ 4-7

ตารางที่ 4-13 จำนวนของเสียที่เกิดจากการประกอบรถยนต์

เดือน ปี	ตุลาคม พ.ศ. 2554	พฤศจิกายน พ.ศ. 2554	ธันวาคม พ.ศ. 2554	มกราคม พ.ศ. 2555	กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555
จำนวนที่ผลิต (เครื่อง)	815	986	1,551	3,020	4,279
จำนวนของเสีย (เครื่อง)	31	30	35	7	0
ร้อยละของของเสีย (%)	3.80 %	3.04 %	2.26 %	0.20%	0.00%



ภาพที่ 4-7 แผนภูมิแสดงจำนวนของเสียที่เกิดจากการกระบวนการขันค่าแรงบิด

ร้อยละของของเสียแสดงให้เห็นว่า หลังจากควบคุมไม่ให้มีของเหลวตกค้างอยู่ในรู ของเสียจากกระบวนการขันค่าแรงบิดลดลงจนกระทั่งของเสียไม่เกิดขึ้น

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

อภิปรายผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของชิ้นงานในกระบวนการขึ้นค่าแรงบิด โดยประยุกต์เครื่องมือทางสถิติ การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป อภิปรายผลการศึกษาได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ได้ 4 ปัจจัย คือ มีของเหลวติดอยู่ที่รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ และมีฝุ่นติดอยู่ที่โบลท์ โดยปัจจัยแรกมีระดับปัจจัย 3 ระดับ และปัจจัยที่เหลือมีปัจจัยละ 2 ลำดับ จึงเลือกการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป โดยสามารถออกแบบการทดลองได้เป็น 24 ลำดับการทดลอง และทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 10 รอบการทดลอง

2. ทำการวัดขนาดของรูของชิ้นงานจำนวน 240 ชิ้น โดยเลือกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.7 มิลลิเมตร และ 6.5 มิลลิเมตร ชนิดละ 120 ชิ้น โดยแต่ละชนิดนำไปใช้ทดสอบได้เคย 40 ชิ้น นำไปทำให้มีคราบน้ำมันหล่อลื่น 40 ชิ้น และนำไปทำให้มีคราบน้ำยาหล่อเย็น 40 ชิ้น และทำการวัดขนาดของโบลท์ M8 จำนวน 240 ชิ้น โดยเลือกโบลท์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 มิลลิเมตร และ 7.7 มิลลิเมตร ชนิดละ 120 ชิ้น นำไปใช้ทดสอบได้เคย 60 ชิ้น นำไปล้างเพื่อให้ไม่มีฝุ่นติดที่โบลท์ 60 ชิ้น เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขาดของโบลท์ในกระบวนการขึ้นค่าแรงบิด

3. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนครั้งในการทดลองมีความเพียงพอ ผู้ศึกษาจึงทำการทดสอบ z-test และ t-test ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาจำนวนครั้งในการทดลองที่เพียงพอ ที่ความเชื่อมั่น 95% ($\beta = 0.05$) และ 3-sigma พบว่า ค่าที่ได้จาก z-test และ t-test นั้นมีค่าไม่เกิน 10 ครั้ง ซึ่งเป็นค่าที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองไว้แล้ว จึงกล่าวได้ว่าได้วันเพียงพอ

4. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง พิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้ทดสอบการแจกแจงปกติ พบว่าค่าส่วนค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ แผนภูมิการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้ประมาณค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ แผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง เทียบกับ Fitted Value ของค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาด ซึ่งพบว่าค่าส่วนต่างในแต่ละลำดับของพารามิเตอร์ที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ หรือข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน การวิเคราะห์การ

กระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดพบว่าค่าของ σ^2 ของค่าส่วนตกค้างมีความเสถียร เนื่องจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะแบบสุ่ม

5. การวิเคราะห์ด้วยความแปรปรวน สรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นงานจำนวน 4 ปัจจัยจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบปัจจัยหลักได้แก่ ของเหลวดีทรีจู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ และฝุ่นที่โบลท์ ที่มีผลต่อการขาดของโบลท์ และเนื่องจากปัจจัยร่วมของทั้ง 4 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการขาดของโบลท์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ นั้นหมายความว่าในทุก ๆ ปัจจัยร่วมนั้น มีผลต่อการขาดของโบลท์

