

การประยุกต์ Axiomatic Design และเมทริกซ์ข้อจำกัดในกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม

An Application of Axiomatic Design and Constraints Relation Matrix in Engineering Design Process

ศีกฤทธิ พรหมสุ้ย ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Kuekrit Promsui Nattawut Jantong

Department of Production Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

*Corresponding author: Email: kuek-rit@outlook.com

บทคัดย่อ

ในกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรมนักออกแบบมักต้องมีการแก้ไขข้อผิดพลาดอยู่เสมอ เพื่อให้สิ่งที่ออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนด ทั้งในด้านประโยชน์ใช้สอยและข้อจำกัดการใช้งานต่าง ๆ ความจำเป็นที่ต้องมีการแก้ไขข้อผิดพลาดส่วนใหญ่เกิดจากการที่นักออกแบบไม่สามารถวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้าได้อย่างครบถ้วนทั้งในช่วงเริ่มต้นและระหว่างกระบวนการออกแบบ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ในการวิเคราะห์โครงสร้างฟังก์ชันการทำงานและออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยอาศัยเมทริกซ์ข้อจำกัดเป็นเกณฑ์ในการควบคุมเพื่อลดทางเลือกในการออกแบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นข้อจำกัดด้านการใช้งานที่สัมพันธ์กับโมดูลหลัก และข้อจำกัดด้านเทคนิคที่มีในระดับย่อยลงไป จากความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของข้อจำกัดในระดับต่าง ๆ ข้อจำกัดทั้งหมดจะถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับทุกชิ้นส่วนในระหว่างกระบวนการออกแบบ ทำให้มั่นใจว่าไม่มีข้อจำกัดใดถูกมองข้ามเพื่อลดปัญหาในการออกแบบ

คำสำคัญ: ทฤษฎีเอ็กซีแมติกดีไซน์ เมทริกซ์ข้อจำกัด การออกแบบทางวิศวกรรม

ABSTRACT

Redesign often occurs during the process of the engineering design to meet specifications of customer requirements in term of functional requirements and usage limitations, since the requirements cannot be completely analyzed at the beginning and during the design process. To reduce this problem, this research proposes the application of using axiomatic design theory to analyze the function structure and physical design by applying the Constraint Relation Matrix (CRM), that was developed to consider the relationship between the design solution and design constraints at every step of the decision making for reducing the possible alternatives of design solution. The design constraints are classified into two types: operation constraints, which are considered in module level, and technique constraints, which are considered in sub module until part level. By understanding the relationship of constraints at every level, all constraints will be considered together with all component

parts related during the design process for confirming, that all constraints will be considered and the designer will not face to the problem of the redesign.

Keyword: Axiomatic Design, Constraint Relation Matrix, Engineering Design.

1. บทนำ

การออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อให้ได้สิ่งประดิษฐ์หรือชิ้นส่วนทางกล ในแต่ละทฤษฎีการออกแบบจะมีการกำหนดระเบียบวิธีการออกแบบและมุมมองของกระบวนการออกแบบที่แตกต่างกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้เข้าใจหน้าที่การทำงานของระบบที่ต้องการออกแบบและสามารถลดความซับซ้อนหรือความไม่แน่นอนในการออกแบบทางวิศวกรรม ขั้นตอนในการออกแบบจะเป็นการแปลงความต้องการของลูกค้าเป็นหน้าที่การทำงานและนำไปสู่ทางเลือกในการออกแบบเพื่อคัดเลือกทางเลือกที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนนั้นสามารถทำงานได้ตรงตามต้องการ ดังนั้นการเข้าใจถึงโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (Product Structure) รวมถึงการประเมินทางเลือกในการออกแบบ จะนำไปสู่การได้มาซึ่งแบบหรือชิ้นส่วนที่เหมาะสม [1]

ปัญหาส่วนใหญ่ที่มักพบในการออกแบบคือ การได้มาซึ่งโครงสร้างผลิตภัณฑ์นั้นจะอาศัยประสบการณ์ของนักออกแบบหรือวิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญในสาขานั้นเป็นหลัก ทำให้นักออกแบบที่ขาดประสบการณ์หรือไม่เชี่ยวชาญในสาขานั้นไม่สามารถออกแบบสิ่งประดิษฐ์ได้บรรลุตามเป้าหมายที่ต้องการ หรืออาจใช้เวลาในกระบวนการออกแบบนาน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะนำเสนอระเบียบวิธีการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ให้นักออกแบบสามารถเข้าใจลำดับขั้นตอนของกระบวนการออกแบบที่ชัดเจนโดยมุ่งเน้นให้นักออกแบบที่ขาดประสบการณ์ในการออกแบบสามารถออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ในการอ้างอิงและทำความเข้าใจมุมมองของกระบวนการออกแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในการเรียบ

เรียงระเบียบวิธีการออกแบบ เพื่อออกแบบทางเลือกในการออกแบบให้สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานตามความต้องการของลูกค้า โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดในการออกแบบ ซึ่งกระบวนการออกแบบนี้จะช่วยให้นักออกแบบมองข้อจำกัดในการออกแบบได้อย่างครอบคลุมและลดการลองผิดลองถูกซึ่งส่งผลให้กระบวนการออกแบบดำเนินไปอย่างราบรื่น กล่าวคือไม่มีชิ้นส่วนใดเกิดข้อขัดแย้งกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ในระหว่างกระบวนการออกแบบ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเริ่มต้นของการคิดค้นวิธีการออกแบบที่เป็นระบบ Pahl *et al.* [2] กล่าวถึง การออกแบบทางวิศวกรรมอย่างเป็นระบบโดยใช้เทคนิคและประสบการณ์ในการออกแบบเพื่อให้สามารถจินตนาการถึงฟังก์ชันเพื่อแยกฟังก์ชันย่อย จากนั้นค้นหากลุ่มชิ้นส่วนหรือโมดูลต่าง ๆ โดยรวมเพื่อตอบสนองต่อฟังก์ชันนั้น ๆ [3-4] ต่อมามีการพัฒนาระเบียบวิธีการออกแบบ โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันหลักของการทำงาน จากนั้นค้นหาทางเลือกในการออกแบบทางกายภาพที่ตอบสนองต่อฟังก์ชันหลักนั้นแล้วจึงแบ่งฟังก์ชันย่อย และดำเนินการต่อไปจนกระบวนการออกแบบเสร็จสิ้น [5] ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ทำให้การแบ่งฟังก์ชันย่อยสามารถจินตนาการได้ง่ายกว่าและเป็นจุดที่แตกต่างจากการออกแบบของ Pahl *et al.* [2]

นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีการออกแบบที่กล่าวถึงหลักการทางฟิสิกส์เป็นแนวคิดหลัก [6-8] กล่าวคือ การใช้งานการออกแบบทางวิศวกรรมโดยใช้ทฤษฎี เอฟ บี เอส (Function-Behavior-Structure; FBS) โดยส่วนที่เป็นจุดเด่นของทฤษฎีเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมที่คาดหวัง (Expected Behavior; Be) จากนั้นคิดค้นแต่ละแนวคิดและหาค่าพฤติกรรมของระบบ (System Behavior; Bs) และทำการ

หาพื้นที่ทับซ้อนกันของ Be และ Bs เพื่อตัดสินใจเลือกแนวคิดจากพื้นที่ได้กราฟที่ทับซ้อนกัน

Suh [9] นำเสนอทฤษฎี Axiomatic Design ที่มีมุมมองของกระบวนการออกแบบ 4 มุมมอง คือ ด้านความต้องการของลูกค้า (Customer Domain; CD) ด้านหน้าที่การทำงาน (Functional Domain; FD) ด้านการออกแบบและด้านกระบวนการผลิต ลดความซับซ้อนในการออกแบบ [10] โดยทฤษฎีนี้มีจุดเด่นคือ การพิจารณาฟังก์ชันการทำงานและทางเลือกในการออกแบบเป็นแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ซึ่งเป็นการลดความซับซ้อนในงานออกแบบ [11] โดย Suh [12] กล่าวว่า ทุกแนวคิดในการออกแบบต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดในการออกแบบ

ในการวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบ Johannessson และ Claesson [13] ได้เพิ่ม Cs เข้าไปในกระบวนการสลับคิดซ้ำๆ ซึ่งกล่าวถึงการที่ Cs จะเป็นตัวกำหนดแนวคิดในการออกแบบในลำดับถัดไป ในปัจจุบันทฤษฎี Axiomatic Design มีการพัฒนาเป็น Fuzzy Axiomatic Design (FAD) โดย Kannan [14] ประยุกต์ใช้ FAD ในการวิเคราะห์เพื่อเลือกผู้ส่งมอบในห่วงโซ่อุปทานในเชิงสิ่งแวดล้อม ในด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรมเครื่องมือหนึ่งที่ถูกนำไปใช้ร่วมกับ Axiomatic Design อย่างแพร่หลาย คือ เครื่องมือการกระจายการทำงานเชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) โดย M. Yang [15] นำไปใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์ข้อกำหนดต่าง ๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อม

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นการช่วยให้นักออกแบบที่ขาดประสบการณ์สามารถดำเนินการออกแบบได้โดยลดการลองผิดลองถูก ภายในงานวิจัยจึงเลือกใช้ทฤษฎี Axiomatic Design เนื่องจากในวิธีการสลับคิดซ้ำๆ ที่มีจุดเด่นเพื่อให้นักออกแบบสามารถค้นหาทางเลือกในการออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการที่ละฟังก์ชันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดจากการออกแบบที่ฟังก์ชันไม่ครบถ้วน นอกจากฟังก์ชันที่ครบถ้วนข้อจำกัดในการออกแบบก็เป็นอีกส่วนที่สำคัญต่อ

การออกแบบเช่นกัน ดังนั้นภายในงานวิจัยได้พัฒนาเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบเพื่อให้มั่นใจได้ว่าทางเลือกในการออกแบบที่เลือกใช้จะไม่ขัดแย้งกับข้อจำกัดในการออกแบบ

3. เปรียบวิธีการออกแบบ

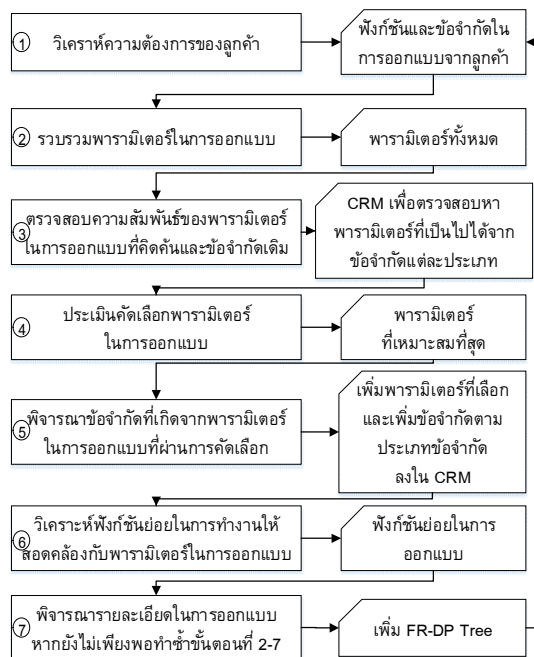
ในงานวิจัยนี้แสดงการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ในกระบวนการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ ทำการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันการทำงาน และทางเลือกในการออกแบบที่มีความสัมพันธ์กันและเหมาะสมที่สุด ซึ่งขั้นตอนการพิจารณาจะอาศัยวิธีการสลับคิดซ้ำๆ เพื่อให้เกิดการแบ่งแยกฟังก์ชันการทำงานและการคิดค้นทางเลือกในการออกแบบอย่างเป็นระบบ

นอกจากการออกแบบทางเลือกในการออกแบบได้ครบถ้วนตามฟังก์ชันที่ต้องการแล้ว นักออกแบบต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในการออกแบบ โดยภายในงานวิจัยนี้จำแนกข้อจำกัดในการออกแบบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้อจำกัดด้านการทำงาน (Operation Constraints; OC) และข้อจำกัดด้านเทคนิค (Technique Constraints; TC) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 ซึ่งการแบ่งกลุ่มข้อจำกัดนี้สามารถช่วยให้นักออกแบบคำนึงถึงมุมมองการกำหนดข้อจำกัดได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

ตารางที่ 1 ประเภทของข้อจำกัดในการออกแบบ

ข้อจำกัดด้านการทำงาน (Operation Constraints; OC)		
End-user Operation	EO	ด้านการทำงานของผู้ใช้
Maintenance	MT	ด้านการบำรุงรักษาอุปกรณ์
Set Up	Se	ด้านการเริ่มต้นใช้งาน
Material	Ma	ด้านลักษณะของวัตถุดิบ
ข้อจำกัดด้านเทคนิค (Technique Constraints; TC)		
Geometry	G	ด้านรูปร่าง/พื้นผิวภายนอก
Position	P	ด้านตำแหน่ง/ระยะ
Energy	E	ด้านพลังงาน
Properties Specifically	S	ด้านลักษณะจำเพาะที่ต้องการ
Assembly	A	ขนาดการประกอบ/ค่าเผื่อ

