

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเครื่องประดับแหวนเป็นการสร้างสรรค์แนวความคิด เพื่อใช้ในการพัฒนาแนวทางสำหรับการออกแบบ และผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับยุคสมัยของศิลปะของเครื่องประดับว่าศิลปะในแต่ละยุคได้รับอิทธิพลมาจากสิ่งใดหรือเกิดวิวัฒนาการเปลี่ยนแปลงได้อย่างไร องค์ประกอบของเครื่องประดับแหวนมีอะไรบ้าง และวิธีการที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบเครื่องประดับแหวน เนื่องจากในปัจจุบันวิวัฒนาการทางด้านเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการออกแบบ เช่น การใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบแทนการสเกตช์ด้วยมือที่ใช้มาในอดีตทำให้นักออกแบบมีความสะดวกและประหยัดเวลาสำหรับการออกแบบมากขึ้น

ในส่วนสำคัญของบทนี้จะกล่าวถึงระบบที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบ ได้แก่ ระบบการออกแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้จะกล่าวถึงประวัติศาสตร์ศิลปะของเครื่องประดับ ทฤษฎีสำหรับการออกแบบเครื่องประดับและองค์ประกอบของเครื่องประดับแหวน ตลอดจนวิธีการทดสอบระบบที่ทำการออกแบบ ซึ่งสามารถกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### เครื่องประดับแหวน

เครื่องประดับแหวนเป็นเครื่องประดับที่ใช้กับส่วนที่เป็นนิ้วมือ เพื่อใช้สวมใส่นิ้วสำหรับประดับและตกแต่ง ซึ่งเครื่องประดับแหวนยังเป็นสิ่งบ่งบอกถึงความสง่างาม มีฐานะและความเป็นสิริมงคลแก่ผู้ครอบครอง เพื่อให้เกิดความโดดเด่น งดงามและความสวยงาม เครื่องประดับแหวนทำมาจากวัสดุประเภทถาวร ได้แก่ โลหะชนิดต่างๆ เช่น ทองคำ เงินและนาค เป็นต้น และวัสดุประเภทไม่ถาวร ได้แก่ ไม้ พลาสติก กระดาษ และเมล็ดพืช เป็นต้น เครื่องประดับแหวนมีทั้งชนิดที่ประดับอัญมณีและไม่ประดับอัญมณี [3]

โดยทั่วไปในปัจจุบันระบบมาตรฐานไอเอสโอ (International Organization for Standardization; ISO) เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับเครื่องประดับแหวน เรียกว่า ISO 8653 : 1986 กำหนดมาตรฐานของขนาดเส้นรอบวงภายในเครื่องประดับแหวนซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังแสดงในภาคผนวก ก ตาราง 1 [10, 11]

## 1. ศิลปะของเครื่องประดับ

ในการศึกษาการออกแบบเครื่องประดับในอดีตมีความสัมพันธ์กับงานศิลปกรรมในยุคประวัติศาสตร์ศิลปะสมัยต่างๆ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลทางลวดลาย วัฒนธรรม และกระบวนการวิวัฒนาการด้านรูปแบบ วิธีการผลิตและเทคนิคต่างๆ ศิลปกรรมตะวันตกที่มีบทบาทต่อการออกแบบเครื่องประดับมาถึงปัจจุบันมีหลักฐานกล่าวถึงรูปแบบเครื่องประดับในอดีตมาเป็นต้นแบบให้ออกแบบเครื่องประดับในปัจจุบัน ได้แก่ เครื่องประดับสมัยศิลปกรรมอียิปต์โบราณ (Egyptian Jewelry) เครื่องประดับสมัยคูดังคาเมน (Tutankhamen Jewelry) เครื่องประดับอินเดียโบราณ (Indian Jewelry) เครื่องประดับสมัยศิลปะกรีกโบราณและโรมัน (Greek and Roman Jewelry) เครื่องประดับสมัยศิลปะทิเบต (Tibetan Jewelry) เครื่องประดับสมัยศิลปะสไตล์บารอค (Baroque Jewelry Style) เครื่องประดับสมัยวิคตอเรียน (Victorian Jewelry) เครื่องประดับสไตล์อาร์ตนูโว (Art Nouveau Jewelry) และเครื่องประดับสไตล์อาร์ตเดคโค (Art Deco Jewelry) ปัจจุบันมีการนำรูปแบบเครื่องประดับในอดีตกลับมาปรับปรุงและดัดแปลงเพิ่มเติมให้เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย มีหลักฐานปรากฏว่าการออกแบบเครื่องประดับในอดีตสามารถสื่อถึงวัฒนธรรม แสดงสัญลักษณ์ในอดีตเป็นสุนทรียะทางความงามที่มีการวิวัฒนาการสืบต่อกัน [12]

ในยุคสมัยของอาร์ตเดคโคเป็นยุคสมัยที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงสงครามโลกและแรงบันดาลใจในการสร้างสรรค์เครื่องประดับมาจากยุคเอดวาเดียนซึ่งเป็นยุคก่อนหน้า นักออกแบบในยุคอาร์ตเดคโคได้นำเส้นที่มีความคมชัดอันเป็นผลมาจากยุคสมัยของเครื่องจักรกลมาใช้ รูปทรงที่เป็นแรงบันดาลใจมักจะมีมาจากแหล่งธรรมชาติหรือนามธรรม โดยมักมีเส้นรอบนอกที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างอย่างชัดเจนจากยุคเอดวาเดียนและยุคอาร์ตนูโวก่อนหน้า [13] ซึ่งเครื่องประดับในยุคอาร์ตเดคโคมักมีความเกี่ยวข้องกับทุกสิ่งรอบตัวและหัวใจสำคัญของยุคนี้คือรูปทรงเรขาคณิตและความสมดุลทั้งในเรื่องของรูปแบบและสีของอัญมณีที่จัดจ้านได้ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ถือว่าเป็นจุดเด่นสำคัญของเครื่องประดับในยุคอาร์ตเดคโค นอกจากการให้รูปทรงเรขาคณิตสำหรับการออกแบบเครื่องประดับในยุคอาร์ตเดคโคแล้ว ในยุคนี้ยังนิยมใช้อัญมณีที่มีสีจัดจ้านมาประดับร่วมกัน โดยนักออกแบบจะเลือกอัญมณีที่มีสีตรงกันข้ามกันมาประดับในตัวเรือน เช่น ทับทิมที่มีสีแดงเป็นคู่สีที่ตรงข้ามกับสีเขียวของมรกต นอกจากการนิยมใช้อัญมณีที่มีสีจัดจ้านประดับแล้ว เครื่องประดับในยุคอาร์ตเดคโคก็ยังนิยมใช้โลหะแพลตินั่ม (Platinum) ในการทำตัวเรือนร่วมกับการประดับด้วยอัญมณีเพชรโดยมีการออกแบบรูปทรงของงานให้มีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลม เป็นต้น ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สำคัญของเครื่องประดับในยุคนี้ [13]

## 2. การออกแบบเครื่องประดับแหวน

การออกแบบเครื่องประดับ คือ การกำหนดความคิดตามความต้องการที่จะแสดงออกในการสร้างสรรค์สิ่งใหม่และรู้จักการปรับปรุงแก้ไขสิ่งเดิมที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับประโยชน์ใช้สอยและมีการเปลี่ยนแปลงตามยุคสมัย [14] การออกแบบเครื่องประดับในปัจจุบันสามารถทำได้ทั้งโดยการวาดภาพด้วยมือและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ มาช่วยในการออกแบบ ซึ่งมีให้เลือกใช้ได้ตามความต้องการและความถนัดของผู้ออกแบบ

### 2.1 องค์ประกอบของการออกแบบเครื่องประดับ

ในกระบวนการออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของการออกแบบเครื่องประดับ เช่น จุด เส้น รูปร่างและรูปทรง บริเวณว่าง ขนาดและมาตราส่วน ลักษณะผิว และความสมดุล [3, 15]

#### 2.1.1 จุด (Point)

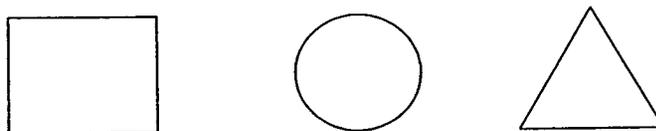
จุด คือ องค์ประกอบพื้นฐานของวัตถุรูปแบบใดๆ สามารถนำมาประกอบกันเป็นเส้น รูปร่าง รูปทรง ตลอดจนเป็นภาพ สำหรับการออกแบบจุดจะควรรำคาญถึงการกำหนดตำแหน่ง (Position) ต่างๆ

#### 2.1.2 เส้น (Lines)

เส้น คือ องค์ประกอบพื้นฐานของการออกแบบ ซึ่งการออกแบบให้เป็นรูปร่าง รูปทรงหรือภาพ จะต้องนำเส้นไปประกอบเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นรูปร่าง รูปทรงหรือภาพ ลักษณะของเส้นแต่ละอย่างจะให้ความรู้สึกในการรับรู้ที่แตกต่างกัน เช่น เส้นตรงให้ความรู้สึกสูงส่ง มั่นคง แข็งแรง ไม่เคลื่อนไหว ได้แก่ ตึก อาคาร และต้นไม้ เป็นต้น

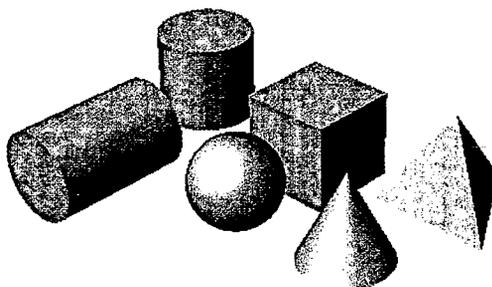
#### 2.1.3 รูปร่างและรูปทรง (Shape and Form)

รูปร่าง คือ รูปที่มีลักษณะเป็นแบบสองมิติ มีความกว้าง ความยาว ไม่มีความหนาเกิดจากเส้นรอบนอกที่มีการแสดงพื้นที่ขอบเขตของรูปร่างต่างๆ เช่น รูปวงกลม รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม และรูปร่างอิสระที่แสดงเนื้อที่ของผิวที่ระนาบมากกว่าแสดงปริมาตรและมวล ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 แสดงลักษณะของรูปร่าง

รูปทรง คือ รูปที่มีลักษณะเป็นแบบสามมิติ จะแสดงความกว้าง ความยาว ความหนาหรือความลึกนูนด้วย เช่น รูปทรงกลม รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงกระบอก ให้ความรู้สึกมีปริมาตร ความหนาแน่น มวลสาร ที่เกิดจากการใช้น้ำหนักหรือการจัดองค์ประกอบของรูปทรงหลายรูปรวมกันซึ่งรูปทรงสำหรับงานออกแบบเครื่องประดับสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ รูปทรงธรรมชาติ (Organic Form) รูปทรงอิสระ (Free Form) และรูปทรงเรขาคณิต (Geometric Form) ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 แสดงรูปทรงเรขาคณิต

#### 2.1.4 บริเวณว่าง (Space)

บริเวณว่าง คือ พื้นที่ว่างซึ่งสัมพันธ์อยู่กับรูปร่างและรูปทรง ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ว่างและองค์ประกอบพื้นฐาน เช่น จุด เส้น ระนาบและปริมาตร [3]

พื้นที่ว่าง	องค์ประกอบพื้นฐาน (Basic Elements)			
	จุด (Points)	เส้น (Lines)	ระนาบ (Planes)	ปริมาตร (Volumes)
1 มิติ (1D)	/	/	X	X
2 มิติ (2D)	/	/	/	X
3 มิติ (3D)	/	/	/	/

### 2.1.5 ขนาดและมาตราส่วน (Size and Scale)

1) ขนาด (Size) คือ พื้นที่ขอบเขตใดขอบเขตหนึ่ง ซึ่งพื้นที่นั้นจะเป็นแบบสองมิติหรือแบบสามมิติก็ได้

2) มาตราส่วน (Scale) คือ ขนาดของสิ่ง 2 สิ่งขึ้นไป ที่มีความกลมกลืนกันอย่างเหมาะสมความสัมพันธ์ของขนาดและมาตราส่วนในการออกแบบ

### 2.1.6 ความสมดุล (Balance)

ความสมดุล หมายถึง การจัดองค์ประกอบให้สัมพันธ์กันมีน้ำหนักหรือความสมดุลกลมกลืนไปด้วยกัน ความสมดุลทำให้เกิดความกลมกลืนสวยงาม ความสมดุลพิจารณาได้เป็น 2 ลักษณะ คือ สมดุลซ้ายขวาเท่ากัน (Symmetry) และสมดุลซ้ายขวาไม่เท่ากัน (Asymmetry)

### 2.1.7 ลักษณะผิว (Texture)

ผิว คือ ส่วนที่มองเห็นได้รอบๆ รูปทรงหรือรูปร่างนั้นๆ ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะขรุขระ มัน หยาบ ด้าน และโปร่งใส ฯลฯ ลักษณะผิวให้ความรู้สึกต่อการพบเห็นอย่างยัทำให้เกิดความรู้สึกอยากจับต้องลูบคลำ ลักษณะผิวจะให้ความรู้สึกตอบสนองต่างกันตามแต่ความรู้สึกของแต่ละบุคคลว่าจะตอบสนองไปในด้านใดและอย่างไร [3, 15]

## 2.2 การออกแบบด้วยมือ

การออกแบบด้วยมือหรือการวาดแบบร่างด้วยมือ เป็นวิธีการที่นิยมใช้ของนักออกแบบสำหรับขั้นตอนเริ่มต้นในการออกแบบต่างๆ และมักถูกใช้บ่อยเพื่อบันทึกแนวความคิดเพื่อใช้ในภายหลังได้อย่างรวดเร็ว และเพื่อสำรวจทางเลือกของการออกแบบ [16] วิธีการนี้มักจะนิยมใช้เพราะมีต้นทุนต่ำและสะดวกในทุกที่

## 2.3 การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

งานออกแบบหรืองานเขียนแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ทำงานที่เราเรียกว่าคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design) หรือเรียกว่าย่อๆ ว่า “แคด” (CAD) เป็นสิ่งที่เข้ามามีบทบาทต่อวงการออกแบบและเขียนแบบในปัจจุบันมากขึ้น นอกจากนี้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบยังมีได้จำกัดเฉพาะทางวิศวกรรมหรือสถาปัตยกรรมเท่านั้น ในรูปภาพนิ่งหรือภาพเคลื่อนไหว (Animation) เป็นภาพกราฟิกสวยงามดึงดูดใจทางด้านโฆษณาหรืองานที่เกี่ยวข้องกับภาพยนตร์ โทรทัศน์ ยังต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบในการสร้างภาพที่สวยงามโดยเฉพาะในวงการออกแบบหรือเขียนแบบคอมพิวเตอร์จะเป็นเครื่องมือหนึ่งสร้างที่ได้เปรียบทางด้านความเร็วและความแม่นยำเป็นอย่างดี [17]

คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาเพื่อช่วยในการสร้างชิ้นส่วนด้วยรูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ชิ้นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นนั้น จะเรียกว่าแบบจำลองหรือโมเดล (Model) และคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ยังช่วยในการวิเคราะห์ ประเมิน และแก้ไขของแบบจำลองได้อย่างความถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็ว ยังช่วยในการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตซึ่งโมเดลสามารถแสดงเป็นแบบการเขียนแบบ (Drawing) หรือไฟล์ข้อมูลแคดได้ [17]

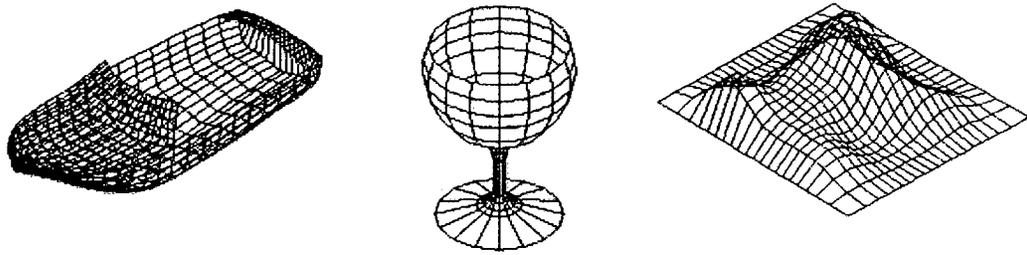
### 2.3.1 เทคนิคการสร้างพื้นผิวของวัตถุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

ในการสร้างวัตถุแบบสามมิติ สามารถสร้างการขึ้นรูปได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีเทคนิคและความยากง่ายที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกวิธีการสร้างพื้นผิววัตถุแบบสามมิติได้อย่างเหมาะสม จะทำให้การขึ้นรูปเป็นไปด้วยความรวดเร็ว หากเราเลือกวิธีการขึ้นรูปวัตถุที่ไม่เหมาะสมกับงานแล้ว เราอาจจะต้องเสียเวลาเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่าในการขึ้นรูปวัตถุแบบสามมิติเดียวกันก็ได้ [18] แบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ วิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบโครงลวด (Wireframe Modeling) วิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบพื้นผิว (Surface Modeling) และวิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบทึบตัน (Solid Modeling) ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาวิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบพื้นผิว เนื่องจากวิธีดังกล่าวเหมาะกับการสร้างพื้นผิวของรูปทรงที่ส่วนเว้า ส่วนโค้ง และรูปทรงอิสระ

#### วิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบพื้นผิว (Surface Modeling)

วิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบพื้นผิวมีความซับซ้อนกว่าวิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบโครงลวดเนื่องจากมีการกำหนดขอบ (Edges) และพื้นผิว (Surface) ของวัตถุแบบสามมิติ วิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบพื้นผิวมีการกำหนดพื้นผิวโดยใช้โพลีกอนเมส (Polygon Mesh) ซึ่งเป็นหน้า (Face) รูปสามเหลี่ยมแบนราบ (Planar) หลายๆ ชิ้นเชื่อมต่อกันหากหน้า (Face) อยู่ในระนาบเดียวกันจะไม่ปรากฏขอบให้เห็น หากหน้า (Face) ทำมุมในระนาบต่างกันจะทำให้ปรากฏขอบเขตของวัตถุแบบสามมิติให้เรามองเห็นวิธีการขึ้นรูปโมเดลแบบพื้นผิวเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปวัตถุแบบสามมิติที่มีพื้นผิวเป็นส่วนโค้ง ส่วนเว้า หรือพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบผิดปกติ (Irregular Surface) อาทิเช่น ภูเขา ต้นไม้ รถยนต์ เรือ เครื่องบิน และอื่นๆ เป็นต้น ดังแสดงในภาพ 4