6. การวิเคราะห์การถดถอยของสมการ ได้สมการถดถอย คือ ค่าแรงบิด = $1327 + (-906 \times \text{ของเหลวดีทรีจู}) + (-204 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู}) + (-165 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์}) + (-1788 \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) + (138 \times \text{ของเหลวดีทรีจู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู}) + (115 \times \text{ของเหลวดีทรีจู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์}) + (-27.4 \times \text{ของเหลวดีทรีจู} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) + (25.8 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์}) + (270 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) + (232 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) + (-17.5 \times \text{ของเหลวดีทรีจู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์}) + (3.26 \times \text{ของเหลวดีทรีจู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) + (-35.0 \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์}) + (0.127 \times \text{ของเหลวดีทรีจู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรู} \times \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์} \times \text{ฝุ่นที่โบลท์})$

7. การกำหนดค่าที่เหมาะสม ผู้ทำการศึกษาได้กำหนดให้ไม่มีของเหลวดีทรีจูที่ท่าเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ทำเกลียวระหว่าง 6.912 ถึง 6.647 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ระหว่าง 7.972 ถึง 7.760 มิลลิเมตร และที่โบลท์ต้องไม่มีฝุ่นติดอยู่

8. การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการทดลองพบว่า กระบวนการขึ้นค่าแรงบิดในปัจจุบันมีขีดความสามารถของกระบวนการไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.83 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดลองหลังการปรับปรุง พบว่าความสามารถของกระบวนการ มีค่ามากกว่า 1.5 โดยไม่มีของเสียเกิดขึ้นในการทดลองการควบคุมปัจจัย และการเปรียบเทียบผลการผลิตในช่วงที่มีปัญหาระหว่างเดือนตุลาคม ถึง เดือนธันวาคม พุทธศักราช 2554 และผู้ที่เกี่ยวข้องคาดว่าสาเหตุเกิดจากการมีของเหลวตกค้างอยู่ในรู โดยได้ทำการควบคุมไม่ให้มีของเหลวตกค้างอยู่ในรู โดยเริ่มเก็บข้อมูลในเดือนมกราคมและเดือนกุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2555 พบว่า หลังจากควบคุมไม่ให้มีของเหลวตกค้างอยู่ในรู ของเสียจากกระบวนการขึ้นค่าแรงบิดลดลงจนกระทั่งของเสียไม่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าความสามารถของกระบวนการดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สรุปผลการศึกษา

1. ผลที่ได้จากการศึกษาเมื่อนำไปใช้ในการผลิตจริงพบว่าหลังจากเริ่มการปรับปรุง โดยการควบคุมไม่ให้มีของเหลวในรูเกลียว พบว่าในเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ซึ่งเป็นเดือนแรกที่ควบคุมไม่ให้มีของเหลวในรู ค่าความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นเป็น 1.02 และมีค่ามากกว่า 1.50 ในเดือนกุมภาพันธ์ โดยเมื่อเทียบกับค่าความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.83 จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลจากการควบคุมปัจจัยที่ทำให้โบลท์ขาดในกระบวนการขัน ค่าแรงบิด สามารถลดของเสียในกระบวนการได้

2. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิดในการประกอบเครื่องยนต์ จากการใช้การออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาโบลท์ขาดในกระบวนการขันค่าแรงบิด มี 3 ปัจจัย คือ

ปัจจัยที่ 1 มีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน (ของเหลวที่รู)

ปัจจัยที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของรู)

ปัจจัยที่ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ไม่ได้ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์)

ปัจจัยที่ 4 มีฝุ่นติดอยู่ที่เกลียวของ โบลท์ (ฝุ่นที่โบลท์)

3. ปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิดที่ได้จากการศึกษานี้ คือการกำหนดให้ไม่มีของเหลวติดอยู่ในรูที่ต้องการขันโบลท์ โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ โบลท์เป็นไปตามข้อกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขันค่าแรงบิด