จากการพัฒนาแนวคิดในการออกแบบข้างต้น ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ใหม่ ได้ 7 ขั้นตอน ดังรูปที่ 1 เป็นขั้นตอนในการออกแบบโดยประยุกต์ใช้ Axiomatic Design ในขั้นตอนการวิเคราะห์ซ้ำๆ ร่วมกับการวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบโดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้น มาคือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ข้อจำกัด(Constraints Relation Matrix; CRM) ดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถจำแนกรายละเอียดของขั้นตอนทั้ง 7 ขั้นตอนได้ตามขั้นตอนที่ 3.1 ถึงขั้นตอนที่ 3.7



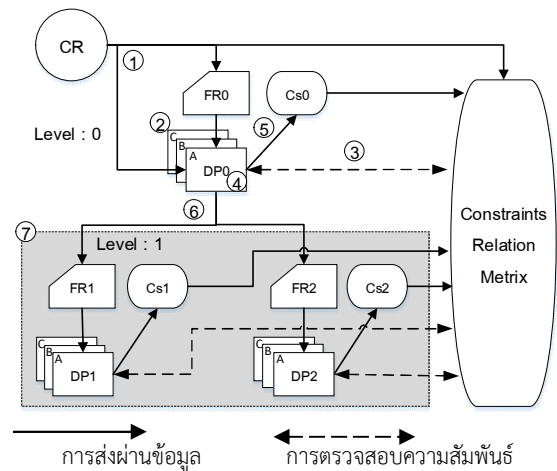
รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานและผลที่ได้ในแต่ละขั้นตอน โดยใช้วิธีการ Zig-zagging ร่วมกับ CRM

3.1 วิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า

ในขั้นตอนแรกของการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ใหม่ กระบวนการในการออกแบบเริ่มต้นจากรับข้อมูลความต้องการของลูกค้า จากนั้นต้องแปลงความต้องการของลูกค้าให้เป็นฟังก์ชันที่ต้องการ (Functional Requirement; FR) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า (Customer Requirement; CR) พร้อมทั้งระบุข้อจำกัดในการออกแบบ (Constraints; Cs) เพื่อค้นหาทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter; DP) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในขั้นตอน

ถัดไป โดยกระบวนการออกแบบจะแบ่งเป็นระดับตามการแบ่งฟังก์ชันย่อยดังนี้

- ระดับอุปกรณ์ (Level:0) ประกอบด้วย FR0, DP0, Cs0 เป็นระดับการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า
- ระดับโมดูลหลัก (Level:1) ประกอบด้วย FR1, DP1, Cs1 หรือตัวเลขอื่น ๆ 1 หลัก
- ระดับโมดูลย่อย (Level:2) ประกอบด้วย เช่น FR11, DP11, Cs11 หรือตัวเลขอื่น ๆ 2 หลัก
- ระดับชิ้นส่วน (Level:3) ที่แทนด้วยตัวเลข 3 หลัก ซึ่งถ้าหากมีการแบ่งย่อยมากขึ้นตามการแบ่งฟังก์ชันย่อยสามารถระบุเป็นระดับที่ 4, 5 หรือ 6 ต่อไป



รูปที่ 2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานและการส่งผ่านข้อมูลในระหว่างกระบวนการออกแบบโดยใช้วิธีการ Zig-zagging ร่วมกับ CRM

3.2 รวบรวมทางเลือกในการออกแบบ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการค้นหาทางเลือกในการออกแบบที่มีการคำนึงถึงหลักการทางวิศวกรรม โดยสามารถตอบสนองต่อฟังก์ชันการทำงานที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ตามเป้าหมาย ซึ่งพบว่าความหลากหลายของทางเลือกในการออกแบบจะมาจากประสบการณ์และการค้นคว้าของนักออกแบบ โดยทางเลือกเหล่านี้จะใช้สัญลักษณ์ A, B, หรือตัวอักษรอื่น ๆ ต่อท้าย DP เหล่านั้น ตัวอย่างเช่นทางเลือกในการออกแบบของ DP0 ถ้ามี 3 ทางเลือก ได้แก่ DP0-A, DP0-B และ DP0-C

3.3 ประเมินทางเลือกในการออกแบบที่มีการ

พิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆ

ขั้นตอนนี้จะนำทางเลือกมาเปรียบเทียบกับข้อจำกัดในการออกแบบทั้งหมด โดยใช้เครื่องมือ CRM ซึ่งพิจารณาว่าทางเลือกในการออกแบบที่จะผ่านการคัดเลือกไปสู่ขั้นตอนถัดไป ต้องไม่ขัดแย้งกับข้อจำกัดใด ๆ หากพบทางเลือกใดขัดแย้งกับข้อจำกัดให้พิจารณาตัดทางเลือกนั้นออก เนื่องจากทางเลือกเหล่านั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในงานออกแบบ

จากตารางที่ 2 เป็นตัวอย่างการใช้ CRM ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง DP และ Cs โดยการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการนำทางเลือกในการออกแบบทั้งหมดใส่ลงในตารางหลักที่ 1 ซึ่งในตัวอย่างมีจำนวน 3 ทางเลือก ประกอบไปด้วย DP0-A, DP0-B และ DP0-C จากนั้นใส่ข้อจำกัดในการออกแบบที่มีในตารางแถวที่ 1 ในตัวอย่างประกอบด้วย Cs0-1, Cs0-2 และ Cs0-3 โดยการพิจารณาจะใส่ตัวเลข 0,1 หรือ -1 ตามชนิดความสัมพันธ์ที่พบ ตัวอย่างเช่น DP0-A จะมีความสัมพันธ์กับ 2 ข้อจำกัด คือ Cs0-1 และ Cs0-3 แต่เมื่อสังเกตที่ DP0-C จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์แบบขัดแย้ง(-1) เกิดขึ้นกับ Cs0-2 ดังนั้นทางเลือก DP0-C จะถูกพิจารณาเพื่อตัดออกจากกระบวนการออกแบบในขั้นตอนนี้

ตารางที่ 2 ตัวอย่าง CRM ที่ใช้ในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง DP และ Cs

	Cs0-1	Cs0-2	Cs0-3	
DP0-A	1	0	1	0 ไม่มีความสัมพันธ์กัน 1 มีความสัมพันธ์กัน -1 ขัดแย้งกัน
DP0-B	1	1	0	
DP0-C	0	-1	1	