วิธีการสร้างโมเดลพื้นผิวมีหลากหลายวิธี เช่น ลอฟท์ (Loft) สวีป หรือกวาด (Sweep) เครือข่ายเส้นโค้ง (Curves Network) และอื่นๆ เป็นต้น [18]



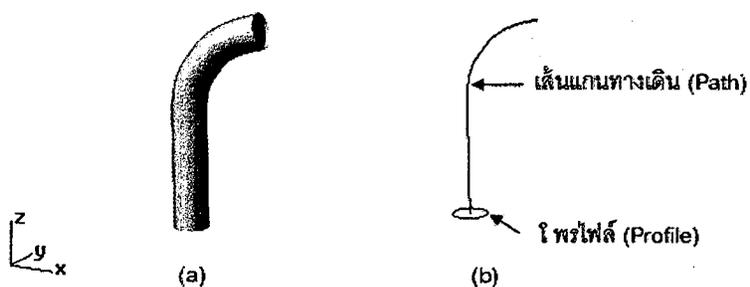
ภาพ 4 แสดงตัวอย่างโมเดลแบบพื้นผิว [18]

### 1. วิธีการสวீป (Sweep)

วิธีการสวี่ป เป็นคำสั่งที่ใช้ในการดึงพื้นทีหน้าตัดที่ต้องการให้ไปตามเส้นแกนที่ได้สร้างเอาไว้ ดังแสดงในภาพ 5a สำหรับการสร้างพื้นผิวรูปทรงแบบสามมิติ ซึ่งมีลักษณะในการทำงานที่เหมาะสมกับการสร้างการดึง การตัด ตามเส้นร่างที่ซับซ้อน ซึ่งคำสั่งสวี่ป ประกอบด้วย โพรไฟล์ (Profile) และเส้นทาง (Path) ดังแสดงในภาพ 5b

โพรไฟล์ (Profile) คือ พื้นทีหน้าตัด มีลักษณะเป็นภาพสเกตช์ปิดขอบ (Closed Contour) หรือเปิดขอบ (Open Contour) สำหรับนำมาใช้ในการสวี่ป

เส้นแกนทางเดิน (Path) คือ เส้นแกนหรือเส้นชี้้ นำทางสำหรับการสวี่ปของหน้าตัดโดยจะต้องมีลักษณะเป็นเส้นต่อเนื่องและสามารถเป็นได้ทั้งภาพสเกตช์ปิดหรือเปิดขอบก็ได้ [19]



ภาพ 5 แสดงลักษณะของวิธีการสวี่ป

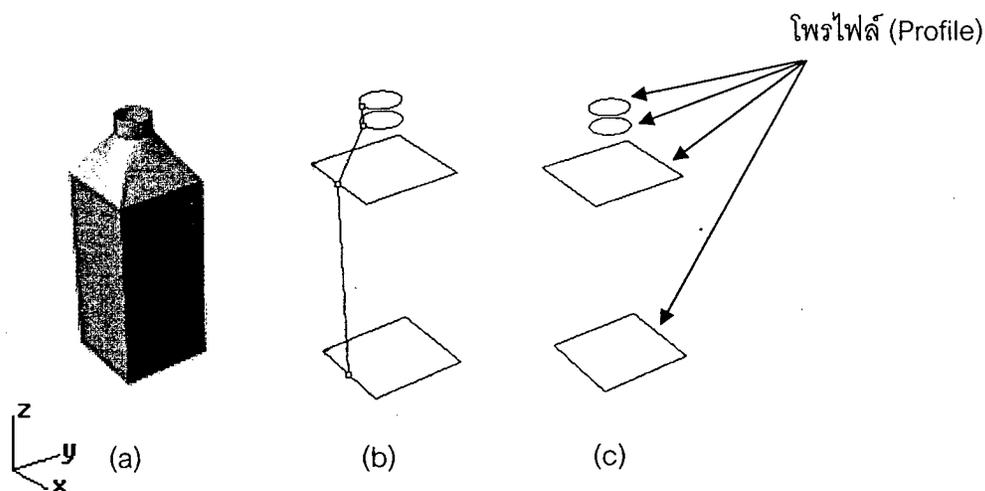
หมายเหตุ: (a) รูปทรงแบบสามมิติที่เกิดจากคำสั่งสวิตช์

(b) ส่วนประกอบของคำสั่งสวิตช์

## 2. วิธีการลอฟท์ (Loft)

วิธีการลอฟท์เป็นคำสั่งที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวรูปทรงแบบสามมิติ ดังแสดงในภาพ 6a ต้องอาศัยการสร้างระหว่างโพรไฟล์ ซึ่งมีโพรไฟล์ 2 โพรไฟล์ขึ้นไป ดังแสดงในภาพ 6b คำสั่งลอฟท์ ประกอบด้วย โพรไฟล์ (Profile)

โพรไฟล์ (Profile) คือ พื้นที่หน้าตัด มีลักษณะเป็นภาพสเกตช์ปิดขอบ หรือเปิดขอบสำหรับนำมาใช้ในการลอฟท์ ดังแสดงในภาพ 6c [19]



ภาพ 6 แสดงลักษณะของวิธีการลอฟท์

หมายเหตุ: (a) รูปทรงแบบสามมิติที่เกิดจากคำสั่งสวิตช์

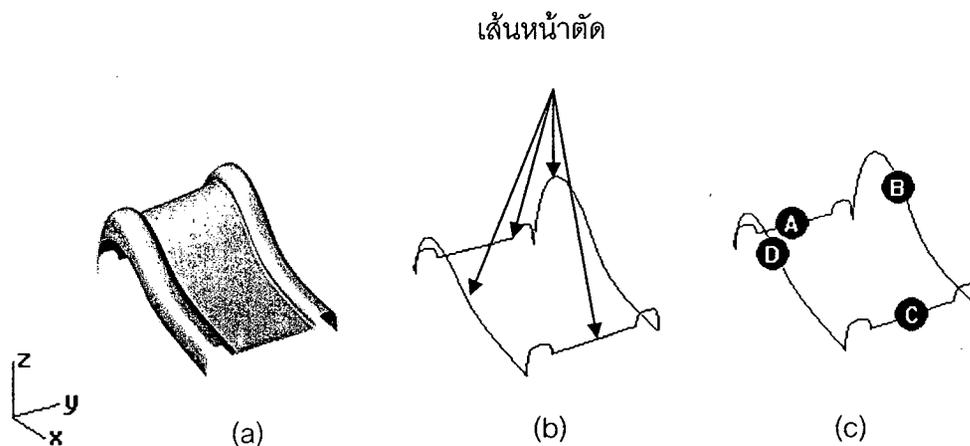
(b) การสร้างพื้นผิวระหว่างโพรไฟล์หลายโพรไฟล์

(c) ส่วนประกอบของคำสั่งลอฟท์

## 3. วิธีการเครือข่ายเส้นโค้ง (Curve Network)

วิธีการเครือข่ายเส้นโค้งเป็นคำสั่งที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวรูปทรงแบบสามมิติ ดังแสดงในภาพ 7a โดยการสร้างพื้นผิวจากเครือข่ายของ เส้นโค้งขอบเขตหรือเส้นหน้าตัด ดังแสดงในภาพ 7b เพื่อกำหนดขอบเขตของพื้นผิว ดังแสดงในภาพ 7c คำสั่งเครือข่ายเส้นโค้ง

ประกอบด้วย เส้นโค้งขอบเขตหรือเส้นหน้า (Profile) [19]



ภาพ 7 แสดงลักษณะของวิธีการเครือข่ายเส้นโค้ง

- หมายเหตุ: (a) รูปทรงแบบสามมิติที่เกิดจากคำสั่งเครือข่ายเส้นโค้ง  
 (b) โพรไฟล์สำหรับกำหนดขอบเขตของพื้นผิว  
 (c) ส่วนประกอบของคำสั่งเครือข่ายเส้นโค้ง

### ระบบออกแบบอัตโนมัติ (Generative Design Systems)

ระบบออกแบบอัตโนมัติเป็นระบบเชิงคำนวณของขั้นตอนการออกแบบจากตัวแทนการเข้ารหัส (Encoded Representation) และกระบวนการ ระบบออกแบบอัตโนมัติมีความสามารถสร้างการออกแบบช่วงที่ละเอียดหรือขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ระบบออกแบบอัตโนมัติสร้างการออกแบบที่ไม่คาดคิด [20]

ระบบออกแบบอัตโนมัติมีความสามารถเชิงคำนวณเพื่อสนับสนุนนักออกแบบและ (หรือ) สร้างการออกแบบของกระบวนการออกแบบ ที่มีความสามารถในการสำรวจพื้นที่การออกแบบขนาดใหญ่และสนับสนุนการสร้างการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ เช่น การออกแบบในระยะเวลาที่จำกัด การลดต้นทุน เช่น ลดเวลาและแรงงาน ยังเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องและความสม่ำเสมอในการสำรวจการออกแบบและสนับสนุนสำหรับกระบวนการออกแบบ ระบบออกแบบอัตโนมัติมี 5 เทคนิค [21] เช่น ระบบแอล [22] เซลลูลาร์ออโตมาตา [23] ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม [24] ปัญญาารวมหมู่ [25] และไวยากรณ์รูปร่าง

## 1. ไวยากรณ์รูปร่าง (Shape Grammars; SG)

ไวยากรณ์รูปร่างถูกนำเสนอโดย George and James [26] ในงานด้านจิตรกรรมและประติมากรรม

ไวยากรณ์รูปร่างเป็นวิธีการสร้างเซตขอบเขตของการออกแบบ หรือเรียกว่า ภาษาออกแบบซึ่งมีการกำหนดเซตขอบเขตของรูปร่าง และเซตขอบเขตของกฎรูปร่าง โดยการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างทีละขั้นตอน (Step by Step) อย่างน้อย 1 กฎ และมีการใช้อย่างต่อเนื่อง เพื่อการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างสำหรับใช้ในการพัฒนารูปร่าง [5, 27]

หน้าที่ของไวยากรณ์รูปร่างในการออกแบบคล้ายกับไวยากรณ์ภาษา (Language Grammar) ของภาษาศาสตร์ และกฎการแต่งหรือเรียบเรียงทำนอง (Melodized) ของการประพันธ์เพลง [9, 28]

ไวยากรณ์รูปร่างสามารถประยุกต์ใช้สำหรับสร้างเซตขอบเขตหรือภาษาออกแบบ และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ อธิบาย และสร้างกระบวนการออกแบบความคิดสร้างสรรค์ (Creative Design) [29]

ไวยากรณ์รูปร่างเป็นวิธีการสำหรับสร้างรูปร่างสองหรือสามมิติและองค์ประกอบของรูปร่างถูกสร้างในโดเมนการออกแบบ [30] และสำหรับสร้างรูปร่างที่สอดคล้องกับเอกลักษณ์ของแบรนด์ การสร้างรูปร่างส่งผลต่อลำดับของการประยุกต์ใช้กฎรูปร่าง [31] โดยที่ไวยากรณ์รูปร่างสามารถใช้เป็นเครื่องมือออกแบบเพื่อสร้างภาษาหรือเครื่องมือวิเคราะห์ของกระบวนการออกแบบ และเพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการออกแบบที่มีอยู่โดยไวยากรณ์รูปร่างมีส่วนประกอบพื้นฐาน 4 ส่วน เรียกว่า พารามетริกไวยากรณ์รูปร่าง (Parametric Shape Grammar) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$SG = \{V_T, V_M, R, I\} \quad (1)$$

โดยที่	$V_T$	คือ	เซตขอบเขตของรูปร่าง (A Finite Set of Shapes)
	$V_M$	คือ	เซตขอบเขตของสัญลักษณ์ (A Finite Set of Symbols)
เช่น การใช้เครื่องหมาย (Markers)			
	$R$	คือ	เซตขอบเขตของกฎ (A Finite Set of Shape Rules)
	$I$	คือ	รูปร่างเริ่มต้น (Initial Shape)

$V_T$  เป็นเซตของรูปแบบของรูปร่าง โดยการจัดเรียงขอบเขตขององค์ประกอบของ  $V_T$  ในองค์ประกอบใดๆ อาจถูกใช้จำนวนหลายครั้งซึ่งดำเนินการบนสัดส่วนหรือสเกลใดๆ หรือทิศทาง (Orientation)

$V_M$  เป็นเครื่องหมายใช้เพื่อควบคุมกฎ

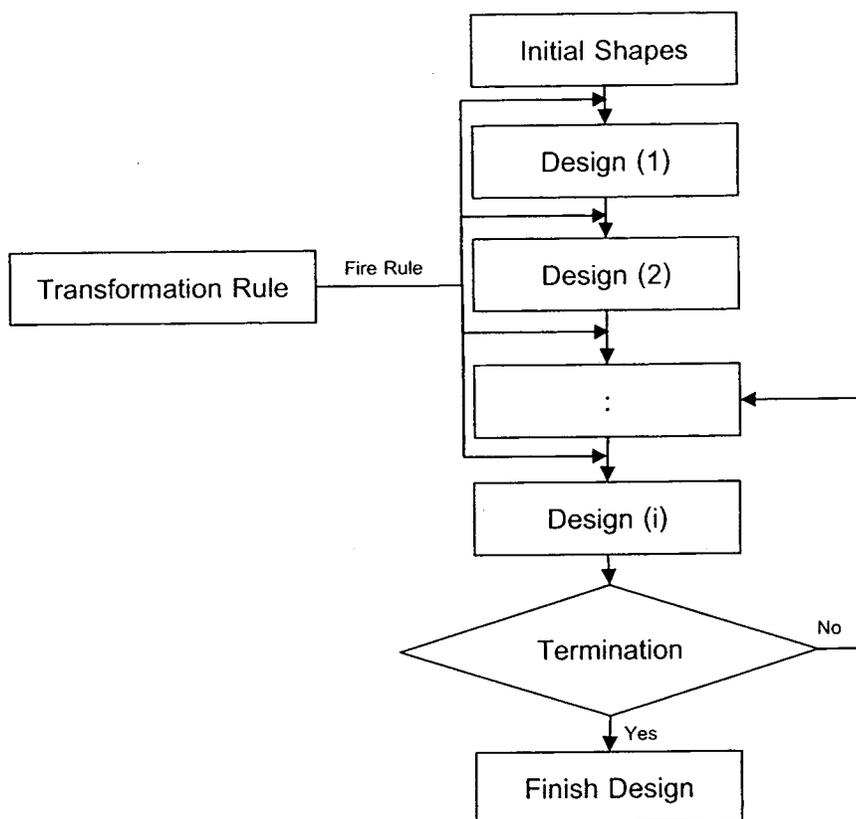
$R$  เป็นคำสั่งจับคู่  $(u, v)$  เช่น รูปทรง  $u \rightarrow v$  ซึ่ง  $u$  เป็นรูปร่างด้านซ้าย ประกอบด้วยองค์ประกอบของ  $V_T$ . อาจจะรวมกันกับองค์ประกอบของ  $V_M$  และ  $v$  เป็นรูปร่างด้านขวา ประกอบด้วยของ 1) องค์ประกอบของ  $V_T$  ที่มีอยู่ใน  $u$  หรือ 2) องค์ประกอบของ  $V_T$  ที่มีอยู่ใน  $u$  รวมกันกับองค์ประกอบของ  $V_M$  หรือ 3) องค์ประกอบของ  $V_T$  ที่มีอยู่ใน  $u$  รวมกับการเพิ่มเติมองค์ประกอบของ  $V_T$  และองค์ประกอบของ  $V_M$

$I$  เป็นรูปร่างเริ่มต้น ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของ  $V_T$  และ  $V_M$  [32, 33]

ไวยากรณ์รูปร่างช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งาน และคอมพิวเตอร์เพื่อกระตุ้นแนวความคิดสร้างสรรค์ (Creative) [6, 7]

ไวยากรณ์รูปร่างเป็นตัวแทนที่มีประสิทธิภาพที่สามารถใช้เพื่อประสบความสำเร็จในการออกแบบโครงสร้างช่วยให้ได้รับการยอมรับ และการเปลี่ยนแปลงของเซตขอบเขตของรูปร่าง [34]

กระบวนการของวิธีไวยากรณ์รูปร่าง ประกอบด้วย รูปร่างเริ่มต้น (Initial Shape) กฎการเปลี่ยนแปลง (Transformation Rule) และการยกเลิก (Termination) ซึ่งรูปร่างเริ่มต้นเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเริ่มต้นของกระบวนการสร้างรูปร่าง และเพื่อใช้เป็นต้นแบบสำหรับประยุกต์ใช้ในส่วนตอนของกฎการเปลี่ยนแปลง กฎการเปลี่ยนแปลงใช้เพื่อทำให้รูปร่างเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกฎดังกล่าวมีการประยุกต์ใช้อย่างน้อยหนึ่งกฎ และการยกเลิก เป็นเกณฑ์ในการหยุดกระบวนการสร้างรูปร่างเมื่อจบกระบวนการ ดังแสดงในภาพ 8 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นรูปร่างใหม่ ซึ่งไวยากรณ์รูปร่าง ดังแสดงในภาพ 8 แผนภาพการไหลของกระบวนการออกแบบบนพื้นฐานวิธีการไวยากรณ์รูปร่าง [5, 27]



ภาพ 8 แสดงแผนภาพการไหลของกระบวนการออกแบบบนพื้นฐานวิธีการไวยากรณ์รูปร่าง [5, 27]