ปัจจัย	ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม
มีของเหลวเคลือบอยู่ในรูของชิ้นส่วน	ต้องไม่มีของเหลวติดอยู่ในรู
เส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่ได้ขนาด	6.912 ถึง 6.647 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์	7.972 ถึง 7.760 มิลลิเมตร
มีฝุ่นติดอยู่ที่เกลียวของ โบลท์	ต้องไม่มีฝุ่นติดอยู่ที่โบลท์

ปัจจัยที่เหมาะสมในตารางที่ 5-1 พบว่ากระบวนการประกอบเครื่องยนต์มีความสามารถของกระบวนการดีขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการก่อนการปรับปรุง โดยพบว่าหลังการปรับปรุงไม่เกิดการขาดของโบลท์จากกระบวนการขันค่าแรงบิด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ข้อเสนอแนะ

1. การวิเคราะห์ปัจจัย ผู้วิจัยพยายามที่จะกำจัดและลดอิทธิพลของปัจจัยแทรกซ้อนอื่น ๆ ให้เกิดน้อยที่สุด แต่ในความเป็นจริงในกระบวนการขันค่าแรงบิดยังมีปัจจัยแทรกซ้อนอื่น ๆ ที่สามารถส่งผลกระทบต่อค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดที่น่าสนใจ และควรที่จะศึกษาเพิ่ม เช่น การศึกษาในเรื่องของวัสดุที่ใช้ในการทำโบลท์ และรู เป็นต้น
2. ก่อนการประกอบชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ต้องใช้โบลท์ในการประกอบ ควรมีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้ได้ตามที่กำหนดไว้ เมื่อขันค่าแรงบิดแล้ว ชิ้นส่วนสามารถยึดติดกันได้อย่างปกติตามแบบ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในการใช้งานของลูกค้า
3. การศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองเฉพาะ โบลท์ที่มีขนาด M8 เกรด 8.8 เท่านั้น แต่เนื่องจากลักษณะการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกันโดยใช้โบลท์ขันลงไปนรูในขนาดต่าง ๆ มีลักษณะที่เหมือนกัน จึงสามารถนำผลการทดลองไปใช้อ้างอิงสำหรับ โบลท์ขนาดอื่น ๆ ได้ แต่ควรมีการทดลอง โดยการควบคุมปัจจัยก่อนการผลิตจริง เพื่อให้เกิดความมั่นใจในกระบวนการผลิตต่อไป
4. การตรวจติดตามในการผลิตจริงนั้น ผู้วิจัยไม่สามารถทำได้ในทันทีที่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลหลังจากการควบคุมปัจจัยในการผลิตจริงในสายการผลิต ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการทดลองหลังจากการปรับปรุง เพื่อยืนยันผลการศึกษาเท่านั้น

บรรณานุกรม

- จำถักษณ์ ขุนพลแก้ว. (2549). *ลดต้นทุนเพิ่มผลิตภาพ*. วันที่ค้นข้อมูล 4 ธันวาคม 2554, เข้าถึงได้จาก <http://www.nidambel1.net/ekonomiz/2009q2/2009may04p10.htm>.
- พิชิต สุขเจริญพงษ์. (2553). *การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการพ่นสีรถยนต์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน.
- พิทักษ์ หนาววัน. (2550). *การออกแบบการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์กาวที่เหมาะสม ในการขึ้นรูปแผ่นรองสินค้าที่อัดจากฟางข้าวและใยมะพร้าว*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.
- ประเสริฐ ชุมปัญญา. (2554). *การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพร้อมด้วยระบบสุญญากาศสำหรับพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วีรเทพ เฉลิมสมิทธิชัย. (2550). *การศึกษาปริมาณธาตุที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กดัดโดยวิธีการออกแบบการทดลอง*. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อนันต์ เศรษฐพฤทธิ์. (2548). *การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k ของปฏิบัติการรีฟอร์มเมทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล*. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- A. Vairis* and M. Petousis. (2009). *Designing experiments to study welding processes: using the Taguchi method*. Mechanical Engineering Dept, TEI of Crete.
- Bolt Science Limited. (2011). *Methods of Tightening Threaded*. Search date 7 December 2011, Accessible <http://www.boltscience.com/pages/tighten.htm>.
- Dong-Woo Kim. (2008). *Application of Design of Experiment Method for Thrust Force Minimization in Step-feed Micro Drilling*. Division of Mechanical Engineering, Inha University.
- Industrial Technology Review (2543). *FMEA การวิเคราะห์ความล้มเหลวในการผลิต*. (7), 101 – 105.
- M. I. Hussain, Z. M. Zain & M. S. Salleh. (2009). *Methodology of Designing Statistical Design of Experiment (SDE) to Study Wrinkles and Delamination on Composite Panels*. School of Manufacturing Engineering, Universiti Malaysia Perlis.