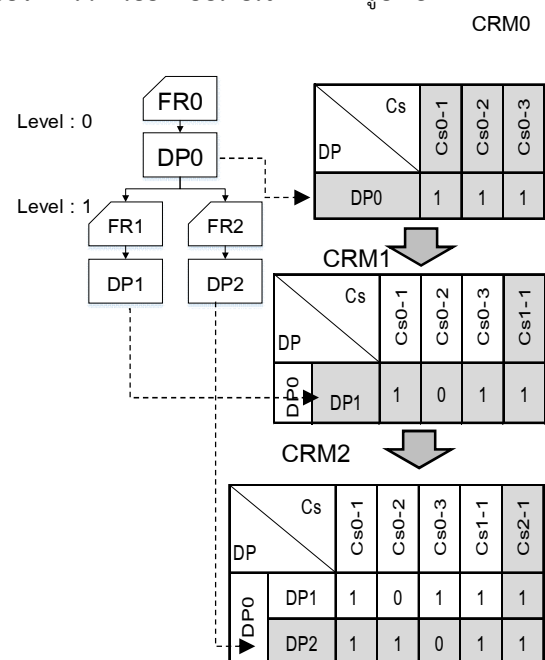
แต่ในกรณีที่ต้องการคงทางเลือกนั้นไว้ นักออกแบบต้องพิจารณาเพื่อทำการปรับปรุงทางเลือกในระดับก่อนหน้า ที่ทำให้เกิดข้อขัดแย้งนี้ ส่งผลให้ข้อจำกัดต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของทางเลือกและข้อจำกัดในระดับต่าง ๆ ใหม่ทั้งหมด เพื่อไม่ให้เกิดความขัดแย้งขึ้น

3.4 ประเมินคัดเลือกทางเลือกในการออกแบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการประเมินคัดเลือกทางเลือกในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการประเมินคัดเลือกพามีเตอร์มีด้วยกันหลายวิธี เช่น Ranking Method, Datum Method และ Kesseling Method เป็นต้น การเลือกวิธีการประเมินแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลที่มีและมุมมองที่ต้องการในการเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะใช้การประเมินแบบใด สิ่งสำคัญคือการกำหนดเกณฑ์การประเมินที่เหมาะสม กล่าวคือต้องเป็นเกณฑ์ที่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละทางเลือกในการออกแบบได้

3.5 พิจารณาข้อจำกัดที่เกิดจากทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการคัดเลือก

หลังจากการประเมินคัดเลือกเมื่อได้ทางเลือกในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการประเมินแล้วต้องทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทางเลือกที่ได้มารวมกับข้อจำกัดในการออกแบบโดยใช้ CRM ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การใช้งาน CRM โดยการขยายแถวและหลักเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างทางเลือกที่เลือกและข้อจำกัดในการออกแบบ

จากตัวอย่างในรูปที่ 3 เป็นการเพิ่มทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการประเมินคัดเลือกทีละ DP โดยทุกครั้งที่มีการเพิ่ม DP จะมีการเพิ่ม Cs เข้าไปด้วยเสมอ ซึ่งจากภาพในส่วน CRM0 เป็นการเพิ่มทางเลือกของ DPO ที่ผ่านการประเมินและเพิ่ม Cs0-1, Cs0-2 และ Cs0-3 เพื่อสร้างเป็นเมทริกซ์ CRM แรกสุด จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นโดยการเพิ่มตัวเลข 1, 0 และ -1 เพื่อแสดงความสัมพันธ์รูปแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 ถ้าหากพิจารณาแล้วพบความสัมพันธ์ที่ขัดแย้งกัน (-1) ต้องทำการปรับปรุงทางเลือกในการออกแบบเพื่อทำให้ CRM ไม่มีข้อขัดแย้งกัน (-1) ซึ่งจะเป็นการรีดีไซน์บางชิ้นส่วน

3.6 วิเคราะห์ฟังก์ชันย่อยในการทำงานให้สอดคล้องกับทางเลือกในการออกแบบ

ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์หาฟังก์ชันย่อยในการทำงานทั้งหมดที่ทำงานร่วมกันเพื่อให้ทางเลือกในการออกแบบที่ได้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยการแบ่งฟังก์ชันย่อย FR ย่อยต้องมีย่อย 2 FR ขึ้นไป และถือว่า FR ที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ใน Level ถัดไปจากฟังก์ชันเดิม ถ้าหากเกิดกรณีที่ไม่สามารถระบุ FR ย่อยได้มาก กว่า 1 FR นักออกแบบสามารถทำการระบุรายละเอียดการออกแบบของ DP นั้น ๆ โดยไม่ต้องวิเคราะห์ FR ต่อ เพื่อเตรียมการจัดทำชิ้นงานต้นแบบ

3.7 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 7 จนกระทั่งสามารถระบุรายละเอียดในการออกแบบได้ครบถ้วน

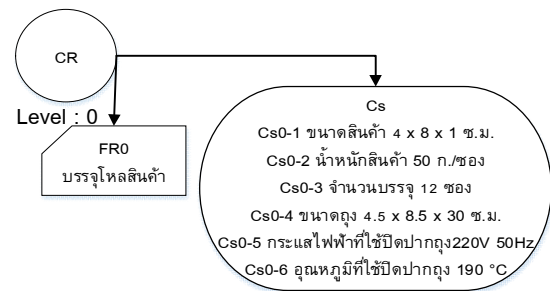
เมื่อได้ฟังก์ชันย่อยในการทำงานที่สอดคล้องกับทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว นักออกแบบจะต้องรวบรวมทางเลือกในการออกแบบที่ตอบสนองต่อฟังก์ชันการทำงานย่อยนั้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ 2 ของการออกแบบข้างต้น จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนถัดมาจนกว่าจะสามารถระบุรายละเอียดการออกแบบได้ครบถ้วน เพียงพอที่จะจัดทำชิ้นงานต้นแบบ

4. กรณีศึกษาการใช้ระเบียบวิธีกรออกแบบในการออกแบบอุปกรณ์บรรจุโพลีลีน

ในงานวิจัยนี้จะทดลองออกแบบอุปกรณ์บรรจุโพลีลีนด้วยอาศัยขั้นตอนระเบียบวิธีการออกแบบ 7 ขั้นตอนที่น่าเสนอไปในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นกรณีศึกษา จากการทดลองออกแบบตามขั้นตอนระเบียบวิธีการออกแบบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 ซึ่งแสดงใน 4.1-4.7