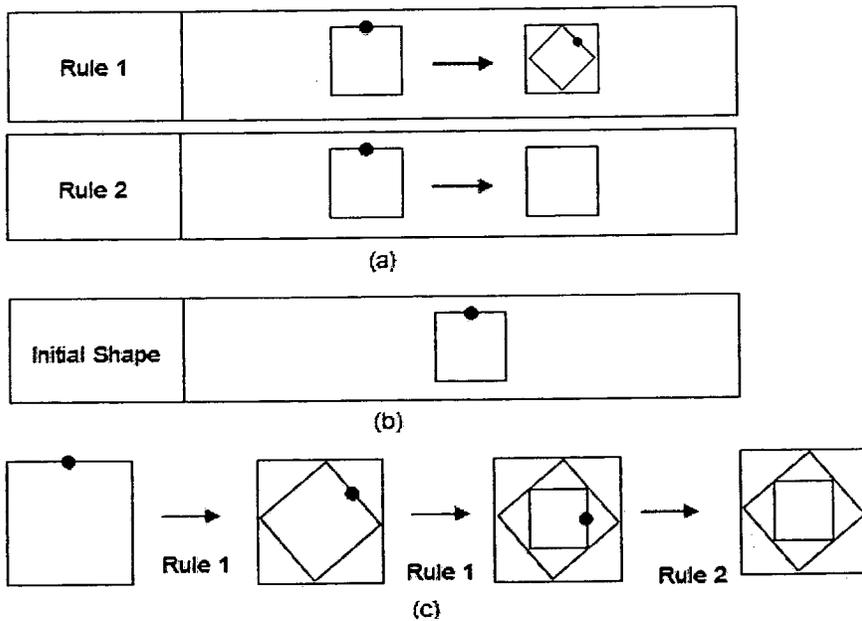
### 1.1 กฎรูปร่าง (Shape Rule)

กฎรูปร่างใช้เพื่ออธิบายกระบวนการเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปร่างแต่ละกฎ เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด นำไปสู่การเริ่มต้นออกแบบจากขั้นตอนเริ่มต้นไปยังขั้นตอนสุดท้าย กฎดำเนินการด้วยคำสั่ง และการวนซ้ำ โดยนักออกแบบตอบโต้การเลือกหรือภายใต้ลำดับการควบคุมที่ระบุไว้ในกฎ [30]

กฎแต่ละกฎประยุกต์ใช้เกี่ยวข้องกับการเลือกของกฎ การระบุรูปร่างย่อย การดำเนินงานของกฎ และการสร้างรูปร่างใหม่ [31]

กฎรูปร่างเป็นการกำหนดวิธีการหรือส่วนหนึ่งของรูปร่างที่มีอยู่ที่สามารถมีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งกฎรูปร่างประกอบด้วย 2 ส่วน ที่แยกออกจากกันโดยลูกศรชี้จากซ้ายไปขวา ส่วนด้านซ้ายของลูกศร เรียกว่า ด้านซ้ายมือ (Left-Hand Side; LHS) แสดงให้เห็นเงื่อนไขของรูปร่างและเครื่องหมายส่วนด้านขวาของลูกศรเรียกว่าด้านขวามือ (Right-Hand Side; RHS) แสดง

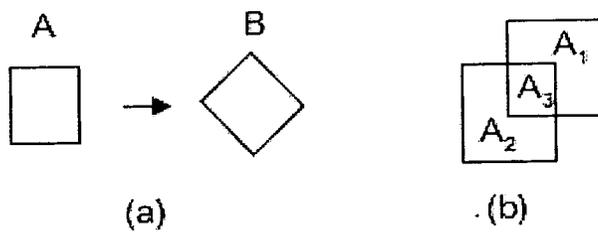
ให้เห็นวิธีการรูปร่างด้านซ้ายมือจะมีการเปลี่ยนแปลงและเครื่องหมายที่ถูกวาง เครื่องหมายจะช่วยในการระบุตำแหน่งและทิศทางของรูปร่างใหม่ [26] ดังแสดงในภาพ 9a โดยกฎที่ 1 แสดงถึงการสร้างรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่มีเครื่องหมายระบุตำแหน่งถูกหมุน 45 องศารอบจุดศูนย์กลางอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมใหญ่ และกฎที่ 2 แสดงถึงรูปสี่เหลี่ยมที่มีเครื่องหมายระบุตำแหน่งถูกยกเล็ก เครื่องหมายระบุตำแหน่งและรูปร่างเริ่มต้น ดังแสดงในภาพ 9b ตัวอย่างการสร้างรูปร่างโดยใช้ไวยากรณ์โดยมีการประยุกต์ใช้กฎที่ 1 ทำให้เกิดรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่ถูกหมุน 45 องศา ซ้อนอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมใหญ่ แล้วทำการใช้กฎที่ 1 ซ้ำ ทำให้เกิดรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่ถูกหมุน 45 องศา ซ้อนอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมใหญ่อีกครั้ง และทำการใช้กฎที่ 2 จึงเกิดการยกเลิกระบุตำแหน่งซึ่งจากการใช้กฎดังกล่าวทำให้รูปร่างเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังแสดงในภาพ 9c



ภาพ 9 แสดงตัวอย่างไวยากรณ์รูปร่าง [32, 46]

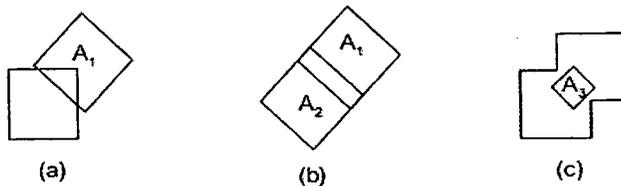
- หมายเหตุ: (a) กฎรูปร่าง  
 (b) รูปร่างเริ่มต้น  
 (c) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎรูปร่าง

ในภาพ 10 กฎรูปร่างเป็นกฎการเปลี่ยนของรูปร่าง A เป็น B ( $A \rightarrow B$ ) ตัวอย่างกฎรูปร่าง ซึ่งหมุนรูปสี่เหลี่ยม 45 องศา รอบจุดศูนย์กลางของรูปร่าง ดังแสดงในภาพ 10a กฎรูปร่าง มีการประยุกต์ใช้รูปร่างเริ่มต้น (S) รูปร่างเริ่มต้นสามารถอธิบาย หรือแสดงให้เห็นรูปร่างย่อย (Sub-Shape) ได้ 3 รูปร่าง คือ  $A_1$ ,  $A_2$  และ  $A_3$  ดังแสดงในภาพ 10b ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างในรูปร่างเริ่มต้น ดังแสดงในภาพ 11 มีการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างไปยังรูปร่าง  $A_1$  เท่านั้น ดังแสดงในภาพ 11a ประยุกต์ใช้กฎรูปร่างไปยังรูปร่างทั้งรูปร่าง  $A_1$  และ  $A_2$  พร้อมกัน ดังแสดงในภาพ 11b และประยุกต์ใช้กฎรูปร่างไปยังรูปร่าง  $A_3$  เท่านั้น ดังแสดงในภาพ 11c ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ที่มีการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างลงในรูปร่างย่อยต่างๆ จะสร้างรูปร่างสุดท้ายมีความแตกต่างกัน [16]



ภาพ 10 แสดงกฎรูปร่างและรูปทรงเริ่มต้น [16]

หมายเหตุ: (a) กฎรูปร่างจะหมุนรูปสี่เหลี่ยม 45 องศา รอบจุดศูนย์กลาง  
 (b) รูปร่างเริ่มต้น S

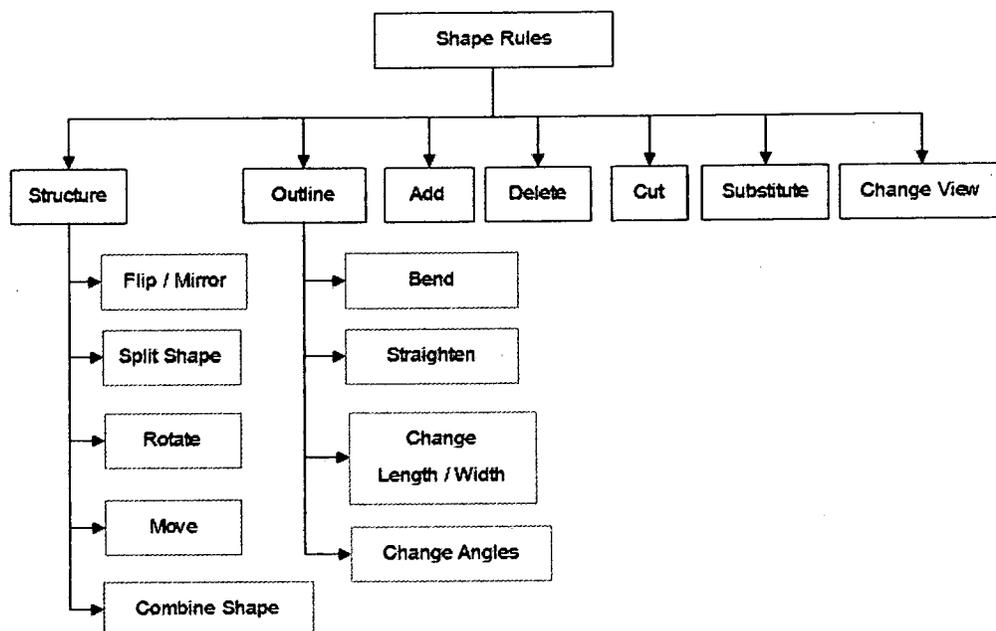


ภาพ 11 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎรูปร่าง [16]

- หมายเหตุ: (a) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างที่รูปร่าง  $A_1$   
 (b) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างที่รูปร่าง  $A_1$  และ  $A_2$   
 (c) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างที่รูปร่าง  $A_3$

Miquel [16] กล่าวว่าในการสเก็ตช์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการใช้อีกกฎรูปร่าง ดังแสดงในภาพ 12 สามารถมีการแบ่งการเปลี่ยนแปลงของกฎทั่วไปออกเป็น 7 กฎหลักได้แก่

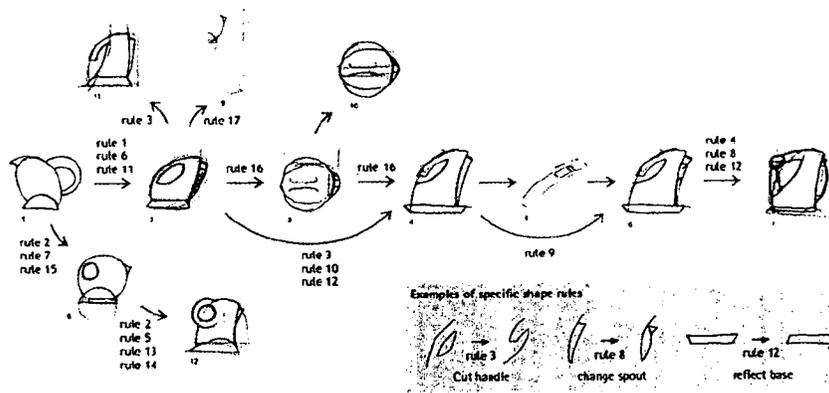
1. การเปลี่ยนแปลงโครงร่าง (Outline Transformation) เป็นกฎอธิบายการเปลี่ยนแปลงเส้นระหว่างจุด 2 จุด ในการสร้างเส้นโค้งหรือเส้นตรง และการเปลี่ยนแปลงของความกว้าง (Width) หรือความยาว (Length) ขององค์ประกอบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงร่างใช้สำหรับปรับแต่ง (Refinements) รูปร่าง
2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Structure Transformation) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นกฎอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในลักษณะของการย้าย การหมุน การสะท้อน และสัดส่วนขององค์ประกอบ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงร่างใช้ในการสำรวจความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่แตกต่างกันระหว่างองค์ประกอบซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมีส่งผลกระทบต่อรูปแบบของการออกแบบมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโครงร่าง
3. การเพิ่ม (Add Element) เป็นกฎอธิบายการเพิ่มองค์ประกอบ โดยการเพิ่มองค์ประกอบใหม่ที่ไม่ได้มีอธิบายอยู่ในการสเก็ตช์ก่อนหน้านี้
4. การลบออก (Delete Element) เป็นกฎอธิบายการลบองค์ประกอบจากการสเก็ตช์ โดยการลบองค์ประกอบอธิบายอยู่ในการสเก็ตช์ก่อนหน้านี้
5. การตัด (Cut Element) เป็นกฎอธิบายการแบ่งองค์ประกอบโดยทำการแบ่งองค์ประกอบออกเป็นสองส่วนโดยจะทำการเก็บส่วนที่ต้องการไว้และส่วนที่ไม่ต้องการทำการลบออกไป
6. การแทนที่ (Substitute Element) เป็นกฎอธิบายการเปลี่ยนองค์ประกอบที่มีอยู่ในการสเก็ตช์ด้วยองค์ประกอบใหม่
7. การเปลี่ยนมุมมอง (Change View) เป็นกฎอธิบายการเปลี่ยนมุมมองของการออกแบบ



ภาพ 12 แสดงกฎรูปร่างทั่วไป [16]

## 1.2 การเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง (Shape Transformation)

การเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง เป็นการระบุนการเปลี่ยนแปลงด้านขวา และแนวตั้ง ในการสเกตช์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เป็นการอธิบายกระบวนการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างผ่าน จำนวนกฎรูปร่างที่จำกัด และมีการแสดงให้เห็นถึงวิธีการประยุกต์ใช้กฎรูปร่างอย่างต่อเนื่องในงาน สเกตช์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีการระบุรูปร่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากด้านซ้ายมือไปยังด้าน ขวามือซึ่ง ดังแสดงในภาพ 13 การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของกาทัมน้ำ [16]



ภาพ 13 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของภาตัมน้ำ [35]

### ทฤษฎีการออกแบบแผนการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น ดังแสดงในภาพ 16 โดยกำหนดให้ตัวแปร  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$  เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factor) ขณะที่  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_q$  เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factor) และบางครั้งเรียกว่าปัจจัยรบกวน (Noise Factor) ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการทดลองจึงเกี่ยวกับการหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ  $y$  และการหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่จะทำให้ค่า  $y$  ได้ตามค่าที่ต้องการ

ดังนั้น การออกแบบการทดลองจึงอาจจะนำมาใช้ทั้งการพัฒนาระบบการที่มีปัญหา เพื่อให้กระบวนการนั้น มีสมรรถนะดีขึ้น หรือทำให้เกิดความมั่นคง (Robust or Insensitive) ต่อแหล่งความผันแปรที่อยู่ภายนอก

วิธีการควบคุมกระบวนการทางสถิติและการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือสองชนิดที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการปรับปรุง และหาค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการ [36]

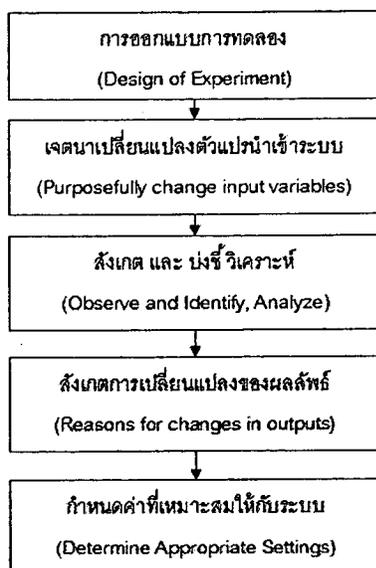
#### 1. การออกแบบแผนการทดลอง

(Experimental Design or Design of Experiments)



ภาพ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ [36]

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบซึ่งโดยหลักแล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนและตัวแปรที่ควบคุมได้ มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ดังแสดงในภาพ 14



ภาพ 15 แสดงหลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง [36]

ดังนั้น ในภาพรวมการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง ดังแสดงในภาพ 15 โดยเฉพาะส่วนของการออกแบบกระบวนการในด้านการกำหนดพารามิเตอร์หรือค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบ [36]

## 2. การออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ (Process or Product Design)

การออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

### 2.1 การออกแบบระบบ (System Design)

การออกแบบระบบ คือ การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการเพื่อออกแบบตัวแบบเริ่มต้น (ต้นแบบ หรือ “Basic Prototype”) โดยตัวแบบนี้ถูกกำหนดโดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

### 2.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ (Parameter Design)

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ คือ การศึกษาเพื่อกำหนดและระบุค่าที่ดีที่สุด และเหมาะสมภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการให้กับกระบวนการ กล่าวได้ว่าเป็นการพิจารณาพารามิเตอร์ใดส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์มากน้อยเพียงไร ซึ่งในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ทำได้สองแนวทาง ได้แก่ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ เพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดหรือกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการ และทำการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นต้น [36]

## 3. ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญพอสรุปได้เป็น 4 ส่วน

3.1 กำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีอิทธิพลสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง (Y)

3.2 กำหนดค่าของตัวแปร (ปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้โอกาสที่ผลของค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

3.3 กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) โดยทำให้ค่าความแปรปรวนของ Y มีค่าต่ำที่สุด

3.4 กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X's) ที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้ผลกระทบของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Z's) มีค่าน้อยที่สุด

ในการทำการออกแบบทดลองนั้น ต้องทำการตั้งวัตถุประสงค์ขึ้นก่อน และวัตถุประสงค์ในลำดับที่สูงขึ้นนั้นจะบรรลุได้ต้องผ่านการวิเคราะห์ในส่วนก่อนหน้าไปพร้อมกันด้วย เช่น ถ้าตั้งวัตถุประสงค์ตาม (2) ไว้ต้องทำการวิเคราะห์ (1) มาก่อน หรือถ้าวัตถุประสงค์ตาม (3) ไว้ต้องทำการวิเคราะห์ (1) และ (2) ไปพร้อมกันด้วย [36]

จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การทดลองในงานวิจัยนี้ เกี่ยวข้องกับการทดลอง ปัจจัยหลายปัจจัย เพื่อหาผลกระทบของแต่ละปัจจัย ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองมีหลากหลาย วิธี ผู้วิจัยจึงทำการเลือกวางแผนและดำเนินการทดลองด้วยวิธีการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล

#### 4. การทดลองแบบแฟคทอเรียล

การทดลองแฟคทอเรียล คือ วิธีการที่นิยมใช้ในการออกแบบแผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interactions) เช่น กรณีศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท

1. ผลกระทบหลัก หรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ ผลกระทบกรณีที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C
2. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors or 2-way Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC, และ AC
3. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3-ways Interactions) คือผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

การทดลองแฟคทอเรียล แบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก ได้แก่ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) และการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment)

การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการศึกษผลกระทบร่วม (Interactions) ผู้วิจัยจะใช้จำนวนระดับของปัจจัยที่ระดับนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ปัจจัยวิกฤต (Critical Factors) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาละเอียดจะใช้ระดับที่มีค่ามาก (ในการทดลองเดียวกัน ผู้วิจัยไม่จำเป็นต้องทำการศึกษาปัจจัยแต่ละปัจจัยที่จำนวนระดับเท่ากัน) ค่าจำนวนระดับที่ระบุต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง เช่น กรณีศึกษา 2 ปัจจัย วัตถุประสงค์การทดลอง คือ ทำเพื่อคัดปัจจัยออก (Screening Experiment) หรือทำเพื่อต้องการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Model) ทั้งนี้ก็เช่นเดียวกับที่กล่าวว่า “มีจุด 2 จุด สร้างสมการเส้นตรงได้” ในกรณีทำการศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือโพลีโนเมียลกำลังสองขึ้นไป [36]