บรรณานุกรม (ต่อ)

New Torque Wrench.com. (2011). *Torque Wrenches*. Search date 4 December 2011, Accessible

<http://newtorquewrench.com/torque-wrenches/>.

Siliconfareast.com. *Cpk Vs. ppm Table*. 2012. [Online]. Search date 29 February 2012, Accessible

<http://www.siliconfareast.com>.

Wikipedia. (2012). *Process Capability*. Search date 10 January 2012, Accessible

http://en.wikipedia.org/wiki/Process_capability_index.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลผลการวิจัยตามการออกแบบการทดลอง

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
1	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
2	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	22
3	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	27
4	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
5	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
6	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
7	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
8	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	27
9	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
10	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
11	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	28
12	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	19
13	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
14	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
15	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	19
16	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	20
17	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	27
18	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	24
19	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
20	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	26
21	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
22	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
23	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	22

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
24	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
25	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	30
26	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	27
27	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	28
28	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
29	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	23
30	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
31	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	19
32	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	23
33	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	30
34	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	26
35	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
36	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	19
37	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
38	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
39	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	26
40	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	26
41	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	26
42	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
43	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
44	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	24
45	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
46	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	20

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รัฐ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
47	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
48	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
49	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	20
50	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	30
51	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	27
52	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	24
53	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
54	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
55	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	26
56	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
57	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
58	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	27
59	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	26
60	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
61	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	25
62	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	19
63	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	22
64	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
65	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	27
66	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
67	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
68	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	20
69	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	26

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รัฐ	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
70	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
71	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	20
72	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	24
73	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	23
74	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	26
75	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	24
76	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	24
77	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	19
78	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
79	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	20
80	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
81	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
82	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
83	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	24
84	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	21
85	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
86	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
87	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
88	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
89	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
90	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	24
91	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
92	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	24

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
93	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	26
94	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
95	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
96	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	26
97	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
98	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
99	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
100	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
101	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
102	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	27
103	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	20
104	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
105	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
106	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
107	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
108	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	22
109	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
110	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	19
111	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
112	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	26
113	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
114	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	26
115	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	22

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
116	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	26
117	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
118	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	24
119	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	24
120	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
121	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
122	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
123	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	24
124	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
125	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
126	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	22
127	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
128	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
129	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
130	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
131	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
132	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
133	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
134	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	20
135	น้ำมัน	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
136	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
137	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
138	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	22

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
139	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	21
140	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
141	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	21
142	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
143	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	24
144	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	24
145	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	24
146	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
147	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	22
148	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	24
149	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	25
150	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	28
151	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
152	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	22
153	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
154	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	23
155	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
156	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	26
157	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
158	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
159	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	27
160	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
161	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	26

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่ ใช้	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
162	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
163	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
164	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	26
165	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	24
166	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
167	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
168	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
169	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
170	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	22
171	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
172	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	26
173	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
174	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	23
175	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
176	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
177	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
178	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
179	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	22
180	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
181	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	26
182	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
183	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
184	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	23

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
185	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	22
186	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
187	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	23
188	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	24
189	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
190	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	26
191	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	30
192	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	23
193	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	27
194	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	19
195	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
196	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
197	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	27
198	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
199	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
200	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
201	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.7	มีฝุ่น	26
202	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
203	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
204	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
205	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	20
206	น้ำมัน	6.7	7.7	มีฝุ่น	24
207	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	22