4.1 วิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า

ความต้องการของลูกค้าที่ต้องการอุปกรณ์บรรจุโพลีลีนที่สามารถบรรจุโพลีลีนได้ที่เป็นซองเกลียวขนาดเล็กที่ไม่สามารถวางตั้งได้ โดยมีข้อกำหนดว่าการปิดปากถุงต้องปิดด้วยการซีลด้วยความร้อน



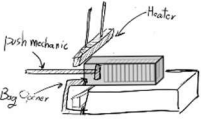
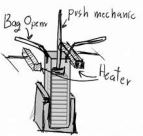
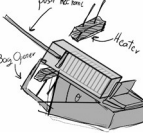
รูปที่ 4 การเปลี่ยนความต้องการของลูกค้าเป็นฟังก์ชันและข้อจำกัดในการออกแบบ

จากรูปที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้าเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันหลักในการออกแบบ 1 ฟังก์ชันซึ่งแทนด้วย FR0 บรรจุโพลีลีน และข้อจำกัดในการออกแบบ 6 ข้อจำกัด Cs0-1 ถึง Cs0-6

4.2 รวบรวมทางเลือกในการออกแบบ

จากตารางที่ 3 ฟังก์ชันหลัก FR0 บรรจุโพลีลีน สามารถคิดค้นหลักการหรือแนวคิดที่เป็นไปได้มีทั้งหมด 3 แนวคิด เนื่องจากในฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันแรกของกระบวนการทำให้แนวคิดที่เป็นไปได้สามารถระบุได้เพียงลักษณะทิศทางการบรรจุเท่านั้น ได้แก่ DPO-A การบรรจุโพลีลีนแนวนอน DPO-B การบรรจุโพลีลีนแนวตั้ง และ DPO-C การบรรจุโพลีลีนแนวเอียงทำมุม

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของแนวคิดของ FR0

แนวคิดในการออกแบบ (DP)	รายละเอียด
 DP0-A อุปกรณ์บรรจุนวนอน	บรรจุนวนอนโดยการเรียงสินค้าและทำการสวมถุงนนวนอน
 DP0-B อุปกรณ์บรรจุนวนตั้ง	บรรจุนวนอนโดยการเรียงสินค้าและทำการสวมถุงนนวนตั้ง
 DP0-C อุปกรณ์บรรจุนวนทำมุม	บรรจุนวนอนโดยการเรียงสินค้าและทำการสวมถุงนนวนโดยการเรียงสินค้าและถุง

4.3 ตรวจสอบความสัมพันธ์ของทางเลือกในการออกแบบและข้อจำกัดเดิม

ตารางที่ 4 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละ DP และ Cs โดยใช้ CRM

ข้อจำกัดในการออกแบบ (Constraint)	ทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter)					
	Cs0-1 สินค้าขนาด 4 x 8 x 1 ซม.	Cs0-2 สินค้าขนาด 50 ก/ซอง	Cs0-3 จำนวนบรรจุ 12 ซอง	Cs0-4 ถุงขนาด 4.5 x 8.5 x 30 ซม.	Cs0-5 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ปิดปากถุง 220v	Cs0-6 อุณหภูมิที่ใช้ปิดปากถุง 190 °C
DP0-A บรรจุนวนอน	1	1	1	1	1	1
DP0-B บรรจุนวนตั้ง	1	1	1	1	1	1
DP0-C บรรจุนวนเอียงทำมุม	1	1	1	1	1	1

จากตารางที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง DP และ Cs ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการออกแบบฟังก์ชันแรกทุกอย่างเกิดจากความต้องการของลูกค้าทั้งสิ้น

ส่งผลให้ทุก ๆ แนวคิดของ DP0 เกี่ยวข้องกับ Cs ทุกข้อจำกัดและไม่ขัดแย้งกับ Cs ใด ๆ เลย ดังนั้น DP0 ทุกแนวคิดจึงถูกนำเข้าสู่กระบวนการประเมินคัดเลือก

4.4 ประเมินคัดเลือกทางเลือกในการออกแบบ

ตารางที่ 5 การประเมินคัดเลือกแนวคิดโดยใช้การประเมินประเภท Ranking Method

Criteria	DP0-A	DP0-B	DP0-C
สะดวกต่อการปฏิบัติงาน	3	2	1
ขนาดของอุปกรณ์	1	3	2
การรักษาความปลอดภัย	2	1	3
ง่ายต่อการบำรุงรักษา	3	2	1

	DP0-A	DP0-B	DP0-C
Copeland Rule	0	-4	-8
Rank-sum Rule	12	10	8
	A vs B	B vs C	A vs C
Majority Rule	DP-A	DP-B	DP-A

สีเทา คือ แนวคิดที่ผ่านการคัดเลือกในแต่ละวิธีคำนวณ

จากตารางที่ 5 เป็นการประเมินคัดเลือกประเภท Ranking Method และใช้การตัดสินใจ 3 วิธี ได้แก่ Copeland Rule, Rank-sum Rule และ Majority Rule ซึ่งผลจากการประเมินคัดเลือกพบว่า DP0-A วิธีการบรรจุนวนอน ได้รับการคัดเลือกเป็นอันดับหนึ่งจากผลการตัดสินใจจากทั้ง 3 วิธี และเมื่อผ่านการคัดเลือกแล้วให้เขียนแทน DP0-A คือ DP0

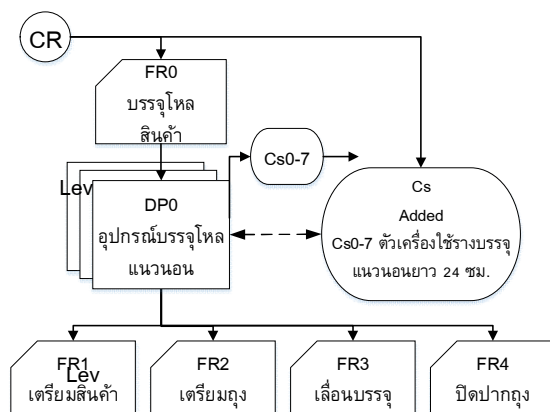
4.5 พิจารณาข้อจำกัดที่เกิดจากทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการคัดเลือก

จากตารางที่ 6 ทำการวิเคราะห์ว่า DP0 มีการเพิ่มข้อจำกัดหรือไม่ ในกรณีนี้มีการเพิ่ม DP0 การบรรจุนวนอน ซึ่งหมายความว่า รางบรรจุนวนอนต้องวางราบและต้องมีขนาดไม่น้อยกว่าสินค้า 12 ซองเรียงติดกันในนวนอน ซึ่งก็คือ 24 ซม. ดังนั้นจึงมี Cs0-7 ตัวเครื่องใช้รางบรรจุนวนอนยาว 24 ซม. เพิ่มเข้าไปใน CRM ซึ่งจะเป็นหนึ่งในข้อจำกัดที่จะควบคุม DP อื่น ๆ ทั้งหมด