## ทฤษฎีการออกแบบสอบถาม (Questionnaire)

แบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยที่นิยมใช้กันมากที่สุด ลักษณะโดยทั่วไปจะคล้ายกับแบบทดสอบ จะแตกต่างกันตรงที่แบบสอบถามจะเน้นถามความเป็นจริง (Fact) ของตัวผู้ตอบ และความรู้สึกนึกคิดของผู้ตอบต่อสถานการณ์ต่างๆ ตามที่แบบสอบถามได้กำหนดไว้ ดังนั้นการตอบจึงไม่มีข้อใดที่ตอบผิด เพราะทุกข้อผู้ตอบตอบตามข้อเท็จจริงที่เป็นอยู่ หรือมีความคิดเห็นว่าเป็นเช่นนั้น ผลที่ได้ออกมาจึงมิได้มีค่าเป็นคะแนนแต่จะออกมาเป็นค่าความถี่ [37]

### 1. ขั้นตอนการสร้างแบบสอบถาม

การสร้างแบบสอบถามประกอบไปด้วยขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาคุณลักษณะหรือประเด็นที่จะวัด

ผู้วิจัยจะต้องทราบว่าคุณลักษณะหรือประเด็นที่จะวัดมีอะไรบ้าง โดยอาจดูได้จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย กรอบแนวความคิดหรือสมมติฐานการวิจัย จากนั้นจึงศึกษาคุณลักษณะหรือประเด็นที่จะวัดดังกล่าวให้เข้าใจอย่างละเอียดทั้งเชิงทฤษฎีและนิยามเชิงปฏิบัติการ ซึ่งอาจได้จากเอกสาร ตำราหรือผลการวิจัยต่างๆ ที่มีลักษณะเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดประเภทของข้อคำถาม

ผู้วิจัยจะต้องพิจารณาประเภทของข้อคำถามที่จะวัดคุณลักษณะที่ต้องการซึ่งข้อคำถามในแบบสอบถามแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. คำถามปลายเปิด (Open Ended Question) ลักษณะของข้อคำถามจะเป็นการตั้งคำถามโดยเปิดโอกาสให้ผู้ตอบตอบได้อย่างเสรี เพื่อให้ได้มาซึ่งความคิดเห็นอย่างกว้างๆ

2. คำถามปลายปิด (Close Ended Question) ลักษณะเป็นการตั้งคำถามโดยมีการกำหนดตัวเลือกคำตอบต่างๆ เอาไว้ล่วงหน้า เพื่อให้ผู้ตอบเลือกตอบจากตัวเลือกที่กำหนดไว้ให้เท่านั้น การกำหนดตัวเลือกคำตอบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจะต้องมีการศึกษาค้นคว้ามาเป็นอย่างดีตัวเลือกตอบจึงจะสามารถครอบคลุมข้อคำถามแบบปิดนี้ได้ การสร้างข้อคำถามแบบปิดจะต้องใช้ความรู้ความสามารถของผู้วิจัยเป็นพิเศษ อีกทั้งใช้ระยะเวลาและการค้นคว้ามากกว่าการสร้างข้อคำถามแบบเปิด แต่จะเป็นผลดีต่อตัวผู้ตอบที่จะได้รับความสะดวก รวดเร็ว และผู้ตอบจะมีความเต็มใจที่จะตอบมากกว่าข้อคำถามแบบเปิด และยังช่วยให้ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัยได้ง่าย รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ข้อคำถามแบบปิดที่นิยมใช้กันแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบตรวจสอบรายการ (Check - List) แบบจัดอันดับ (Ranking Question) และแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) [37]

โดยข้อคำถามแต่ละประเภทมีข้อเด่นและข้อด้อย แสดงรายละเอียดในตาราง 2 และ ตาราง 3 ตามลำดับ

ตาราง 2 แสดงข้อเด่นของคำถามปลายเปิดและคำถามปลายปิด [37]

ข้อเด่น	
คำถามปลายเปิด	คำถามปลายปิด
1. สามารถสร้างคำถามได้ง่าย	1. ไม่ต้องเสียเวลาในการสรุปประเด็นคำตอบ
2. เปิดโอกาสให้ผู้ตอบได้แสดงความคิดเห็น เต็มที่	2. คำตอบที่ได้รับจะจำกัดเฉพาะประเด็นที่ เราสนใจศึกษาเท่านั้น
3. คำตอบที่ได้จะตรงกับความรู้สึกนึกคิดของ ผู้ตอบมากกว่าคำถามปลายปิด	3. ผู้ตอบไม่ต้องเสียเวลาในการคิดหาคำตอบ และเขียนเรียบเรียงคำตอบ

ตาราง 3 แสดงข้อด้อยของคำถามปลายเปิดและคำถามปลายปิด [37]

ข้อด้อย	
คำถามปลายเปิด	คำถามปลายปิด
1. คำตอบที่ได้จะมีความหลากหลาย ดังนั้นบาง คำตอบก็ไม่อยู่ในประเด็นที่ผู้วิจัยสนใจ	1. ผู้ตอบไม่มีอิสระในการตอบ เพราะถูก จำกัดให้เลือกตอบเฉพาะคำตอบที่มีให้ เลือกเท่านั้น
2. เสียเวลาในการสรุปประเด็นคำตอบเพื่อนำมา ลงรหัส	2. ผู้วิจัยต้องเสียเวลาในการคิดหาคำตอบ ไว้ล่วงหน้าว่าผู้ตอบจะตอบอะไรบ้าง ซึ่ง อาจไม่ตรงกับคำตอบของผู้ตอบ
3. เสียเวลาในการคิดหาคำตอบ ซึ่งอาจทำให้ ผู้ตอบเกิดความเบื่อหน่ายในการตอบคำถาม	
4. บางคำถามผู้ตอบอาจมีความรู้สึกลำบากใจ หรือไม่อยากตอบ	

### ขั้นตอนที่ 3 การร่างแบบสอบถาม

เมื่อผู้วิจัยทราบถึงคุณลักษณะหรือประเด็นที่จะวัดและกำหนดประเภทของข้อคำถามที่จะมีอยู่ในแบบสอบถามเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงลงมือเขียนข้อคำถามให้ครอบคลุมทุกคุณลักษณะหรือประเด็นที่จะวัด

### ขั้นตอนที่ 4 การปรับปรุงแบบสอบถาม

หลังจากที่สร้างแบบสอบถามเสร็จแล้ว ผู้วิจัยควรนำแบบสอบถามนั้นมาพิจารณา ทบทวนอีกครั้งเพื่อหาข้อบกพร่องที่ควรปรับปรุงแก้ไข และควรให้ผู้เชี่ยวชาญได้ตรวจแบบสอบถามนั้นด้วยเพื่อที่จะได้นำข้อเสนอแนะและข้อวิพากษ์วิจารณ์ของผู้เชี่ยวชาญมาปรับปรุงแก้ไขให้ดียิ่งขึ้น

### ขั้นตอนที่ 5 นำแบบสอบถามไปทดลองใช้เพื่อวิเคราะห์คุณภาพ

เป็นการนำเอาแบบสอบถามที่ได้ปรับปรุงแล้วไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่างเล็กๆ เพื่อนำผลมาตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถาม ซึ่งการวิเคราะห์หรือตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถาม

### ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงแบบสอบถามให้สมบูรณ์

ผู้วิจัยจะต้องทำการแก้ไขข้อบกพร่องที่ได้จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของแบบสอบถามและตรวจสอบความถูกต้องของถ้อยคำหรือสำนวน เพื่อให้แบบสอบถามมีความสมบูรณ์และมีคุณภาพทำให้ผู้ตอบอ่านเข้าใจได้ตรงประเด็นที่ผู้วิจัยต้องการ ซึ่งจะส่งผลให้ผลงานวิจัยเป็นที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

### ขั้นตอนที่ 7 จัดพิมพ์แบบสอบถาม

ทำการจัดพิมพ์แบบสอบถามที่ได้ปรับปรุงเรียบร้อยแล้วเพื่อนำไปใช้จริงในการเก็บรวบรวมข้อมูลกับกลุ่มเป้าหมาย โดยจำนวนที่จัดพิมพ์ไม่ควรน้อยกว่าจำนวนเป้าหมายที่ต้องการเก็บรวบรวมข้อมูลและควรมีการพิมพ์สำรองไว้ในกรณีที่แบบสอบถามเสียหรือสูญหายหรือผู้ตอบไม่ตอบกลับ [37]

## 2. ข้อเด่นและข้อด้อยของการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม

การใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูลมีข้อเด่นและข้อด้อยที่ต้องพิจารณาประกอบในการเลือกใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังนี้

### 2.1 ข้อเด่นของการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม

ถ้าตัวอย่างมีขนาดใหญ่วิธีการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามเป็นวิธีการที่สะดวกและประหยัดกว่าวิธีอื่น

ผู้ตอบมีเวลาตอบมากกว่าวิธีการอื่น

ไม่จำเป็นต้องฝึกอบรมให้กับพนักงานเก็บข้อมูลมากเหมือนกับวิธีการสัมภาษณ์หรือการสังเกต

ไม่เกิดความลำเอียงอันเนื่องมาจากการสัมภาษณ์หรือการสังเกตเพราะผู้ตอบเป็นผู้ตอบข้อมูลเองสามารถส่งแบบสอบถามให้ผู้ตอบทางไปรษณีย์ได้

## 2.2 ข้อดีของการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม

ในกรณีที่ส่งแบบสอบถามให้ผู้ตอบทางไปรษณีย์มักจะได้แบบสอบถามกลับคืนมาน้อยและต้องเสียเวลาในการติดตาม อาจทำให้ระยะเวลาการเก็บข้อมูลล่าช้ากว่าที่กำหนดไว้

การเก็บข้อมูลโดยวิธีการใช้แบบสอบถามจะใช้ได้เฉพาะกับกลุ่มประชากรเป้าหมายที่อ่านและเขียนหนังสือได้เท่านั้น

จะได้ข้อมูลจำกัดเฉพาะที่จำเป็นจริงๆ เท่านั้นเพราะการเก็บข้อมูลโดยวิธีการใช้แบบสอบถามจะต้องมีคำถามจำนวนน้อยข้อที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

การส่งแบบสอบถามไปทางไปรษณีย์หน่วยตัวอย่างอาจไม่ได้เป็นผู้ตอบแบบสอบถามเองก็ได้ทำให้คำตอบที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไม่ตรงกับความจริง

ถ้าผู้ตอบไม่เข้าใจคำถามหรือเข้าใจคำถามผิดหรือไม่ตอบคำถามบางข้อหรือไม่ไตร่ตรองให้รอบคอบก่อนที่จะตอบคำถาม ก็จะทำให้ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนได้โดยที่ผู้วิจัยไม่สามารถย้อนกลับไปสอบถามหน่วยตัวอย่างนั้นได้อีก

ผู้ที่ตอบแบบสอบถามกลับคืนมาทางไปรษณีย์อาจเป็นกลุ่มที่มีลักษณะแตกต่างจากกลุ่มผู้ที่ไม่ตอบแบบสอบถามกลับคืนมา ดังนั้นข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะมีความลำเอียงอันเนื่องมาจากกลุ่มตัวอย่างได้การใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูลมีทั้งข้อเด่นข้อด้อย [37]

## ทฤษฎีสम्मมติฐานและการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis and Hypothesis Test)

### 1. สมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis)

สมมติฐานทางสถิติ เป็นสมมุติฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าทางสถิติ ซึ่งจะเขียนอธิบายในรูปของสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์เป็นค่าพารามิเตอร์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ (Parameter) เป็นค่าต่างๆ ของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ย ( $\mu$ ) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma$ ) ค่าความแปรปรวน ( $\sigma^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $\rho$ ) ต่อไปนี้ ซึ่งสัญลักษณ์เปรียบเทียบกับระหว่างค่าสถิติที่ใช้ในกลุ่มตัวอย่างกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับประชากรทั้งหมด แสดงดังในตาราง 4 [38]

ตาราง 4 แสดงสัญลักษณ์เปรียบเทียบระหว่างค่าสถิติกับค่าพารามิเตอร์ [38]

สถิติที่ใช้	ค่าสถิติ (กลุ่มตัวอย่าง)	ค่าพารามิเตอร์ (ประชากรทั้งหมด)
ค่าเฉลี่ย (Mean)	$\bar{X}$	$\mu$
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)	S	$\sigma$
ค่าความแปรปรวน (Variance)	$S^2$	$\sigma^2$
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation)	r	$\rho$
ค่าสัดส่วน (Proportion)	P	$\pi$

สมมติฐานทางสถิติแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สมมติฐานหลัก และสมมติฐานรอง ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1.1 สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis; $H_0$ )

สมมติฐานหลักหรือสมมติฐานศูนย์ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $H_0$  เป็นสมมติฐานที่กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งมีความหมายว่า ค่าที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นไม่แตกต่างกันหรือไม่สัมพันธ์กัน สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางสถิติได้ ดังนี้

กรณีค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม ไม่แตกต่างกัน

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

กรณีค่าความสัมพันธ์เท่ากับศูนย์หรือตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กัน

$$H_0: \rho=0$$

#### 1.2 สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis; $H_1$ )

สมมติฐานรองหรือสมมติฐานทางเลือก สามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $H_1$  เป็นสมมติฐานที่จะเขียนไม่ให้ความหมายเหมือนหรือเขียนให้ความหมายตรงข้ามกับสมมติฐานหลัก สมมติฐานรองแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สมมติฐานแบบไม่ระบุทิศทางและสมมติฐานแบบระบุทิศทาง

### 1.2.1 สมมติฐานแบบไม่ระบุทิศทาง (Non-Directional Hypothesis)

เป็นสมมติฐานรองที่จะเขียนให้ตรงกันข้ามกับสมมติฐานหลัก โดยจะไม่กำหนดว่าจะไปในทิศทางที่มากกว่าหรือน้อยกว่า ถ้าสมมติฐานหลักใช้เครื่องหมายเท่ากับ (=) สมมติฐานรองแบบไม่ระบุทิศทางจะใช้เครื่องหมายไม่เท่ากับ ( $\neq$ ) แสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (\text{สมมติฐานหลัก})$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\text{สมมติฐานรองแบบไม่ระบุทิศทาง})$$

หรือ

$$H_0: \rho = 0 \quad (\text{สมมติฐานหลัก})$$

$$H_1: \rho \neq 0 \quad (\text{สมมติฐานรองแบบไม่ระบุทิศทาง})$$

### 1.2.2 สมมติฐานแบบระบุทิศทาง (Directional Hypothesis)

เป็นสมมติฐานรองที่จะเขียนไม่ให้ความหมายตรงกันกับสมมติฐานหลัก โดยจะต้องเขียนระบุให้ค่าใดค่าหนึ่งมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าอีกค่าหนึ่ง เช่น

$$H_0: \mu_1 \leq \mu_2 \quad (\text{สมมติฐานหลัก})$$

ในที่นี้ สมมติฐานหลัก  $H_0$  กำหนดไว้มีความหมายว่า ค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ 1 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ 2 ดังนั้น สมมติฐานรองแบบระบุทิศทางในกรณีนี้จะต้องเขียนระบุทิศทางที่ตรงกันข้าม ดังนี้

$$H_1: \mu_1 > \mu_2 \quad (\text{หมายถึง ค่าเฉลี่ยกลุ่ม 1 มากกว่าค่าเฉลี่ยกลุ่ม 2})$$

หรือในทางตรงกันข้าม ถ้ามีการกำหนดสมมติฐานหลักไว้ดังนี้

$$H_0: \mu_1 \geq \mu_2 \quad (\text{สมมติฐานหลัก})$$

ในที่นี้ สมมติฐานหลัก  $H_0$  กำหนดไว้มีความหมายว่า ค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ 1 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ 2 ดังนั้น สมมติฐานรองแบบระบุทิศทางในกรณีนี้ จะต้องเขียนระบุทิศทางที่ตรงกันข้าม ดังนี้

$H_1: \mu_1 < \mu_2$  (หมายถึง ค่าเฉลี่ยกลุ่ม 1 น้อยกว่าค่าเฉลี่ย

กลุ่ม 2)

## 2. การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

งานวิจัยที่ผู้วิจัยได้มีการตั้งสมมติฐานการวิจัยไว้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการทดสอบสมมติฐานการวิจัยนั้นด้วยว่าผลการวิจัยที่ออกมาเป็นไปตามสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้หรือไม่ ซึ่งจะต้องพิจารณาเกี่ยวกับ ระดับความมีนัยสำคัญ ระดับความเชื่อมั่น ขอบเขตวิกฤต และค่าวิกฤต โดยแสดงรายละเอียดไว้ ดังต่อไปนี้

### 2.1 ระดับความมีนัยสำคัญ (Level of Significance)

ระดับความมีนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) หรือค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ คือค่าความน่าจะเป็นในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ถ้ากำหนดให้ค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.5 แสดงว่ายอมรับค่าความคลาดเคลื่อน 5% และเมื่อนำเอาพื้นที่ใต้โค้งทั้งหมดซึ่งมีค่า 100% หรือ 1 ไปลบค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.5 จะได้ค่าเท่ากับ 0.95 หรือ 95% โดยที่ค่า 0.95 นี้ เรียกว่า ระดับความเชื่อมั่นซึ่งหมายถึง ความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) มีความเชื่อมั่นถึง 95%

### 2.2 ระดับความเชื่อมั่น (Level of Confidence)

ระดับความเชื่อมั่น หมายถึง ความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ระดับความเชื่อมั่นนี้จะอยู่ในเขตการยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ )

### 2.3 ขอบเขตวิกฤต (Critical Region)

ขอบเขตวิกฤต หมายถึง ขอบเขตที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ซึ่งถูกกำหนดจากค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าค่าความน่าจะเป็นของสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ในขอบเขตนี้แสดงว่าการทดสอบสมมติฐานมีนัยสำคัญ (Significance) เขียนแบบย่อๆ ว่า Sig. คือจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และยอมรับสมมติฐานรอง ( $H_1$ )