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รัฐ	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
208	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
209	น้ำมัน	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	22
210	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	มีฝุ่น	26
211	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	22
212	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	23
213	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	20
214	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	มีฝุ่น	23
215	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	24
216	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
217	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	22
218	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	27
219	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	22
220	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
221	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	24
222	น้ำหล่อเย็น	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
223	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	22
224	น้ำมัน	6.5	7.9	มีฝุ่น	20
225	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	20
226	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	23
227	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	ไม่มีฝุ่น	30
228	น้ำมัน	6.5	7.7	มีฝุ่น	22
229	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	ไม่มีฝุ่น	26
230	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดตามการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รัฐ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
231	น้ำมัน	6.7	7.9	มีฝุ่น	24
232	น้ำหล่อเย็น	6.7	7.9	มีฝุ่น	22
233	ไม่มีของเหลว	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	24
234	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	23
235	ไม่มีของเหลว	6.7	7.9	มีฝุ่น	26
236	น้ำมัน	6.7	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
237	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	20
238	ไม่มีของเหลว	6.7	7.7	มีฝุ่น	24
239	น้ำมัน	6.5	7.9	ไม่มีฝุ่น	20
240	ไม่มีของเหลว	6.5	7.7	มีฝุ่น	24

ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูลผลการวิจัยหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข

ลำดับ	ของเหลวที่รัฐ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
1	1	6.7	7.9	-1	23
2	1	6.7	7.7	1	22
3	0	6.7	7.7	1	27
4	1	6.7	7.9	-1	22
5	0	6.5	7.9	-1	22
6	0	6.5	7.9	1	22
7	1	6.5	7.7	-1	24
8	-1	6.7	7.7	1	27
9	-1	6.7	7.7	-1	20
10	-1	6.5	7.7	-1	24
11	-1	6.5	7.7	-1	28
12	0	6.5	7.9	1	19
13	-1	6.5	7.9	1	20
14	1	6.5	7.7	1	23
15	0	6.5	7.7	-1	19
16	-1	6.5	7.7	1	20
17	-1	6.7	7.9	-1	27
18	-1	6.7	7.9	1	24
19	1	6.7	7.7	1	23
20	-1	6.7	7.9	1	26
21	0	6.7	7.7	-1	24
22	1	6.7	7.7	-1	23
23	0	6.7	7.9	1	22

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
24	0	6.7	7.7	-1	20
25	-1	6.5	7.7	-1	30
26	-1	6.5	7.9	-1	27
27	0	6.7	7.7	1	28
28	0	6.7	7.7	-1	20
29	1	6.5	7.9	1	23
30	0	6.5	7.9	-1	20
31	0	6.5	7.9	-1	19
32	1	6.5	7.9	1	23
33	-1	6.5	7.7	-1	30
34	-1	6.5	7.7	-1	26
35	-1	6.7	7.9	-1	22
36	-1	6.5	7.9	-1	19
37	-1	6.7	7.9	-1	24
38	-1	6.7	7.9	1	23
39	-1	6.7	7.9	1	26
40	-1	6.7	7.7	-1	26
41	-1	6.7	7.7	1	26
42	1	6.7	7.7	-1	20
43	0	6.5	7.7	-1	24
44	1	6.5	7.9	1	24
45	1	6.5	7.7	-1	20
46	1	6.5	7.7	-1	20

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ผู้หนีโบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
47	0	6.7	7.7	1	23
48	1	6.5	7.7	-1	22
49	0	6.5	7.7	1	20
50	-1	6.5	7.7	-1	30
51	1	6.5	7.7	1	27
52	-1	6.5	7.9	1	24
53	1	6.5	7.9	-1	23
54	1	6.7	7.7	1	23
55	0	6.7	7.7	1	26
56	1	6.7	7.7	1	23
57	1	6.7	7.9	-1	22
58	-1	6.7	7.7	1	27
59	0	6.5	7.7	1	26
60	0	6.5	7.9	1	20
61	-1	6.5	7.7	-1	25
62	0	6.5	7.9	-1	19
63	1	6.5	7.7	1	22
64	-1	6.7	7.7	-1	23
65	-1	6.5	7.9	-1	27
66	0	6.7	7.9	-1	23
67	1	6.7	7.9	-1	22
68	1	6.7	7.9	1	20
69	-1	6.7	7.7	-1	26