ตารางที่ 6 การเพิ่มข้อมูล DP และ Cs ลงใน CRM

ข้อจำกัดในการออกแบบ (Constraint)							
	Cs0-1สินค้าขนาด 4 x 8 x 1 ซม.	Cs0-2 สินค้าหนัก 50 ก./ช่อง	Cs0-3 จำนวนบรรจุ 12 ช่อง	Cs0-4 ถังขนาด 4.5 x 8.5 x 30 ซม.	Cs0-5 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ปิดปากถุง 220v	Cs0-6 อุณหภูมิที่ใช้ปิดปากถุง 190 °C	Cs0-7 ตัวเครื่องใช้บรรจุแวนอนยาว 24 ซม.
ทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter)	Ma	Ma	Ma	Ma	Se	E	EO
DPOบรรจุโหลแวนอน	1	1	1	1	1	1	1

4.6 วิเคราะห์ฟังก์ชันย่อยให้สอดคล้องกับทางเลือกในการออกแบบ



รูปที่ 5 Function Decomposition ของ DP

จากรูปที่ 5 ทางเลือกในการออกแบบ DP0 อุปกรณ์บรรจุโหลแวนอน สามารถจำแนกฟังก์ชันหลักของอุปกรณ์ได้ 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ FR1 การเตรียมสินค้า, FR2 การเตรียมถุงบรรจุ, FR3 การบรรจุโหล และ FR4 การปิดปากถุง

4.7 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 7 จนกระทั่งสามารถระบุรายละเอียดในการออกแบบได้ครบถ้วน

เมื่อดำเนินการออกแบบทั้ง 7 ขั้นตอน กับทุกฟังก์ชัน ประกอบด้วย FR1, FR2, FR3 และ FR4 ซึ่งทางเลือกที่ขัดแย้งกันใน CRM จะถูกตัดออก (สีเทาในตาราง) ในตารางที่ 7 และข้อจำกัดทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างการออกแบบสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 7 CRM ของการคัดเลือก DP1 จนถึง DP4

Cs																
	Cs0-1	Cs0-2	Cs0-3	Cs0-4	Cs0-5	Cs0-6	Cs0-7	Cs1-1	Cs1-2	Cs2-1	Cs2-2	Cs2-3	Cs3-1	Cs3-2	Cs3-3	Cs4-1
DP	Ma	Ma	Ma	Ma	Se	E	EO	A	G	P	A	E	P	E	G	P
DP1-A	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	-1	1
DP1-B	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
DP1-C	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
DP2-A	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
DP2-B	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	0
DP2-C	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	0
DP3-A	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
DP3-B	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
DP3-C	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
DP4-A	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
DP4-B	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
DP4-C	1	0	1	1	1	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทุก DP และ Cs โดยแบ่งตามกลุ่มตามตารางที่ 1 พบว่า มีข้อขัดแย้งกันเกิดขึ้น 4 ข้อขัดแย้ง ได้แก่ 1) DP1-A รางบรรจุสามารถปรับระยะได้ ขัดแย้งกับ Cs3-3 รางสินค้าขนาดเล็กกว่าถ่วง ซึ่งเป็นความขัดแย้งทางด้านรูปร่าง(G), 2) DP2-B ชุดเปิดปากดูจากด้านนอก และ 3) DP2-C ใช้แรงลมเปิดและยึดถุง ขัดแย้งกับ Cs3-2 แรงยึดถุงมากกว่าแรงที่สินค้าเลื่อนเข้า ซึ่งเป็นความขัดแย้งทางด้านแรงเสียดทาน(P), และข้อขัดแย้งข้อสุดท้ายคือ 4) DP4-C ซิลด้วยความร้อนประกบแนวตั้ง ขัดแย้งกับ Cs1-2 ถังวางเรียงแวนอน ซึ่งความขัดแย้งที่เกิดขึ้นขัดแย้งกับข้อจำกัดทางด้านรูปร่าง (G) ซึ่งแสดงเป็นภาพแนวคิดที่ผ่านการคัดเลือกและแนวคิดที่ถูกตัดออกในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปการเลือก DP ในการออกแบบ Level:1

DP FR	Alternative of Design Parameter		
FR1 เตรียมสินค้า	 DP1-A รางบรรจุปรับระยะได้ ขัดแย้งกับ Cs3-3 รางสินค้า ขนาดเล็กกว่าถู่	 DP1-B รางบรรจุขนาดเท่ากับ ความกว้างของสินค้า	 DP1-C รางบรรจุขนาดเท่ากับ ความยาวของสินค้า
FR2 เตรียมถู่	 DP2-A ชุดเปิดปากถู่จากด้าน ใน	 DP2-B ชุดเปิดปากถู่จากด้านนอก ขัดแย้งกับ Cs3-2 แรงยึด ถูงมากกว่าแรงที่สินค้า เลื่อนเข้า	 DP2-C ใช้แรงลมเปิดและยึดถู่ ขัดแย้งกับ Cs3-2 แรง ยึดถูงมากกว่าแรงที่ สินค้าเลื่อนเข้า
FR3 เลื่อนบรรจุ	 DP3-A ชุดเลื่อนถู่เข้าหาสินค้า	 DP3-B ชุดเลื่อนถู่เข้าเข้าไปใน ถู่	 DP3-C เลื่อนทั้งสินค้าและถู่ เข้าหากัน
FR4 ปิดปากถู่	 DP4-A ซิลด้วยความร้อนจาก ด้านบน	 DP4-B ซิลด้วยความร้อนจาก ด้านล่าง	 DP4-C ซิลด้วยความร้อน ประคบแนวตั้ง ขัดแย้งกับ Cs1-2 รางรูป ตัวยูวางสินค้าเรียงติดกัน 12ช่องแนวนอน