### 2.4 ค่าวิกฤต (Critical Value)

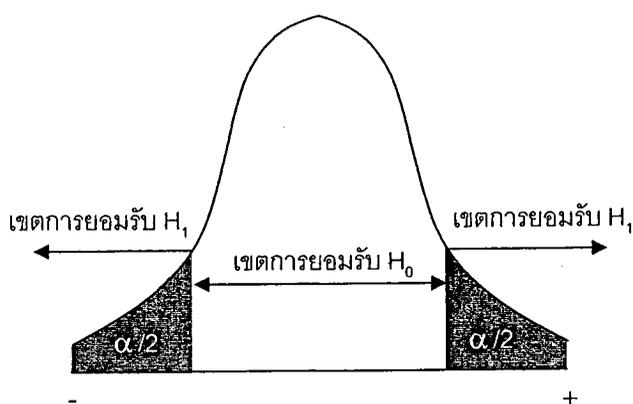
ค่าวิกฤต หมายถึง ค่าที่เป็นจุดแบ่งระหว่างขอบเขตการยอมรับกับเขตวิกฤติ (เขตปฏิเสธ)

## 3. ประเภทของการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติมี 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบสมมติฐานแบบสองทางและการทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว

### 3.1 การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง (Two-Tail Test)

การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง เป็นการทดสอบสมมติฐานแบบไม่ระบุทิศทาง จะใช้ทดสอบสมมติฐานการวิจัยในกรณีที่ผู้วิจัยไม่แน่ใจว่าคำตอบจะเป็นไปในทิศทางใด ดังแสดงในภาพ 16 และตาราง 5



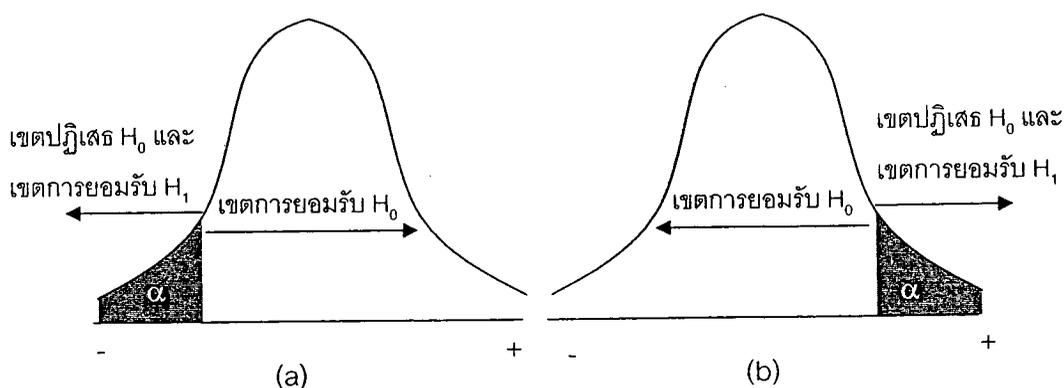
ภาพ 16 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบ 2 ทาง (Two – Tail Test) [38]

ตาราง 5 แสดงตัวอย่างการตั้งสมมติฐานแบบ 2 ทิศทาง

สมมติฐานงานวิจัย	สมมติฐานทางสถิติ
พารามิเตอร์ A และพารามิเตอร์ B มีผลต่อรูปร่างไม่แตกต่างกัน	$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ $\mu_1 =$ พารามิเตอร์ A
พารามิเตอร์ A และพารามิเตอร์ B มีผลต่อรูปร่างไม่แตกต่างกัน	$\mu_2 =$ พารามิเตอร์ B
รายได้ไม่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างของเครื่องประดับแหวน	$H_0: \rho=0$ $H_1: \rho \neq 0$

### 3.2 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว (One-Tail Test)

การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว เป็นการทดสอบสมมติฐานแบบระบุทิศทาง ในกรณีที่ผู้วิจัยค่อนข้างมั่นใจว่าคำตอบจะเป็นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ดังแสดงในภาพ 17 และตาราง 6



ภาพ 17 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว (One – Tail Test) ทั้งในกรณีเขตปฏิเสธอยู่ด้านซ้ายและเขตปฏิเสธอยู่ด้านขวา [38]

หมายเหตุ: (a) กรณีเขตปฏิเสธอยู่ด้านซ้ายของโค้งปกติ  
(b) กรณีเขตปฏิเสธอยู่ด้านขวาของโค้งปกติ

ตาราง 6 แสดงตัวอย่างการตั้งสมมติฐานแบบทางเดียว [38]

สมมติฐานงานวิจัย	สมมติฐานทางสถิติ
พารามิเตอร์ A มีผลต่อรูปร่างมากกว่าพารามิเตอร์ B	$H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$ $H_1 : \mu_1 > \mu_2$ $\mu_1 =$ พารามิเตอร์ A $\mu_2 =$ พารามิเตอร์ B
พารามิเตอร์ A มีผลต่อความสวยงามมากกว่าพารามิเตอร์ B	$H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$ $H_1 : \mu_1 > \mu_2$ $\mu_1 =$ พารามิเตอร์ A $\mu_2 =$ พารามิเตอร์ B

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน แบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก คือ

ขั้นตอนที่ 1 การตั้งสมมติฐานคือการระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับระบบหรือประชากร โดยทั่วไปจะกำหนด  $H_1$  ก่อนและส่วนกลับของข้อความใน  $H_1$  บนเส้นจำนวนจริงจะระบุไว้ใน  $H_0$

$H_1$  คือ ข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าจริง (Prove)

$H_0$  คือ ข้อความที่เป็นบทกลับของ  $H_1$  (Disprove)

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดระดับทดสอบหรือระดับนัยสำคัญ (Significance Level;  $\alpha$ ) โดยทั่วไปค่าที่นิยมใช้ คือ 5% หรือ  $\alpha$  เท่ากับ 0.05 แต่ตามความเป็นจริงแล้วค่า  $\alpha$  ที่ใช้สามารถใช้ได้ในช่วง 1% ถึง 10% หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90%

ขั้นตอนที่ 3 ระบุค่าตัวทดสอบทางสถิติหรือการแจกแจงทางสถิติที่ใช้ทดสอบ (Test Statistics) และคำนวณค่าโดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่างค่าตัวทดสอบทางสถิติที่ใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ( $\theta$ ) ที่สนใจเกี่ยวกับระบบ ได้แก่ สนใจทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย และสนใจทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวน

กลุ่มที่ 1 สนใจทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย ( $\theta = \{\mu, \mu_1 - \mu_2\}$ ) แบ่งเป็น 2 กรณี คือกรณีทราบค่าความแปรปรวนที่แท้จริง ( $\sigma^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ Z และกรณีไม่ทราบ  $\sigma^2$  แต่ค่าความแปรปรวนจากตัวอย่าง ( $S^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ t

กลุ่มที่ 2 สนใจทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวน ( $\theta = \{\sigma^2, \sigma_1^2/\sigma_2^2\}$ ) แบ่งเป็น 2 กรณี คือกรณีศึกษาประชากรเดียว ( $\sigma^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ  $\chi^2$  และกรณีศึกษาสองประชากร ( $\sigma_1^2/\sigma_2^2$ ) ใช้ตัวทดสอบ F

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดบริเวณวิกฤตหรือบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ซึ่งตำแหน่งถูกกำหนดตามเครื่องหมายใน  $H_1$  ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  และบริเวณที่ปฏิเสธ  $H_0$  ไม่ได้ คือ ค่าวิกฤต (Critical Value) ซึ่งได้จากการเปิดตารางของตัวทดสอบนั้นๆ ซึ่งปัจจุบันถ้าใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้ค่า P-Value เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจแทน

ขั้นตอนที่ 5 สรุปผลการทดสอบ ในปัจจุบันการสรุปผลทำได้ 2 ลักษณะ คือ พิจารณาค่าสถิติที่คำนวณได้ใน (3) ว่าอยู่ในบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  หรือไม่ จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ ค่าใน (3) ตกในบริเวณปฏิเสธ  $H_0$

พิจารณาเทียบพื้นที่โดยใช้ค่า P-Value เทียบกับพื้นที่ของบริเวณปฏิเสธ  $H_0$  โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า P-Value  $< \alpha$  เท่านั้น

จะเห็นได้ว่าสะดวกกว่าการกำหนดบริเวณวิกฤต (C.R.) หรือ ปฏิเสธ  $H_0$  (R.R.) ซึ่งต้องคำนึงถึงเครื่องหมาย  $H_1$  ในการชี้ตำแหน่งที่จะปฏิเสธ  $H_0$

#### 4. ค่า P-Value และการคำนวณ

P-Value คือ ระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดหรือโอกาสที่น้อยที่สุดที่จะสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ในการทดสอบสมมติฐานเมื่อสมมติฐานหลักนั้นถูกต้อง ( $P\text{-Value} = \min \{\alpha_i\}$ )

1-( P-Value) คือ ระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงของการทดสอบสมมติฐานนั้นๆ

ดังนั้น การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐานจะทำให้ทราบความเชื่อมั่นที่แท้จริงและสะดวก เนื่องจากไม่ต้องมีตารางสถิติของตัวทดสอบอยู่ข้างกาย และตัดปัญหาการเปิดตารางผิดโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติทั่วไปจะคำนวณค่านี้ให้โดยอัตโนมัติ ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือต้องทราบว่าในการสรุปผลนั้น “จะทำการปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่า P-Value  $< \alpha$ ” เท่านั้นไม่ต้องคำนึงถึงเครื่องหมายใน  $H_1$  เนื่องจากจะใช้ในการคำนวณ P-Value มาก่อนแล้วนั่นเอง

การคำนวณค่า P-Value แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะตามรูปแบบการทดสอบสมมติฐานรอง คือ กรณีทดสอบทางเดียว และกรณีทดสอบสองทาง

กรณีที่ 1 กรณีทดสอบทางเดียว

กรณีทดสอบทางเดียว ( $H_1 : >$  หรือ  $<$ ) ค่า P-Value = P (ตัวทดสอบที่ใช้เครื่องหมาย  $H_1 ; >, <$ ) ค่าที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 3)

กรณีที่ 2 กรณีทดสอบสองทาง

กรณีทดสอบสองทาง ( $H_1 : \neq$ ) ค่า P-Value =  $2 * P$  (ตัวทดสอบที่ใช้  $\{>, <\}$  ค่าที่คำนวณได้ในขั้นที่ 3)

เครื่องหมายใน  $\{ \}$  กำหนดตามตำแหน่งของค่าที่คำนวณได้ กล่าวคือ

ถ้าค่าตกอยู่ด้านซ้ายของค่ามัธยฐานของการแจกแจงใช้เครื่องหมาย “  $<$  ”

ถ้าค่าตกอยู่ด้านขวาของค่ามัธยฐานของการแจกแจงใช้เครื่องหมาย “  $>$  ” [38]

## ทฤษฎีทางสถิติ (Statistics)

สถิติ (Statistics) คือ วิธีการจัดการข้อมูลโดยเริ่มต้นตั้งแต่การเก็บรวบรวมข้อมูลไปจนถึงการวิเคราะห์ และแปลผลข้อมูลเพื่อช่วยในการตัดสินใจในภาวะไม่แน่นอน (Uncertain) โดยอาศัยรากฐานของหลักความน่าจะเป็น (Probability) เป็นพื้นฐานสำคัญซึ่งมีหลักการประเภทของสถิติและค่าสถิติที่สำคัญโดยอธิบายรายละเอียดไว้ ดังนี้

### 1. หลักการสถิติ

สถิติเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection) การนำเสนอข้อมูล (Data Presentation) การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) อย่างเป็นระบบ โดยทั่วไปค่าสถิติจะเป็นเครื่องมือช่วยอธิบายลักษณะต่างๆ ของข้อมูล มีระเบียบวิธีทางสถิติแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมข้อมูล (Data Collection) เป็นการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลตามที่ได้มีการวางแผนไว้ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งข้อมูลปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ

ขั้นตอนที่ 2 การนำเสนอข้อมูล (Data Presentation) เป็นการจัดทำข้อมูลที่รวบรวมได้ให้อยู่ในรูปแบบที่กะทัดรัด เช่น ตาราง กราฟ แผนภูมิ และข้อความ เป็นต้น เพื่อความสะดวกในการอ่านข้อมูลให้เข้าใจง่ายและเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) เป็นขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลซึ่งในการวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้สูตรทางสถิติต่างๆ หรือใช้การอ้างอิงทางสถิติขึ้นกับวัตถุประสงค์ของงานนั้นๆ เช่น การวิเคราะห์แนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง การวัดการกระจาย การทดสอบสมมติฐาน และการประมาณค่า เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 การตีความหมาย (Interpretation) เป็นขั้นตอนของการนำผลมาวิเคราะห์หรืออธิบายให้บุคคลทั่วไปเข้าใจ อาจจำเป็นต้องมีการขยายความในการอธิบายเพื่อให้งานที่ศึกษาเป็นประโยชน์ต่อคนทั่วไปได้

จากกระบวนการทางสถิติดังกล่าวเราสามารถจำแนกเป็นสถิติศาสตร์ที่สอดคล้องกับขั้นตอนต่างๆ ได้ 2 ลักษณะคือ สถิติบรรยาย (หรือสถิติเชิงพรรณนา) และสถิติอ้างอิง (หรือสถิติเชิงอนุมาน) [37, 39] ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เฉพาะสถิติเชิงพรรณนาซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในส่วนถัดไป

### 1.1 สถิติอ้างอิง

สถิติอ้างอิงหรือสถิติเชิงอนุมาน เป็นการนำผลข้อมูลที่เก็บมาได้จากกลุ่มตัวอย่าง (Sample) ไปใช้อ้างอิง และอธิบายถึงกลุ่มประชากร (Population) ทั้งหมด การบรรยายหรือสรุปผลจะชี้หลักความน่าจะเป็น (Probability) มาทดสอบสมมติฐาน

สถิติอ้างอิงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สถิติอ้างอิงแบบมีพารามิเตอร์ (Parametric Inference) และสถิติอ้างอิงแบบไม่มีพารามิเตอร์ (Non-Parametric Inference)

#### สถิติอ้างอิงแบบมีพารามิเตอร์

สถิติอ้างอิงแบบมีพารามิเตอร์นิยมใช้กับข้อมูลที่มีระดับการวัดตัวแปร เป็นระดับมาตราอันตรภาค (Interval Scale) หรือระดับมาตราอัตราส่วน (Ratio Scale) ที่ลักษณะของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือประชากรที่มีค่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกันมาก สถิติที่นิยมนำมาใช้ในการทดสอบสมมติฐาน ได้แก่ t-test, F-test, Z-test และ Anova

#### สถิติอ้างอิงแบบไม่มีพารามิเตอร์

สถิติอ้างอิงแบบไม่มีพารามิเตอร์จะใช้กับข้อมูลหรือตัวแปรที่ไม่สามารถใช้กับสถิติอ้างอิงแบบมีพารามิเตอร์ได้ มีลักษณะระดับการวัดตัวแปรของข้อมูลเป็นระดับมาตรานามบัญญัติ (Nominal Scale) หรือระดับมาตราเรียงลำดับ (Ordinal Scale) และลักษณะของข้อมูลไม่

มีการแจกแจงแบบปกติหรือใกล้เคียงกับแบบปกติ ความน่าเชื่อถือแบบการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติอ้างอิงแบบไม่มีพารามิเตอร์นี้จะน้อยกว่าแบบมีพารามิเตอร์ สถิติอ้างอิงแบบไม่มีพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ทดสอบสมมติฐานในงานวิจัย ได้แก่ การทดสอบไคสแควร์ (Chi-Square) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

## 1.2 สถิติเชิงพรรณนา

สถิติเชิงพรรณนาเป็นการนำข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาบรรยายถึงลักษณะของข้อมูลที่เก็บมาได้ ทั้งในรูปแบบของตาราง ข้อความ แผนภูมิ หรือกราฟต่างๆ หลักสำคัญของสถิติเชิงพรรณนาคือเก็บข้อมูลชนิดใดมาได้ก็จะอธิบายได้เฉพาะข้อมูลชนิดนั้นไม่สามารถนำไปใช้อ้างอิงถึงข้อมูลในส่วนอื่นๆ ซึ่งสถิติเชิงพรรณนาประกอบด้วย การแจกแจงความถี่ การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางและการวัดการกระจายของข้อมูล

การแจกแจงความถี่ (Frequency)

การแจกแจงความถี่ เป็นการแสดงค่าความถี่ของข้อมูลที่เก็บมาได้โดยแสดงเป็นจำนวนและร้อยละ

ค่าร้อยละ (Percentage) คือการคำนวณหาสัดส่วนของข้อมูลในแต่ละตัวเทียบกับข้อมูลรวมทั้งหมดโดยให้ข้อมูลทั้งหมดมีค่าเป็นร้อยละตามสมการ 12

$$\text{ร้อยละ (\%)} = \frac{X \times 100}{N} \quad (2)$$

โดยที่ X คือ จำนวนข้อมูล (ความถี่) ที่ต้องการนำมาหาค่าร้อยละ

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางข้อมูล

ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางข้อมูลหรือค่าที่ใช้ชี้บ่งตำแหน่ง (Location) หรือเป็นตัวแทนตำแหน่งของกระบวนการ (ระบบที่สนใจศึกษา) ซึ่งค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในเรื่องของค่าเฉลี่ย

ค่าเฉลี่ย (Mean or Arithmetic Mean)

ค่าเฉลี่ยเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับการคำนวณ ซึ่งค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีข้อมูลไม่มีการจัดหมวดหมู่และกรณีข้อมูลมีการจัดหมวดหมู่

กรณีข้อมูลไม่มีการจัดหมวดหมู่

ค่าเฉลี่ยของประชากร (Population Mean) ถ้ามีข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_N$  รวม  $N$  ตัว

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3)$$

ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง (Sample Mean) ถ้ามีข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_n$  รวม  $n$  ตัว

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

ถ้าข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_k$  มีความถี่หรือปรากฏรวม  $f_1, f_2, \dots, f_k$  ครั้ง ตามลำดับ

ข้อมูลประชากร ถ้ามีข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_N$  รวม  $N$  ตัว

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{\sum_{i=1}^k f} = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{N} \quad (5)$$

ข้อมูลตัวอย่าง ถ้ามีข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_n$  รวม  $n$  ตัว

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{\sum_{i=1}^k f} = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{n} \quad (6)$$

กรณีข้อมูลมีการจัดหมวดหมู่

ข้อมูลประชากร ถ้ามีข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_N$  รวม  $N$  ตัว

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{\sum_{i=1}^k f} = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{N} \quad (7)$$