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
70	0	6.7	7.7	1	23
71	0	6.7	7.9	1	20
72	-1	6.5	7.7	1	24
73	0	6.5	7.9	1	23
74	-1	6.7	7.7	1	26
75	0	6.7	7.7	1	24
76	1	6.7	7.9	1	24
77	0	6.5	7.7	-1	19
78	1	6.7	7.7	-1	22
79	-1	6.5	7.7	1	20
80	0	6.5	7.9	1	22
81	-1	6.7	7.7	-1	22
82	0	6.7	7.7	-1	22
83	1	6.5	7.7	1	24
84	0	6.5	7.9	-1	21
85	0	6.5	7.7	-1	20
86	-1	6.5	7.9	1	22
87	1	6.7	7.9	1	23
88	1	6.5	7.7	-1	22
89	0	6.7	7.7	-1	23
90	1	6.7	7.9	1	24
91	0	6.5	7.7	1	23
92	0	6.7	7.7	1	24

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
93	-1	6.5	7.9	1	26
94	-1	6.5	7.9	-1	20
95	-1	6.7	7.7	-1	24
96	-1	6.7	7.9	-1	26
97	-1	6.5	7.9	-1	22
98	0	6.5	7.9	1	20
99	0	6.7	7.7	-1	24
100	0	6.5	7.7	1	23
101	-1	6.5	7.9	-1	20
102	-1	6.7	7.9	-1	27
103	0	6.7	7.9	1	20
104	-1	6.7	7.7	-1	20
105	-1	6.7	7.7	-1	20
106	-1	6.7	7.7	-1	22
107	0	6.7	7.7	1	23
108	-1	6.5	7.7	-1	22
109	-1	6.5	7.9	-1	22
110	1	6.5	7.9	1	19
111	-1	6.5	7.7	1	23
112	-1	6.7	7.7	-1	26
113	1	6.7	7.7	-1	23
114	-1	6.7	7.9	1	26
115	0	6.5	7.7	1	22

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้ โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
116	0	6.5	7.7	1	26
117	1	6.7	7.9	-1	22
118	1	6.7	7.7	1	24
119	1	6.7	7.9	1	24
120	0	6.7	7.9	-1	20
121	1	6.7	7.7	-1	24
122	0	6.5	7.7	-1	20
123	-1	6.5	7.7	1	24
124	1	6.5	7.9	-1	20
125	1	6.7	7.9	-1	20
126	0	6.5	7.7	1	22
127	1	6.5	7.9	1	20
128	1	6.7	7.7	-1	23
129	-1	6.5	7.9	-1	24
130	0	6.7	7.7	-1	23
131	1	6.5	7.7	-1	20
132	0	6.5	7.9	-1	23
133	0	6.7	7.9	-1	22
134	1	6.5	7.7	1	20
135	1	6.7	7.7	-1	24
136	1	6.5	7.9	1	22
137	0	6.5	7.7	-1	23
138	0	6.5	7.9	-1	22

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
139	-1	6.5	7.9	1	21
140	-1	6.7	7.9	-1	23
141	-1	6.5	7.9	1	21
142	0	6.5	7.7	-1	20
143	0	6.5	7.7	-1	24
144	-1	6.5	7.9	1	24
145	-1	6.5	7.9	1	24
146	1	6.7	7.9	1	23
147	0	6.7	7.9	1	22
148	1	6.7	7.7	1	24
149	-1	6.5	7.7	-1	25
150	-1	6.5	7.7	-1	28
151	0	6.7	7.9	-1	24
152	1	6.5	7.7	1	22
153	-1	6.5	7.9	-1	24
154	-1	6.5	7.9	1	23
155	0	6.7	7.9	-1	24
156	-1	6.7	7.7	1	26
157	-1	6.7	7.7	-1	23
158	0	6.7	7.9	1	23
159	-1	6.7	7.9	-1	27
160	0	6.5	7.7	-1	22
161	0	6.7	7.7	1	26