ตารางที่ 9 ข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบ

No.Cs.	Type	รายละเอียด
Cs0-1	Ma	ขนาดสินค้า 4 x 8 x 1 ซม.
Cs0-2	Ma	น้ำหนักสินค้า 50 ก./ช่อง
Cs0-3	Ma	จำนวนบรรจุ 12 ช่อง
Cs0-4	Ma	ขนาดถู่ 4.5 x 8.5 x 30 ซม.
Cs0-5	Se	ใช้ไฟฟ้า 220V 50Hz ในการปิดปากถู่
Cs0-6	EO	ตัวเครื่องใช้รางบรรจุแนวนอนยาว 24 ซม.
Cs1-1	G	รางตัวยูวางสินค้าเรียงติดกัน 12 ช่องแนวนอน
Cs1-2	A	รางบรรจุขนาด 4.5 x 8 x 25 ซม.
Cs2-1	P	เปิดปากถู่ได้ไม่น้อยกว่า 4.5 x 7.3 ซม.
Cs2-2	A	ส่วนที่อยู่ในถู่หนาไม่เกิน 3 มม.
Cs2-3	E	สามารถสร้างแรงยึดถู่ได้มากกว่าแรง
Cs3-1	P	ระยะเลื่อนไม่น้อยกว่า 24 ซม.
Cs3-2	E	แรงยึดถูงมากกว่าแรงที่สินค้าเลื่อนเข้า
Cs3-3	G	รางสินค้าขนาดเล็กกว่าถู่
Cs4-1	P	ระยะซิลจากปากถู่ไม่น้อยกว่า 4 ซม.
Cs4-2	G	จุดซิลกว้าง 5 มม. ยาว 15 ซม.

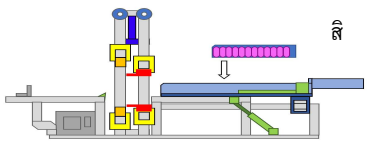
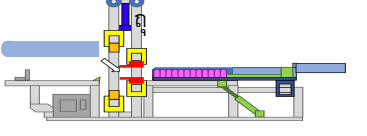
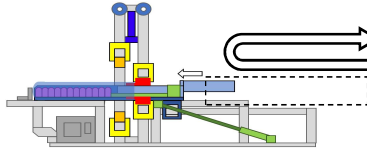
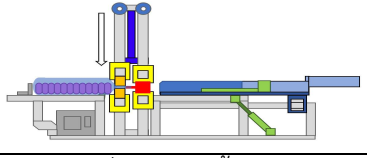
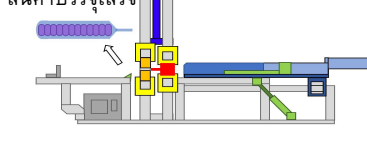
ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ของ FR และ DP ใน Level:1

DP FR	DP1	DP2	DP3	DP4
FR1	1	0	0	0
FR2	0	1	0	0
FR3	1	0	1	0
FR4	0	1	1	1

เมื่อเสร็จสิ้นการออกแบบในแต่ละระดับ (Level) สามารถสรุปความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนและฟังก์ชันได้ดังตารางที่ 10 ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถบอกได้ว่าในกระบวนการปรับปรุงการออกแบบหากต้องการให้ FR3 ทำงานต้องให้ชิ้นส่วน DP1 ทำงานก่อน แล้ว DP3 จึงเริ่มทำงาน จึงสามารถบรรลุได้ตามฟังก์ชัน FR3 และมี FR4 ที่

ต้องให้ DP2 และ DP3 ทำงานก่อน แล้ว DP4 จึงเริ่มทำงาน จึงจะบรรลุได้ตามฟังก์ชันของ FR4 ซึ่งการทำงานของชิ้นส่วนเหล่านี้ตามทฤษฎี Axiomatic Design ถือว่าเป็นความสัมพันธ์ของการทำงานในเชิงลำดับ (Uncoupled Design)

ตารางที่ 11 การทำงานของอุปกรณ์บรรจุโหลสินค้า

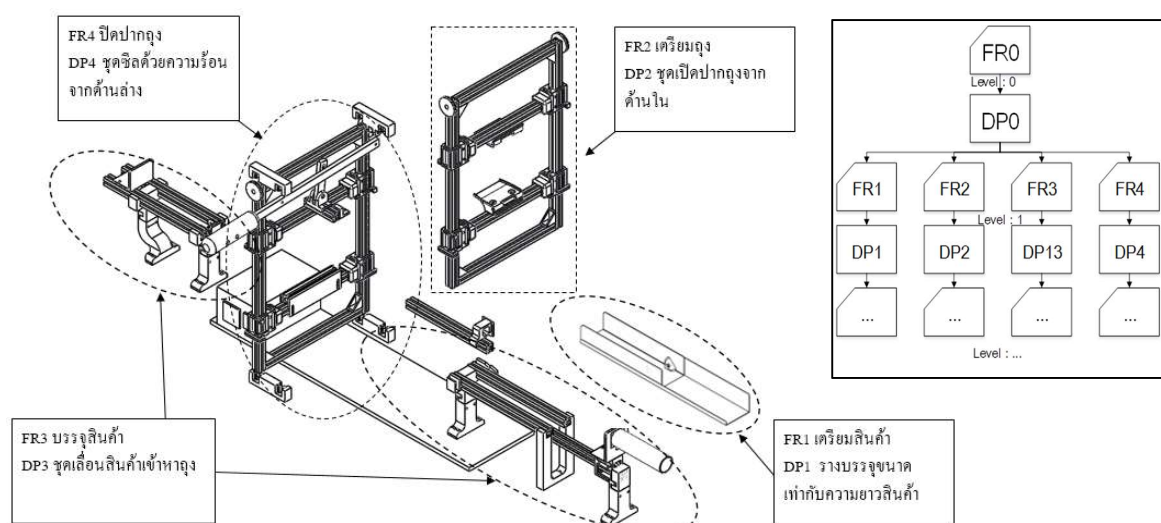
ขั้นตอน	รายละเอียดหลักการทำงานของอุปกรณ์
1.	บรรจุสินค้าเข้าไปในอุปกรณ์ 
2.	ใส่ถุงเข้าไปในอุปกรณ์ 
3.	เลื่อนรางสินค้าเข้าและเลื่อนรางออก 
4.	กดชุดให้ความร้อนเพื่อปิดปากถุง 
5.	นำสินค้าที่บรรจุเสร็จสิ้นออกจากอุปกรณ์ 

เมื่อดำเนินการออกแบบตามขั้นตอนกับทุกฟังก์ชันใน

การออกแบบจนเสร็จสิ้นอุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ แสดงในตารางที่ 11 โดยการทำงานผู้ปฏิบัติงานต้องทำการป้อนสินค้า ป้อนถุง เลื่อนรางบรรจุ และซีลปิดปากถุง ซึ่งผลการออกแบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบและตัวอุปกรณ์สามารถช่วยให้กระบวนการบรรจุโหลทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของชิ้นส่วนที่จำแนกตามฟังก์ชันหลัก แสดงดังรูปที่ 6 โดยอุปกรณ์มีฟังก์ชันเกิดขึ้นทั้งหมด 40 ฟังก์ชัน และ 40 ทางเลือกในการออกแบบ