ข้อมูลตัวอย่าง ถ้ามีข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_n$  รวม  $n$  ตัว

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{\sum_{i=1}^k f} = \frac{\sum_{i=1}^k f x_i}{n} \quad (8)$$

ถ้าข้อมูล  $x_1, x_2, \dots, x_K$  มีความถี่หรือปรากฏรวม  $f_1, f_2, \dots, f_K$  ครั้งตามลำดับ

เมื่อ	$\mu$	คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร
	$\bar{x}$	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง
	N	คือ จำนวนประชากรทั้งหมด
	n	คือ จำนวนหรือขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
	K	คือ จำนวนชั้นของข้อมูล
	$X_l$	คือ ค่ากึ่งกลางของชั้นที่ $l$ เมื่อ $l = 1, 2, 3, \dots, K$
	$f_l$	คือ ความถี่ของชั้นที่ $l$ เมื่อ $l = 1, 2, 3, \dots, K$

### คุณสมบัติของค่าเฉลี่ย

เป็นตัวแทนของข้อมูลที่ใช้ข้อมูลทุกค่ามาทำการคำนวณหาขนาดของค่าเฉลี่ย

เนื่องจากการนำข้อมูลทุกค่ามาทำการคำนวณตามหลักในคณิตศาสตร์จึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์สถิติขั้นสูงได้

เนื่องจากการใช้ข้อมูลทุกค่ามาคำนวณ ดังนั้นหากมีข้อมูลบางตัวที่มีขนาดใหญ่มากๆ หรือเล็กมากๆ ผิดปกติจะมีผลต่อการคำนวณขนาดของค่าเฉลี่ยด้วย

ข้อมูลที่มีมาตรวัดเป็นนามบัญญัติ (Nominal Scale) และเรียงอันดับ (Ordinal Scale) ไม่สามารถใช้คำนวณค่าเฉลี่ยได้

### ค่าการกระจาย

ค่าการกระจายหรือค่าการเปลี่ยนแปลง (Variability) ในระบบ เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นต้น

การใช้ค่าสถิติในแต่ละกลุ่มจำเป็นต้องทราบข้อจำกัดของค่าสถิติแต่ละค่าและวัตถุประสงค์ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อจะได้ทำการวิเคราะห์และสรุปผลได้ถูกต้อง ในส่วนของค่าที่ใช้ชี้บ่งตำแหน่ง (Location) หรือเป็นตัวแทนตำแหน่งของกระบวนการ (ระบบที่สนใจศึกษา) [18]

### ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; S.D.)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ ค่ารากที่สองของผลรวมของความแตกต่างระหว่างข้อมูลดิบกับค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (Sum of Squares ของผลต่าง) หารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด สัญลักษณ์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมี 2 ลักษณะ ดังนี้

$\sigma$  ใช้กับข้อมูลที่เก็บมาจากประชากรทั้งหมด

S ใช้กับข้อมูลที่เก็บมาจากกลุ่มตัวอย่าง

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณหาได้ 2 แบบ คือการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูลดิบที่ไม่อยู่ในรูปของตารางแจกแจงความถี่ และการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูลจัดกลุ่มที่อยู่ในรูปของตารางแจกแจงความถี่

การคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูลดิบที่ไม่อยู่ในรูปของตารางแจกแจงความถี่

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\mu)^2}{N}} \quad (\text{สำหรับข้อมูลที่ได้จากประชากรทั้งหมด}) \quad (9)$$

การคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากข้อมูลจัดกลุ่มที่อยู่ในรูปของตารางแจกแจงความถี่

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{สำหรับข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง}) \quad (10)$$

เมื่อ  $\sigma$  หรือ  $S$  คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$x$  คือ ข้อมูลแต่ละจำนวน

$\mu$  หรือ  $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของข้อมูลในชุดนั้น

$N$  คือ จำนวนข้อมูลจากประชากรทั้งหมด

$n$  คือ จำนวนข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง [37, 39]

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ระบบออกแบบอัตโนมัติ

ระบบออกแบบอัตโนมัติที่ผ่านมาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแก้ปัญหาการเริ่มต้นของการออกแบบ ซึ่งมีเทคนิคมากมายสำหรับการสร้างกระบวนการออกแบบ Vishal and Ning [21] ได้สำรวจเกี่ยวกับเทคนิคการสร้างระบบออกแบบอัตโนมัติที่นิยมใช้ทางด้านสถาปัตยกรรมซึ่งมี 5 เทคนิค ได้แก่ ระบบแอล (L-Systems; LS) เซลลูลาร์ออโตมาตา (Cellular Automata; CA) ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms; GA) ปัญญาารวมหมู่ (Swarm Intelligence; SI) และไวยากรณ์รูปร่าง (Shape Grammars; SG) ซึ่งแต่ละเทคนิคมีวัตถุประสงค์ วิธีการ ผลลัพธ์ ประเภทของปัญหา และข้อดีที่แตกต่างกันมีรายละเอียด ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 แสดงสรุปวัตถุประสงค์ วิธีการ ผลลัพธ์ประเภทของปัญหา และข้อดีในงานวิจัยที่ผ่านมา [21]

หัวข้อ	SG	LS	CA	SI	GA
วัตถุประสงค์	- สำรองการออกแบบ (Design Exploration) : รูปแบบของพื้นที่และองค์ประกอบของภาพ	- สำรองการออกแบบ : รูปแบบ (Patterns)และองค์ประกอบของภาพ	- พื้นฐานการออกแบบกริด(Grid-Based Design) เช่นการทำแผนผังหรือการแบ่งโซน  - การพัฒนาการออกแบบซึ่งไวต่อสิ่งกระตุ้น	- ออกแบบของการใช้งาน เช่น การค้นหาเส้นทาง  - ประเมินและวิเคราะห์ของการออกแบบ	- เพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization)  - เพิ่มประสิทธิภาพหรือพัฒนาการออกแบบ
ผลลัพธ์	- อีเมลเงินท์และการสำรวจรูปทรงเรขาคณิต  - วิธีการแก้ปัญหา มักจะต้องการตรวจสอบ	- อีเมลเงินท์และสำรวจรูปทรงอินทรีย์และการทำซ้ำ  - วิธีการแก้ปัญหา มักจะต้องการตรวจสอบ	- อีเมลเงินท์และกฎเกณฑ์ ไวต่อสิ่งกระตุ้น  - มักจะใช้แก้ปัญหาความพึงพอใจ	- อีเมลเงินท์และกฎเกณฑ์	- การเพิ่มประสิทธิภาพ มักจะใช้แก้ปัญหาความพึงพอใจ  - ทางเลือกในการออกแบบหลากหลาย

ตาราง 7 (ต่อ)

หัวข้อ	SG	LS	CA	SI	GA
วิธีการ	- มีรูปร่างอีเมอเจนท์ และรูปแบบ (Patterns) - เหมาะสมกับรูปทรงเรขาคณิต	- มีการทำซ้ำรูปแบบ อีเมอเจนท์ รูปแบบ (Patterns) แฟร็กทัล (Fractals) และรูปทรงอินทรีย์ธรรมชาติ	- ศึกษาผลกระทบของ พื้นที่ใกล้เคียง รูปแบบการเจริญเติบโต (Growth Patterns)	- มีผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง - ศึกษาปรากฏการณ์ของ สังคม เช่น การสร้างสรรค์ การค้นหาเส้นทาง	- มีการจัดรวม (Combinatorial) และการ ออกแบบตามลักษณะทาง สันฐานวิทยา
รูปแบบ	- มีการทำงานตาม รูปแบบ	- มีการทำงานตาม รูปแบบ	ปรากฏการณ์ทาง สังคม (Social Phenomenon)	- มีการวิเคราะห์ฟังก์ชันการทำงาน	- นวัตกรรมที่มีผลกระทบ รุนแรง (Disruptive Innovation)
ปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานตามวิธีการ		- มีการทำซ้ำและการปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานตามวิธีการ	- มีการทำงานตาม รูปแบบ		

ตาราง 7 (ต่อ)

หัวข้อ	SG	LS	CA	SI	GA
ประเภท ของ ปัญหา	- เหมาะกับการ ออกแบบสไลด์ทาง สถาปัตยกรรม วัตถุ และรูปแบบที่ชัดเจน - เหมาะกับการ ควบคุมและออกแบบ ตามกฎหมาย - ส่วนใหญ่เป็น รูปแบบสองมิติแต่ยัง มีตัวอย่างเป็นสามมิติ	- เหมาะกับการ ออกแบบถนนและ โครงข่าย ภูมิประเทศและเนื้อ สัมผัส - เหมาะกับการ ออกแบบรูปทรงที่ พัฒนาขึ้นตาม ธรรมชาติ และมักจะ เป็นอินทรีย์ - ส่วนใหญ่เป็น รูปแบบสองมิติ	- เหมาะกับการ ออกแบบบล็อกและ มวลแผนที่หรือโซน และออกแบบชุมชน เมือง - ส่วนใหญ่เป็น รูปแบบสองมิติ แต่ ยังมีตัวอย่างของ การอัดขึ้นรูป (Extrusion) สำหรับ สามมิติ	- เหมาะกับการออกแบบ ทางเดิน พื้นที่สาธารณะ พื้นที่ลือบบี้และการไหล ของการจราจร - มีใช้น้อยสำหรับการ ออกแบบทางเรขาคณิต	- เหมาะกับการออกแบบ ตามส่วนประกอบ - เหมาะกับปัญหาของ การเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Problems)

ตาราง 7 (ต่อ)

หัวข้อ	SG	LS	CA	SI	GA
ข้อดี	- เหมาะกับรูปทรง เรขาคณิต (ตามที่ กำหนดการมองเห็น)	- เหมาะกับสัญลักษณ์	- วัตถุประสงค์กระตุ้นและ มีผลกระทบบกกับพื้นที่ ใกล้เคียง - มีข้อจำกัดในการ สร้าง	- มีองค์ความรู้ในการสร้าง แบบจำลอง และพฤติกรรม ทางสังคม	- มีการประเมินและ ปรับปรุงผลการ ออกแบบสม่ำเสมอ - มีการแก้ปัญหาได้ หลากหลาย (Multiple Solutions) - มีการเพิ่ม ประสิทธิภาพ - นวัตกรรมที่มี ผลกระทบรุนแรง

จากตาราง 7 พบว่า ได้มีการนำเทคนิคของวิธีการออกแบบอัตโนมัติมาใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งแต่ละเทคนิคมีวัตถุประสงค์ คือ ความเหมาะสมในการใช้งาน และข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น จึงได้เลือกศึกษาบางเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเพิ่มขึ้นดังต่อไปนี้

เทคนิคไวยากรณ์รูปร่าง (Shape Grammars; SG)

ในปัจจุบัน วิธีการไวยากรณ์รูปร่างได้รับการยอมรับ และเผยแพร่อย่างกว้างขวางในหลายสาขาของการออกแบบ เช่น การออกแบบทางสถาปัตยกรรม (Architecture Design) การออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design) และการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design) เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปลักษณะของงาน และสาขาของงานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 แสดงสรุปลักษณะของงานและสาขาของงานวิจัยที่ผ่านมา

ชื่อผู้แต่ง	ลักษณะของงาน	สาขา			
		ภาพวาด (Paintings)	การออกแบบทางสถาปัตยกรรม (Architectural Designs)	การออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Designs)	การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Designs)
George and James [26]	จิตรกรรมและประติมากรรม (Painting and Sculpture)	/			
Manish and Jonathan [5]	เครื่องชงกาแฟ (Coffee Makers)				/
George and William J. [39]	วางแผนบ้านของสไตส์พาล เลเดียน (Palladio's Villas Plans)		/		

ตาราง 8 (ต่อ)

ชื่อผู้แต่ง	ลักษณะของงาน	สาขา			
		ภาพวาด (Paintings)	การออกแบบสถาปัตยกรรม (Architectural Designs)	การออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Designs)	การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Designs)
Hank and Julie [40]	บ้านสไตล์แพรรี่ (Prairie Style Houses)				
Kristina and Jonathan [41]	การออกแบบโครงสร้าง (Structures Designs)			/	
Manish, Jonathan and George [42]	ไวยากรณ์ไมโครเทคโนโลยี (MEMS Grammar)			/	
Michael J. and Jonathan [6]	รถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์ เดวิดสัน (Harley-Davidson Motorcycles)				/
Jay P. and Jonathan [43]	ฝากระโปรงหน้าภายใน (Inner Hood Panels)				/
HauHing, et al.[7]	ขวดโคคาโคล่า และขวดแฮนด์โซฟต์ดริ๊งค์ (Coca-Cola and Head & Shoulder Bottle)				/
José Pinto [44]	ขนาดของบ้านที่ Malagueira (Siza's Houses at Malagueira)		/		
Cui and Tang [9]	ลายปักผ้าเข็ชาติยูนนาน (The Yunnan Embroidery Pattern)				/

ซึ่งงานวิจัยเหล่านั้น ได้นำเสนอวิธีไวยากรณ์รูปร่างสำหรับประยุกต์ใช้ในกระบวนการออกแบบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เครื่องชงกาแฟ [5] รถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์เดวิดสัน [6] ขวดโคคาโคล่า และขวดแชมพูเฮดแอนด์โชว์เดอร์ [7] และลายปักผ้าเพื่อชาติยูนิานาน [9]

วิธีไวยากรณ์รูปร่างถูกนำเสนอในกระบวนการออกแบบที่แตกต่างกัน ในลักษณะของการตีความหมาย การอธิบาย และการวิเคราะห์ เพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกแบบ

จากการศึกษาวิจัยบางส่วนเกี่ยวข้องกับวิธีไวยากรณ์รูปร่างที่ผ่านมา พบว่าแต่ละงานวิจัย มีการนำเสนอกฎรูปร่างสำหรับการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งการนำเสนอได้ 3 กลุ่ม คือ ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Components of Product) การแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ (Partitioning of Product) และหน้าตัดของผลิตภัณฑ์ (Cross Section of Product)

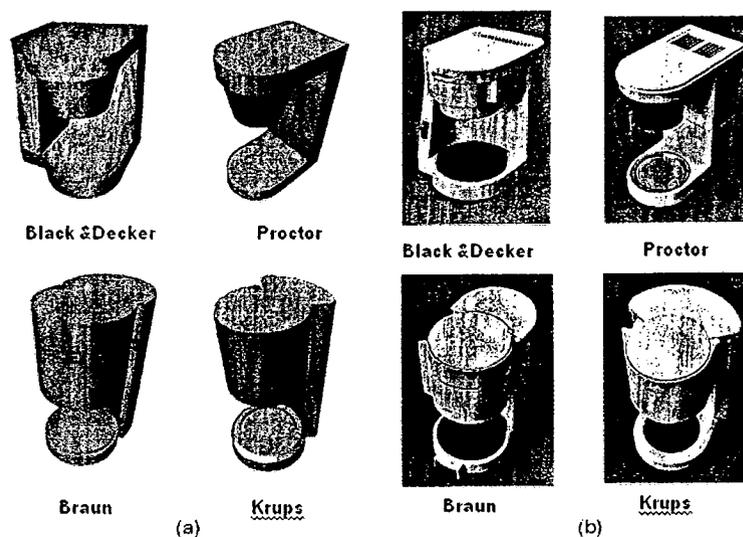
### กลุ่มที่ 1 ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Components of Product)

ในงานวิจัยของ Manish and Jonathan [5] มุ่งเน้นการนำเสนอวิธีการไวยากรณ์รูปร่างสำหรับการออกแบบเครื่องชงกาแฟ เพื่อสนับสนุนการออกแบบแนวความคิด (Conceptual Design) สำหรับเครื่องชงกาแฟ ซึ่งช่วยให้นักออกแบบสำรวจ (Explore) ตัวเลือกของรูปร่างที่มีความแตกต่าง ผ่านการแก้ไข และเปลี่ยนแปลงของกฎหรือค่าพารามิเตอร์ และช่วยสำหรับสร้างแนวความคิดของการออกแบบอย่างรวดเร็ว และเพิ่มความสามารถในการออกแบบของต้นแบบ

โดยทำการศึกษาเครื่องชงกาแฟของหลายผู้ผลิต ซึ่งสามารถแบ่งการอธิบายสำหรับการประยุกต์ใช้ไวยากรณ์รูปร่างได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของฟังก์ชันการทำงาน (Function) และส่วนของลักษณะทางกายภาพภายนอกของรูปทรง (Form Topology) โดยที่พารามิเตอร์ของวิธีการไวยากรณ์รูปร่างถูกนำเสนอในรูปแบบสองมิติ ผ่าน 3 มุมมอง คือ มุมมองด้านบน (Top) ด้านข้าง (Side) และด้านหน้า (Front) สำหรับสร้างรูปทรงแบบสามมิติ และสามารถแบ่งส่วนประกอบของเครื่องชงกาแฟในการพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ยูนิตของตัวกรอง (Filter) ยูนิตที่เก็บกักน้ำ และยูนิตของฐาน และกำหนดเขตขอบเขตกฎรูปร่าง เพื่อสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องชงกาแฟ โดยสามารถกำหนดเขตขอบเขตของกฎออกเป็น 5 เขต คือ 1) เขตขอบเขตของกฎรูปร่างเริ่มต้น 2) เขตขอบเขตของกฎสำหรับออกแบบตัวกรอง 3) เขตขอบเขตของกฎสำหรับออกแบบฐาน 4) เขตของกฎสำหรับออกแบบหน้าตัดหน่วยของตัวกักเก็บน้ำ และ 5) เขตขอบเขตของกฎทั้งหมด (Completion Rules)

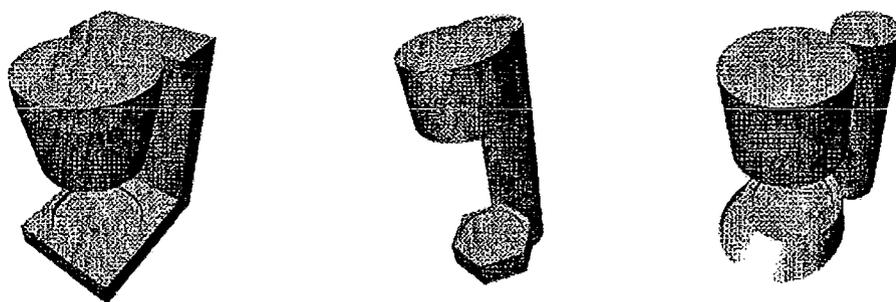
เริ่มต้นโดยการสร้างหน้าตัดสำหรับกำหนดขอบเขตพื้นที่หม้อกาแฟ และส่วนของฐาน โดยประยุกต์ใช้จากเขตขอบเขตของกฎรูปร่างเริ่มต้น การออกแบบตัวกรองโดยประยุกต์ใช้จากเขตขอบเขตของกฎตัวกรองการออกแบบหน่วยฐานโดยประยุกต์ใช้จากเขตขอบเขตของ