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
162	-1	6.5	7.9	-1	23
163	-1	6.5	7.7	-1	23
164	-1	6.7	7.9	-1	26
165	-1	6.7	7.7	1	24
166	0	6.5	7.9	1	22
167	-1	6.5	7.9	-1	22
168	-1	6.5	7.9	1	20
169	1	6.5	7.7	1	23
170	0	6.5	7.9	1	22
171	1	6.5	7.7	-1	23
172	1	6.5	7.7	1	26
173	0	6.7	7.9	-1	22
174	0	6.5	7.9	1	23
175	0	6.5	7.9	-1	20
176	1	6.7	7.9	-1	20
177	1	6.7	7.9	-1	22
178	0	6.7	7.9	-1	23
179	1	6.5	7.9	-1	22
180	0	6.7	7.9	1	23
181	0	6.5	7.7	1	26
182	-1	6.5	7.9	-1	23
183	1	6.5	7.9	-1	23
184	-1	6.5	7.7	1	23

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของรู (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ของโบลท์ (มม.)	ผู้คนที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
185	1	6.7	7.7	1	22
186	1	6.5	7.9	1	20
187	1	6.7	7.7	1	23
188	0	6.7	7.9	1	24
189	-1	6.5	7.7	-1	23
190	-1	6.5	7.7	-1	26
191	-1	6.5	7.7	-1	30
192	0	6.5	7.7	1	23
193	-1	6.7	7.9	-1	27
194	1	6.5	7.9	-1	19
195	-1	6.7	7.9	1	23
196	0	6.7	7.9	-1	20
197	-1	6.7	7.7	-1	27
198	-1	6.7	7.9	-1	24
199	-1	6.7	7.7	-1	23
200	-1	6.7	7.9	-1	24
201	0	6.5	7.7	1	26
202	-1	6.7	7.9	-1	23
203	-1	6.7	7.7	-1	23
204	1	6.5	7.9	-1	20
205	1	6.7	7.7	1	20
206	1	6.7	7.7	1	24
207	1	6.5	7.9	1	22

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รู้	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
208	-1	6.7	7.7	-1	22
209	1	6.5	7.7	-1	22
210	0	6.7	7.7	1	26
211	-1	6.7	7.9	1	22
212	-1	6.7	7.7	-1	23
213	0	6.7	7.7	-1	20
214	0	6.5	7.9	1	23
215	1	6.5	7.7	1	24
216	-1	6.7	7.9	1	23
217	1	6.7	7.9	1	22
218	-1	6.7	7.7	1	27
219	1	6.7	7.9	1	22
220	1	6.7	7.9	-1	20
221	1	6.5	7.9	1	24
222	0	6.5	7.9	-1	20
223	0	6.7	7.9	1	22
224	1	6.5	7.9	1	20
225	0	6.7	7.9	1	20
226	1	6.7	7.9	1	23
227	-1	6.5	7.7	-1	30
228	1	6.5	7.7	1	22
229	-1	6.7	7.7	-1	26
230	0	6.7	7.9	-1	20

ตารางภาคผนวก ข-1 ข้อมูลค่าแรงบิดที่ทำให้โบลท์ขาดหลังจากการปรับค่าเป็นตัวเลข (ต่อ)

ลำดับ	ของเหลวที่รัฐ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางของโบลท์ (มม.)	ฝุ่นที่โบลท์	ค่าแรงบิด (นิวตัน-เมตร)
231	1	6.7	7.9	1	24
232	0	6.7	7.9	1	22
233	-1	6.5	7.9	-1	24
234	1	6.5	7.9	-1	23
235	-1	6.7	7.9	1	26
236	1	6.7	7.9	-1	20
237	-1	6.5	7.7	1	20
238	-1	6.7	7.7	1	24
239	1	6.5	7.9	-1	20
240	-1	6.5	7.7	1	24