ตารางที่ 12 การแบ่งกลุ่ม Cs ที่เกิดขึ้นในการออกแบบ

Level	Cs ทั้งหมดที่เกิดขึ้น	แบ่งตามกลุ่มและประเภทของข้อจำกัด	
		Operation Constraints (OC)	Technique Constraints (TC)
0	7	6 (3)Ma, (1)Se, (1)EO	1 (1)E
1	10	-	10 (3)G, (3)P, (2)E, 2(A)
2	17	1 (1)EO	16 (4)G, (6)A, (6)P
3	17	-	17 (2)P, (13)A, (2)E
4	7	-	7 (7)A



รูปที่ 6 Exploded view ของอุปกรณ์บรรจุโหลสินค้า โดยแยกตามกลุ่มชิ้นส่วนหลักของอุปกรณ์

เมื่อจำแนกข้อจำกัดในการออกแบบเป็นแต่ละประเภท แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า Cs ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการออกแบบเป็นประเภท Operation Constraints และเมื่อทำการออกแบบในระดับขั้นส่วน Technique Constraints ก็จะเป็นข้อจำกัดสำคัญที่เกิดขึ้น

5. สรุป

ในการแก้ไขปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรมโดยใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ร่วมกับเครื่องมือ CRM ที่พัฒนาขึ้นพบว่า ข้อจำกัดในการออกแบบเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้นักออกแบบสามารถทำการออกแบบได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่ง CRM ก็เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยแสดงข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิต โดยจากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งข้อจำกัดออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ ข้อจำกัดในกลุ่มข้อจำกัดด้านการใช้งานและข้อจำกัดทางเทคนิค ซึ่งหากว่าสามารถระบุข้อจำกัดในการออกแบบได้ครบถ้วนจะช่วยลดการลองผิดลองถูกเพื่อให้ผลการออกแบบตอบสนองได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ดียิ่งขึ้น

จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีกับกรณีศึกษาการออกแบบอุปกรณ์บรรจุโพลีเอทิลีนพบว่า ข้อจำกัดในการออกแบบที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า(Level:0) มักเป็นข้อจำกัดด้านการใช้งาน ซึ่งหากนักออกแบบสามารถวิเคราะห์ข้อจำกัดกลุ่มนี้ได้ชัดเจนและครบถ้วน ข้อจำกัดเหล่านี้จะกำหนดทิศทางการออกแบบที่ตรงตามความต้องการตั้งแต่ต้น และเมื่อดำเนินการออกแบบไปจนถึงระดับโมดูลหลัก(Level:1) โมดูลย่อย(Level:2) หรือจนถึงระดับขั้นส่วน มักเกิดข้อจำกัดด้านเทคนิค และเมื่อกระบวนการออกแบบไปถึงระดับที่แยกย่อยมากเพียงใด ข้อจำกัดประเภทการประกอบก็ยิ่งจะมีสัดส่วนการเกิดขึ้นมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากในการวิเคราะห์ระดับย่อยจนถึงขั้นส่วนประกอบ การกำหนดขนาดและพิถีพิถันความเผื่อต่าง ๆ ในการประกอบก็เป็นส่วนสำคัญ ที่ทำให้ผลการออกแบบสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

6. ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบจะเป็นการกำหนดกรอบของแนวคิดของนักออกแบบซึ่งอาจจะตัดความเป็นไปได้ของทางเลือกไปตั้งแต่ต้น จึงอาจไม่เหมาะสมกับใช้ในงานออกแบบที่ใช้ความคิดสร้างสรรค์ และข้อขัดแย้งที่เกิดขึ้นเหล่านี้อาจสามารถได้รับการแก้ไขโดยใช้ทฤษฎีที่ช่วยแก้ไขปัญหในการออกแบบเช่น TRIZ หรือ Innovative theory design อื่น ๆ เข้ามาช่วยในการแก้ไขข้อขัดแย้ง แทนการตัดตัวเลือกเหล่านี้ออก

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง. “การลดความซับซ้อนในการออกแบบเชิงวิศวกรรมวารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. ปีที่ 4 (ฉบับที่ 1) : 84-99, 2555.
- [2] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote, “ Engineering Design - A Systematic approach,” Springer-Verlag, London, 2nd Ed., 2007.
- [3] N. Cross, “ Engineering Design Methods: Strategies for Product Design,” John Wiley & Son, West Sussex, 4th Ed., 2008.
- [4] ทศพร อัครรังษี และณัฐวุฒิ จันทร์ทอง. “ระเบียบวิธีการเพื่อการออกแบบชุดอุปกรณ์เสริมสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติ: กรณีศึกษาโมดูลหยิบจับชิ้นงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 11 (ฉบับที่ 2) : 1-13, 2016.
- [5] V. Hubka. and W.E. Eder, “Theory of Technical Systems – A Total Concept Theory for Engineering Design,” Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [6] J. S. Gero and U. Kannengiesser, “ The Situated Function- Behaviour- Structure Framework,” Design Studies, vol. 25, pp. 373-391, 2004.

- [7] J. S. Gero, “Design Prototypes – a Knowledge Representation Schema for Design,” *AI Magazine*, vol. 11(4), pp. 26-36, 1990.
- [8] Y. Umeda, and T. Tomiyama, “FBS modeling: Modeling scheme of function for conceptual design,” *Workshop on Qualitative Reasoning about Phys Systems*, Amsterdam, pp. 271–278, 1995.
- [9] N. P. Suh, “The Principles of Design,” Oxford University Press, New York, 1990.
- [10] N. P. Suh, “Complexity: Theory and Applications,” Oxford University Press, New York, 2005.
- [11] G. J. Park, “Analytic Methods for Design Practice,” Springer-Verlag, Germany, 2007.
- [12] N. P. Suh, “Axiomatic Design: Advances and Applications,” Oxford University Press, New York, 2001.
- [13] H. Johannesson and A. Claesson, “Systematic product platform design: A combined function means and parametric modeling approach,” *Journal of Engineering Design*, vol. 16(1), pp. 25-43, 2005.
- [14] D. Kannan, K. Govindan and S. Rajendran, “Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 96, pp. 194-208, 2015.
- [15] M. Yang, F. I. Khan, R. Sadiq and P. Amyotte, “A rough set- based quality function deployment (QFD) approach for environmental performance evaluation: a case of offshore oil and gas operations,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 1513-1526, 2011.