กฎการออกแบบฐาน การออกแบบหน่วยตัวกักน้ำโดยประยุกต์ใช้จากเซตของกฎสำหรับออกแบบหน้าตัดหน่วยของตัวกักเก็บน้ำ โดยในส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วน จะถูกสร้างพื้นผิวแบบเรียบโดยใช้วิธีการแบบกวาดซึ่งประยุกต์ใช้จากเซตของกฎทั้งหมด (Completion Rules) โดยที่จำเป็นต้องประยุกต์ใช้ไวยากรณ์รูปร่างตามลำดับของการออกแบบ เพราะพารามิเตอร์ของการออกแบบมีความสอดคล้องกัน จากการประยุกต์ใช้วิธีการไวยากรณ์รูปร่าง พบว่ารูปทรงของเครื่องชงกาแฟที่ถูกสร้างขึ้นโดยไวยากรณ์รูปร่างของเครื่องชงกาแฟ ดังแสดงในภาพ 18a มีความคล้ายคลึงกับรูปทรงของเครื่องชงกาแฟของผู้ผลิตต่างๆ ดังแสดงในภาพ 18b



ภาพ 18 แสดงรูปทรงของเครื่องชงกาแฟที่ถูกสร้างขึ้นใหม่และเครื่องชงกาแฟของผู้ผลิต [5]

หมายเหตุ: (a) รูปทรงเครื่องชงกาแฟโดยการประยุกต์ใช้วิธีการไวยากรณ์รูปร่าง  
(b) รูปทรงเครื่องชงกาแฟของผู้ผลิตต่างๆ



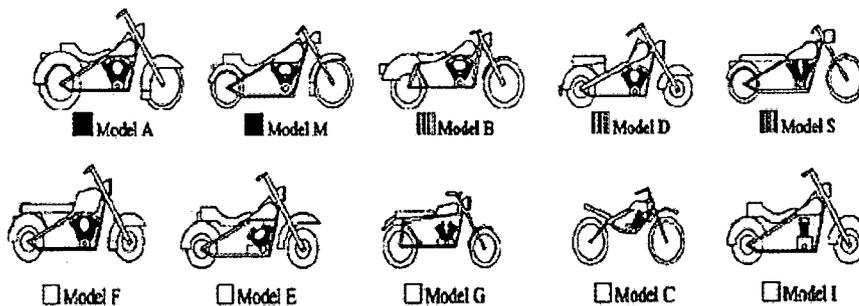
ภาพ 19 แสดงรูปทรงเครื่องชงกาแฟนวัตกรรมใหม่จากวิธีไวทยากรณ์รูปร่าง [5]

ซึ่งจะเห็นได้ว่า Manish and Jonathan มีกำหนดการเปลี่ยนแปลงของกฎรูปร่างและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยในไวทยากรณ์ที่ได้สร้างขึ้นซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในภาพ 18 จะให้ความแตกต่างของรูปทรงเครื่องชงกาแฟที่สร้างด้วยไวทยากรณ์รูปร่างกับเครื่องชงกาแฟของผู้ผลิตต่างๆ และสามารถสร้างรูปทรงเครื่องชงกาแฟแบบใหม่ได้ ดังแสดงในภาพ 19

ในงานวิจัยของ Michael J. and Jonathan [6] นำเสนอวิธีไวทยากรณ์รูปร่างของรถจักรยานยนต์สำหรับแบรนด์ฮาร์เลย์เดวิดสัน (Harley-Davidson Motorcycles) ซึ่งมุ่งเน้นให้คงลักษณะของแบรนด์ไว้และรูปร่างที่ถูกกระตุ้นในการใช้วิธีการไวทยากรณ์รูปร่างผ่านกระบวนการผลิต โดยอธิบายไวทยากรณ์รูปร่างในรูปแบบสองมิติ ซึ่งสร้างไวทยากรณ์รูปร่างที่พัฒนาจากรถจักรยานยนต์ทั่วไป โดยสามารถแบ่งประเภทของส่วนประกอบต่างๆ ได้ทั้งหมด 14 ส่วน ได้แก่ 1) ระยะเวลาล้อ 2) ขนาดล้อ 3) ขนาดยางและความหนา 4) รูปร่างกันชนขนาดและการวางแนว 5) ชนิดเฟรม (แข็งหรือนุ่ม) 6) ขนาดของเพลาคือเหวี่ยงรูปร่างและตำแหน่ง 7) จำนวนกระบอกสูบและการวางแนว 8) รูปร่างและขนาดของกรองอากาศ 9) ขนาดรูปร่างและตำแหน่งของถังน้ำมันเชื้อเพลิง 10) ฝาครอบน้ำมันเชื้อเพลิงและแผงหน้าปัด 11) ที่นั่ง 12) มือจับ 13) ไฟหน้าและ 14) ไฟท้าย จากการศึกษาเอกลักษณ์ของแบรนด์ฮาร์เลย์เดวิดสัน สามารถบ่งบอกเอกลักษณ์ของรถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์เดวิดสันได้ ดังนี้ เครื่องยนต์วีทวิน (V-Twin) ต้องมีองศาเท่ากับ 45 องศา ถังน้ำมันเชื้อเพลิงต้องมีรูปร่างเป็นหยดน้ำ เฟรมรถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์เดวิดสันจะเป็นรูปสามเหลี่ยม และโดยรวมรถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์เดวิดสันจะต่ำ จากนั้นทำการกำหนดเขตขอบเขตของกฎรูปร่าง สำหรับอธิบายในกระบวนการออกแบบของแต่ละส่วนประกอบของรถจักรยานยนต์

ทั่วไป และกำหนดเงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อบ่งบอกถึงความเป็นเอกลักษณ์ของแบรนด์ ฮาร์เลย์เดวิดสัน

เริ่มต้นในการประยุกต์ใช้เซตขอบเขตของกฎรูปร่างตามลำดับสำหรับสร้างส่วนประกอบต่างของรถจักรยานยนต์โดยเริ่มจากรูปร่างเริ่มต้นเป็นการเริ่มทำงานบนพื้นที่ว่างเปล่า และกำหนดแกนเริ่มต้นของการทำงาน โดยนักออกแบบจะกำหนดระยะห่างฐานล้อ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อวงนอกและล้อวงในของทั้งล้อหน้าและล้อหลัง ทำการสร้างเหล็กง่ามด้านหน้าโดยนักออกแบบกำหนดมุมคานและตำแหน่งของมือจับ สร้างเฟรมของรถโดยให้นักออกแบบเลือกกฎจากเซตขอบเขตของการสร้างเฟรม และสร้างคุณลักษณะของเฟรมจากเซตขอบเขตของกฎรูปร่างจาก 2 เซต เซตขอบเขตของกฎรูปร่างของลักษณะแข็ง และเซตขอบเขตของกฎรูปร่างของลักษณะอ่อน สร้างโพรไฟล์เครื่องยนต์ โดยนักออกแบบกำหนดขนาดของเพลลา ขนาดถัง ความสูงความกว้างของที่อยู่ของเครื่องยนต์และกระบอก และสร้างกรองอากาศในชั้นตอนสุดท้าย จากการประยุกต์ใช้วิธีการไวยากรณ์รูปร่าง พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างรูปร่างรถจักรยานยนต์ด้วยวิธีไวยากรณ์รูปร่าง สามารถนำมาสร้างโมเดล A ถึง I ได้ดังแสดงในภาพ 20



ภาพ 20 แสดงโมเดล 10 โมเดลที่ถูกสร้างด้วยกฎไวยากรณ์รูปร่างของรถจักรยานยนต์ [6]

ซึ่งเห็นได้ว่างานวิจัยของ Michael J. and Jonathan สามารถพัฒนาไวยากรณ์จากไวยากรณ์ของรถจักรยานยนต์ทั่วไป โดยการเพิ่มเงื่อนไขต่างๆ และขอบเขตของค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการสร้างรถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์เดวิดสันได้และให้รูปร่างของรถจักรยานยนต์ฮาร์เลย์เดวิดสันที่มีความหลากหลายแต่ยังสามารถคงลักษณะและความรู้สึกของการเป็นฮาร์เลย์เดวิดสันเอาไว้ได้

งานวิจัยของ Cui and Tang [9] ได้นำเสนอการพัฒนาไวยากรณ์รูปร่างในการประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบลายปักผ้าเชื้อชาติยูนิทอน เพื่อให้เกิดแนวความคิดในการออกแบบเริ่มต้นและขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาใหม่ เพื่อให้รองรับกับพื้นที่ปัญหาขนาดใหญ่ โดยใช้โมเดลการประเมินความสวยงามใหม่ และขั้นตอนวิธีในการพัฒนาการสำรวจการออกแบบสำหรับนักออกแบบเพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาลayoutแบบที่ชื่นชอบบนพื้นฐานการประเมินผลอัตนัย (Subjective Assessments)

เริ่มต้นทำการสำรวจการออกแบบลายปักผ้าเชื้อชาติยูนิทอน โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของรูปแบบลายปักผ้ายูนิทอน ซึ่งได้แบ่งลายปักผ้าออกเป็นส่วนของกลีบดอกและส่วนของลำต้น โดยใช้ไวยากรณ์รูปร่าง 2 ระดับ ได้แก่ ระดับหยาบ (Coarse Level) และระดับละเอียด (Refined Level) โดยระดับหยาบจะพิจารณาเกี่ยวกับ ความสมมาตร ความสัมพันธ์ของความสมดุล จำนวนของกลีบดอก และการหมุนของกลีบดอก ซึ่งใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบางในการสร้างลำต้นและใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบอ้วนในการสร้างกลีบดอก ระดับละเอียดจะพิจารณาเกี่ยวกับ รูปร่างกลีบดอก (ใช้รูปสี่เหลี่ยม) และสี จากการแบ่งระดับพวกเขาสามารถกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตาราง 9 และตาราง 10 และกำหนดเขตขอบเขตของกฎรูปร่างได้ 3 เขต ได้แก่ กฎพื้นฐาน ดังแสดงในภาพ 21 เป็นกฎสำหรับสร้างตัวแทนของลำต้นด้วยรูปสี่เหลี่ยมแบบผอม ดังแสดงในภาพ 21a และสร้างตัวแทนของกลีบดอกด้วยสี่เหลี่ยมแบบอ้วน ดังแสดงในภาพ 21b ซึ่งมีเครื่องหมายจุด (•) เป็นการบ่งบอกการจัดการและความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างตัวแทนของลำต้นกับตัวแทนของกลีบดอก กฎการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพ 22 เป็นกฎสำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลีบดอกตามเงื่อนไขของแต่ละกฎ และกฎสิ้นสุด ดังแสดงในภาพ 23 เป็นกฎสำหรับสร้างรูปร่างของลำต้นลงในสี่เหลี่ยมผอม ดังแสดงในภาพ 23a และกฎสำหรับสร้างรูปร่างของกลีบดอกลงในสี่เหลี่ยมอ้วน ดังแสดงในภาพ 23b

#### ตาราง 9 แสดงตัวแปรในระดับหยาบ [9]

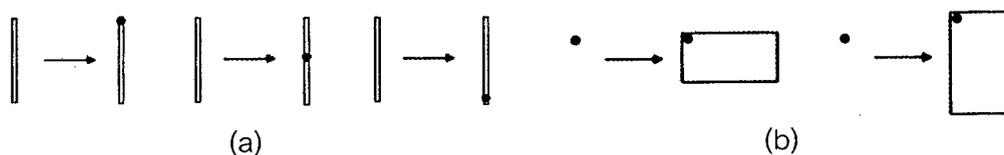
ลักษณะ	ค่าพารามิเตอร์
ประเภท	แบบเดี่ยว (Single), แบบคู่ (Double), แบบหลาย (Multi)
สมมาตร	ไม่มี (None), ครึ่ง (Half), สี่ส่วนเท่ากัน (Quadruple), หมุน (Rotation)
จำนวนของชิ้นส่วน	1, 2, 3, 4

## ตาราง 9 (ต่อ)

ลักษณะ	ค่าพารามิเตอร์
ความสัมพันธ์	เคร่งครัด (Strictly), ไม่เคร่งครัด (Loosely), สุ่ม (Random)
การแบ่ง	สัดส่วนระหว่างทุกความยาวของ 2 ส่วน

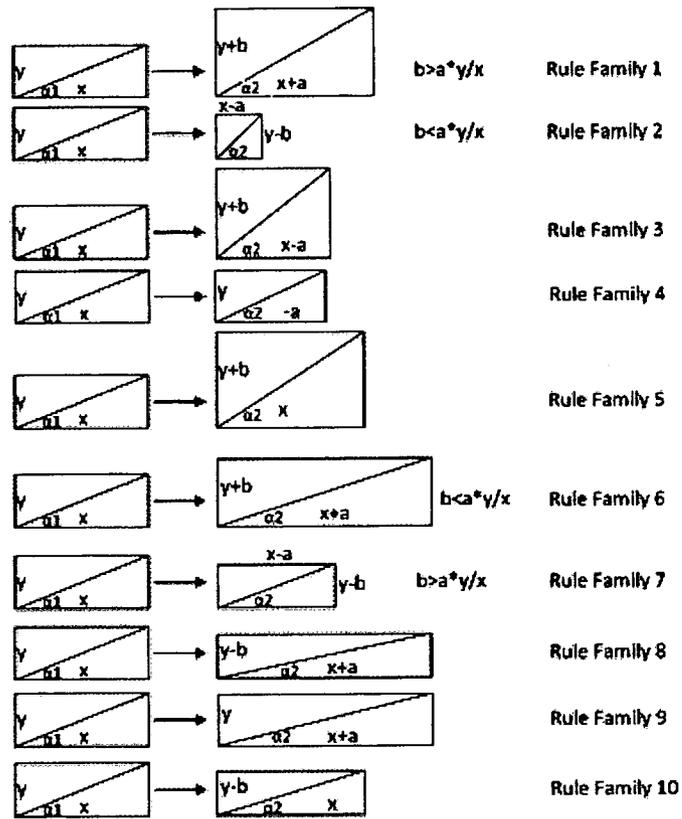
## ตาราง 10 แสดงตัวแปรในระดับละเอียด [9]

ลักษณะ	ค่าพารามิเตอร์
จำนวนกลีบดอก	1, 2, 3, 4, 5, 6
รูปร่างกลีบดอก	ฐานข้อมูลกลีบดอก
สีกลีบดอก	ฟังก์ชันสี
การวางแนวกลีบดอก	บน (Up), กลาง (Mid), ล่าง (Down)
ประเภทลำต้น	ไม่มี (None), เส้นตรง (Straight), เส้นโค้งเบา (Lightly Curve), เส้นโค้งปานกลาง (Moderate Curve), เส้นโค้งสวยงาม (Exquisite Curve)
สีลำต้น	ฟังก์ชันสี

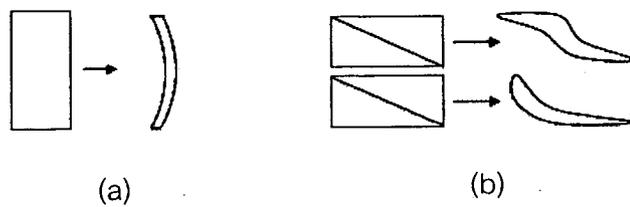


ภาพ 21 แสดงกฎพื้นฐานของการสร้างลายปักผ้า [9]

หมายเหตุ: (a) กฎสำหรับสร้างตัวแทนของลำต้น  
 (b) กฎสำหรับสร้างตัวแทนของกลีบดอก



ภาพ 22 แสดงกฎการเปลี่ยนแปลงของการสร้างลายปักผ้า [9]

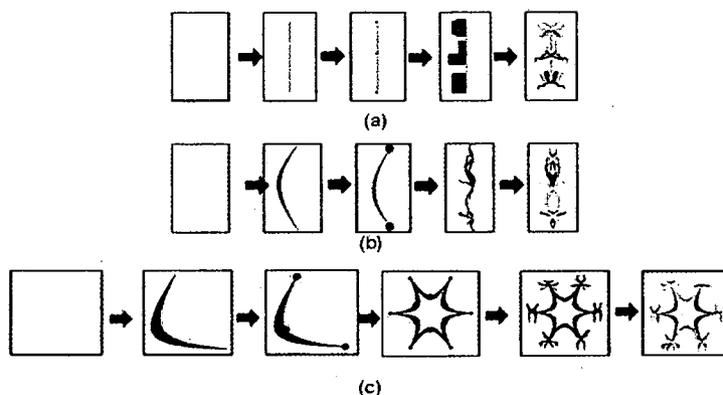


ภาพ 23 แสดงกฎสิ้นสุดของการสร้างลายปักผ้า [9]

หมายเหตุ: (a) กฎสำหรับรูปร่างของลำต้น

(b) กฎสำหรับรูปร่างของกลีบดอก

เริ่มต้นโดยผู้ใช้งานจะต้องกำหนดเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งตัวแทนของลำต้นจะถูกสร้างขึ้นในพื้นที่ว่างด้วยรูปสี่เหลี่ยมแบบบางและถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ ด้วยเครื่องหมายจุด (•) ตามที่นักออกแบบกำหนด และตัวแทนของกลีบดอกจะถูกสร้างด้วยรูปสี่เหลี่ยมแบบอ้วนในตำแหน่งของเครื่องหมายจุด (•) โดยจำนวนของการสร้างกลีบดอกจะขึ้นอยู่กับค่าที่นักออกแบบกำหนด ซึ่งรูปสี่เหลี่ยมแบบบางและอ้วน ถูกประยุกต์ใช้เขตขอบเขตของกฎพื้นฐาน จากนั้นรูปสี่เหลี่ยมแบบอ้วน จะถูกประยุกต์ใช้เขตขอบเขตของกฎการเปลี่ยนแปลงและในการสร้างกลีบดอกระบบมีให้เลือก 2 แนวทาง ได้แก่ แนวทาง 1 สุ่มเลือกจากฐานข้อมูลที่มีอยู่และแนวทางที่ 2 กำหนดโดยนักออกแบบในการกำหนดทิศทางของกลีบดอก และทำการเซฟ (Save) ไว้เป็นฐานข้อมูล หลังจากนั้นกลีบดอกที่ได้จะถูกประยุกต์โดยใช้เขตขอบเขตของกฎสิ้นสุด ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้วิธีการไวยากรณ์ของการออกแบบลายปักผ้าเชื้อชาติยูนิทอน สามารถอธิบายกระบวนการออกแบบของลายปักผ้าเชื้อชาติยูนิทอนในลักษณะลำต้นเดี่ยว ลำต้นคู่ และหลายลำต้น ดังแสดงในภาพ 24a, 24b และ 24c ตามลำดับ และการสร้างลายปักผ้าเชื้อชาติยูนิทอนใหม่และหลากหลาย ดังแสดงในภาพ 25

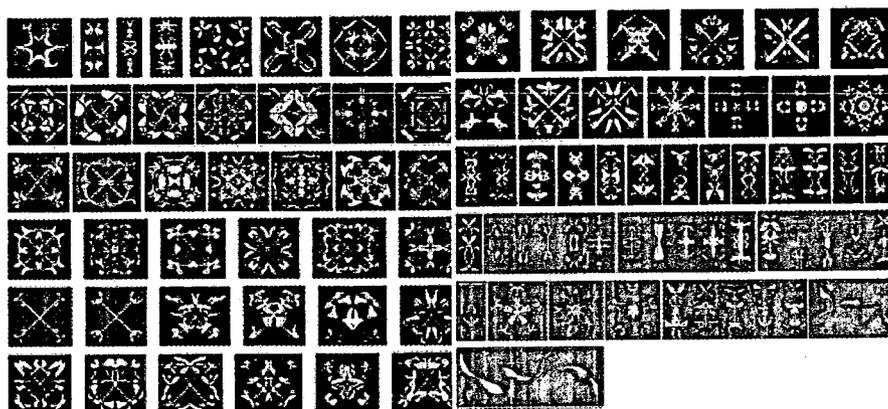


ภาพ 24 แสดงภาษาของการออกแบบในแต่ละลักษณะสร้างลำต้นที่แตกต่างกันของลายปักผ้า [9]

หมายเหตุ: (a) ลำต้นเดี่ยว

(b) ลำต้นคู่

(c) ลำต้นหลายลำต้น



ภาพ 25 แสดงลายปักผ้าเชื้อชาติญานานใหม่จากไวยากรณ์รูปร่าง [9]

## กลุ่มที่ 2 การแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ (Partitioning of Product)

ในงานวิจัยของ HauHing, et al. [7] ได้นำเสนอการคำนวณรูปร่าง และวิธีการไวยากรณ์รูปร่าง เพื่อสนับสนุนให้มีความสอดคล้องตามสไตล์ มุ่งเน้นแก้ไขปัญหารูปร่างพีชคณิต (Algebras) เพื่อการลดเงื่อนไขของการดำเนินการรูปร่างโดยการประยุกต์ใช้การคำนวณรูปร่างโดยเฉพาะพีชคณิต  $U_{13}$  ซึ่งใช้ไวยากรณ์ขวดโคคาโคล่า และไวยากรณ์ขวดเฮตแอนด์โซว์เดอริซ์เพื่อทดสอบในการดำเนินการ

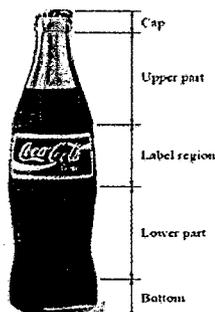
เริ่มต้นโดยทำการศึกษาไวยากรณ์สำหรับขวดโคลา-โคล่า ซึ่งศึกษาการวิวัฒนาการของขวดโคคาโคล่าที่ผ่านมา 6 ประเภท ดังแสดงในภาพ 26 จากนั้นแยกส่วนของขวดโคคา-โคล่า สำหรับใช้ในการพิจารณาออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนฝา (Cap) ส่วนบน (Upper Part) ส่วนกลาง (Label Region) ส่วนล่าง (Lower Part) และส่วนก้นขวด (Bottom) ดังแสดงในภาพ 27 จะเห็นว่าไวยากรณ์ขวดโคคาโคล่าได้รับการออกแบบเพื่อจับภาพคุณลักษณะทั่วไปและกำหนดเขตขอบเขตของกฎเพื่อสร้างตามการแยกส่วนของขวดโคคาโคล่า ซึ่งจะอธิบายโดยวิธีการไวยากรณ์รูปร่างในไวยากรณ์ประกอบองค์ประกอบพื้นฐานเส้นตรงและเส้นโค้งสองมิติ ด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ในการคำนวณของไวยากรณ์ดำเนินการโดยใช้  $U_{13}$  ดำเนินการตามไวยากรณ์รูปร่าง ในแต่ละขั้นตอนของการคำนวณรูปร่างด้วยกฎประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 เลือกรูปร่างเริ่มต้น หรือดำเนินการจากรูปร่างการทำงานที่มีอยู่ ขั้นตอนที่ 2 เลือกกฎรูปร่างซึ่งจะปรากฏที่ด้านล่างของหน้าจอ ขั้นตอนที่ 3 เลือกสามพิกัดจากแต่ละรูปร่างด้านซ้ายมือ และการทำงานรูปร่างซึ่งจะกำหนดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของด้านซ้ายมือของ

กฎรูปร่างเป็นรูปร่างย่อย (Sub-Shape) ของรูปร่างปัจจุบัน ถ้าความสัมพันธ์ของรูปร่างเป็นที่น่าพอใจ ขั้นตอนที่ 5 การดำเนินการขั้นตอนของการคำนวณรูปร่างขวดโคคาโคล่าที่มีอยู่และสามารถอธิบายกระบวนการออกแบบของไวยากรณ์รูปร่าง ดังแสดงในภาพ 28

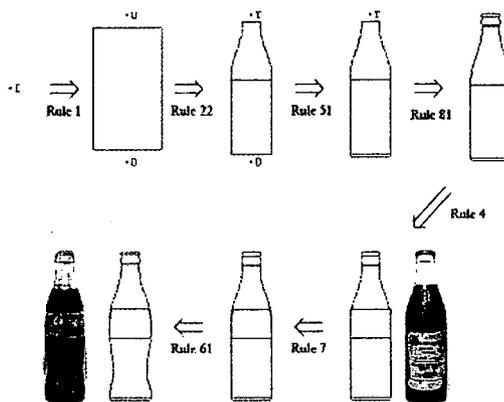
ในภาพ 29 แต่ละกฎการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถูกกำหนดเพื่อเปลี่ยนแปลงเฉพาะส่วนของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น กฎที่ 51 และ 52 สำหรับการสร้างส่วนของกันขวด และกฎที่ 81 และกฎที่ 82 สำหรับการสร้างส่วนของฝา เป็นต้น และพบว่าผลลัพธ์ที่ได้การประยุกต์ใช้ไวยากรณ์รูปร่างสามารถสร้างรูปร่างขวดโคคาโคล่าใหม่ได้ ดังแสดงในภาพ 30



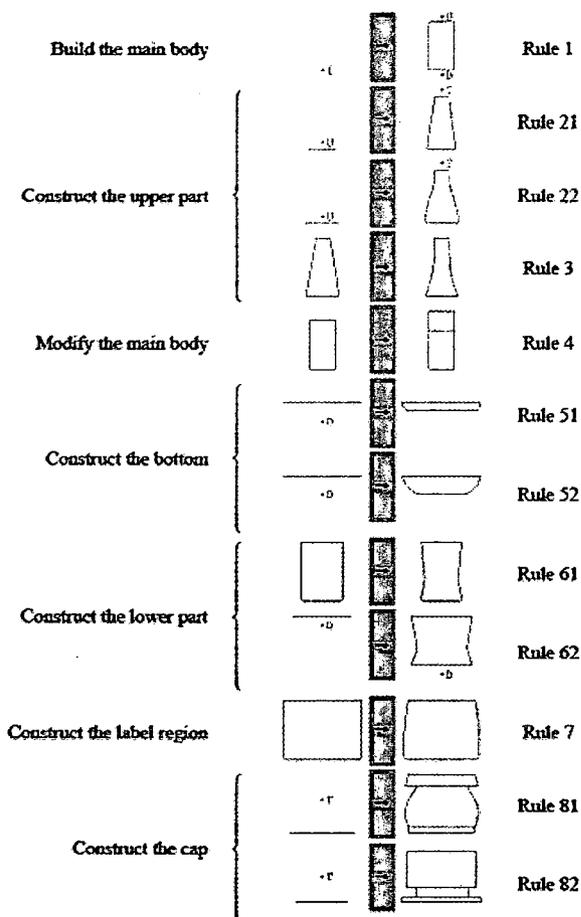
ภาพ 26 แสดงวิวัฒนาการของขวดโคคาโคล่า [7]



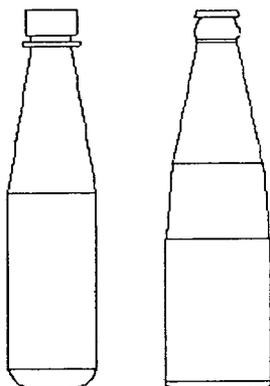
ภาพ 27 แสดงการแบ่งส่วนของขวดโคคาโคล่า [7]



ภาพ 28 แสดงการคำนวณรูปร่างสำหรับสองขวดโคคาโคล่าที่มีอยู่ [7]

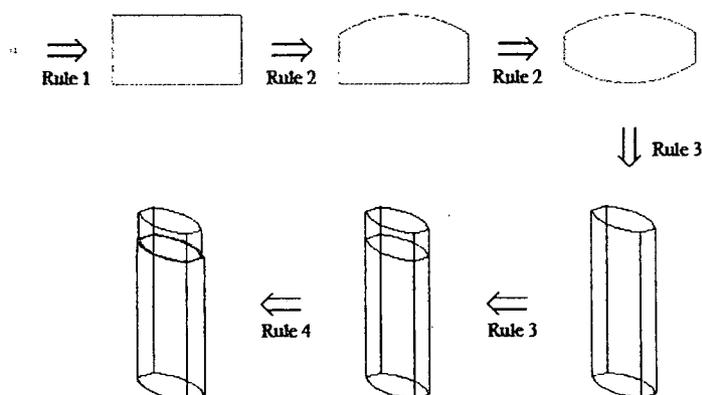


ภาพ 29 แสดงกฎรูปร่างของไวยากรณ์ขวดโคคาโคล่า [7]



ภาพ 30 แสดงไวยากรณ์รูปร่างสร้างขวดโคคาโคล่าใหม่ [7]

และศึกษาขวดแชมพูเฮนดริกซ์ไอซ์เดอริ์ซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตโดยมีขนาด 200, 400 และ 500 มิลลิลิตร ที่มีรูปทรงที่เหมือนกันยกเว้นพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันสำหรับความสามารถที่แตกต่างกัน ไวยากรณ์รูปร่างสำหรับขวดแชมพูเฮนดริกซ์ไอซ์เดอริ์ออกแบบบนพื้นฐานของการสังเกตที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งการคำนวณรูปร่างของไวยากรณ์ต้องทำงานบนรูปร่างสามมิติด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการคำนวณของขวด 500 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพ 31 เป็นกระบวนการประยุกต์ใช้กฎในแต่ละส่วนของขวดแชมพูเฮนดริกซ์ไอซ์เดอริ์



ภาพ 31 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการคำนวณของขวดแชมพู 500 มิลลิลิตร [7]

จะเห็นได้ว่างานวิจัยดังกล่าว สามารถสร้างประยุกต์การคำนวณของรูปร่างโดยเฉพาะพีชคณิต  $U_{13}$  และวิธีไวยากรณ์รูปร่างของขวดโคคาโคล่าและขวดเฮดแอนด์โซ้เดอร์สามารถสร้างรูปทรงใหม่ได้

### กลุ่มที่ 3 หน้าตัดของผลิตภัณฑ์ (Cross Section of Product)

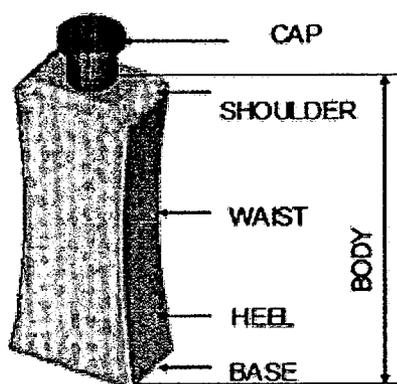
งานวิจัยของ Xiaojuan, et al. [8] นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการไวยากรณ์รูปร่างสำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์ เน้นปัญหาการออกแบบการสร้างการออกแบบที่มีอยู่และการออกแบบใหม่ในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งกฎของไวยากรณ์สามารถครอบคลุมการออกแบบผลิตภัณฑ์จากแบนด์ที่แตกต่างกัน

เริ่มต้นโดยทำการศึกษาขวด 18 ขวด โดยทำการคัดเลือกจากความหลากหลายของแบนด์ในท้องตลาด ซึ่งมีความโดดเด่นและความคล้ายคลึงกันในแต่ละแบนด์ ดังแสดงในภาพ 32 ขวด Elvive ทั้ง 2 ขวด มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปไข่เรียวยาวให้ความอ่อนนุ่ม ขวด Gliss Ku ทั้ง 2 ขวด ประกอบด้วยเส้นขอบที่มีความคมชัดและขวด L'Oreal Kits มีรูปทรงขวดแบบไม่สมมาตร



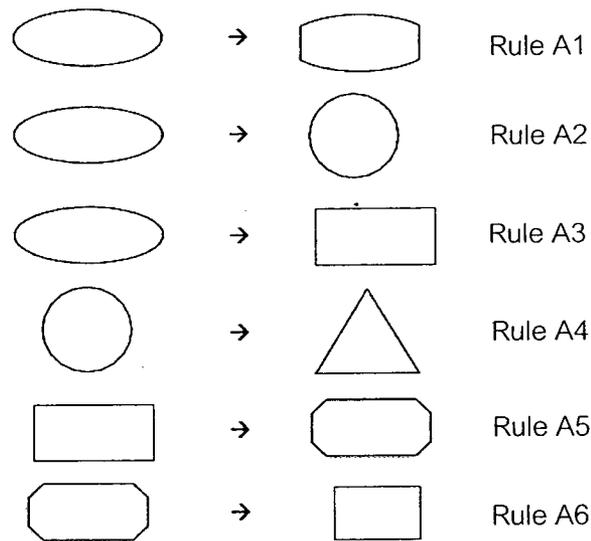
ภาพ 32 แสดงตัวอย่างขวดของแต่ละแบรนด์ 18 ขวด [8]

ซึ่งขวดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ฝาครอบ และส่วนที่ 2 ลำตัวของขวด ส่วนของลำตัวแบ่งออกได้อีก 4 ชั้นส่วนย่อย ได้แก่ บ่า (Shoulder) ช่วงเอว (Waist) ส่วนล่าง (Heel) และฐาน (Base) ดังแสดงในภาพ 33 ซึ่งในโครงสร้างของขวดถูกสร้างโดยตัดขวางและมีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ รูปทรงของหน้าตัดพบว่ามีลักษณะเป็นวงกลม วงรี สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปหลายเหลี่ยม

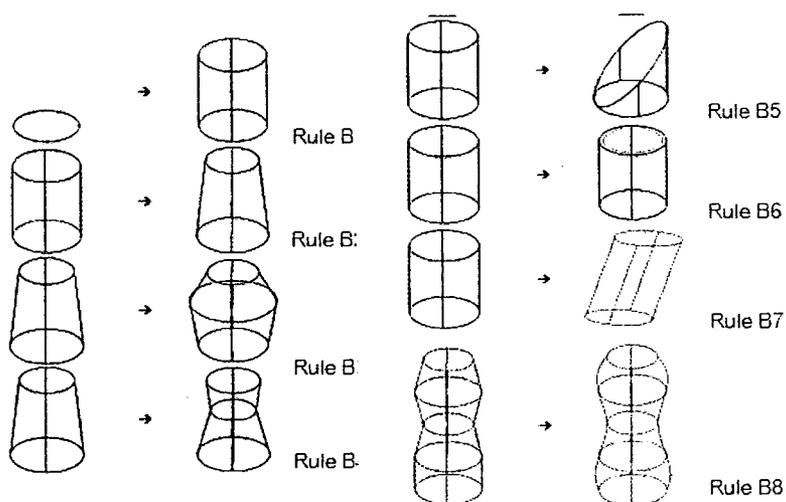


ภาพ 33 แสดงอธิบายโครงสร้างขวดแชมพูทั่วไป [8]

การหมุนและความสัมพันธ์เชิงมุมของหน้าตัดระนาบมองด้านหน้าและด้านข้าง ในการเชื่อมหน้าตัดสามารถเชื่อมได้ทั้งพื้นผิวเส้นตรงและเส้นโค้งที่สร้างขอบแบบคมและขอบแบบราบเรียบ และทำการแบ่งเซตขอบเขตของกฎเป็น 2 เซต คือ กฎการเปลี่ยนแปลงของเฉพาะส่วนหน้าตัด ตัวอย่างเช่น กฎ A2 หน้าตัดที่มีลักษณะรูปร่างรีถูกเปลี่ยนแปลงเป็นหน้าตัดที่มีลักษณะรูปร่างกลม และ กฎ A4 หน้าตัดที่มีลักษณะรูปร่างกลมถูกเปลี่ยนแปลงเป็นหน้าตัดที่มีลักษณะรูปสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพ 34 เป็นต้น และกฎสำหรับการเปลี่ยนแปลงส่วนของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น กฎ B7 จากโครงสร้างลักษณะตรงซึ่งถูกเปลี่ยนการสร้างโครงสร้างให้มีลักษณะเอียงหรือเบนไปทางด้านขวามือ ดังแสดงในภาพ 35

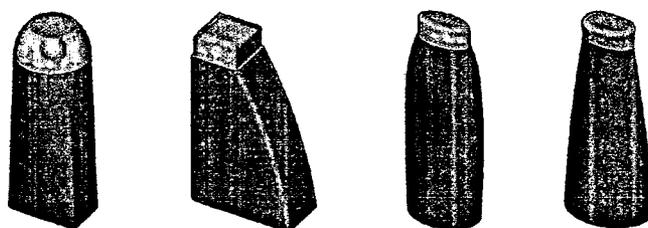


ภาพ 34 แสดงกฎการเปลี่ยนแปลงของส่วนหน้าตัดของขวดแชมพู [8]



ภาพ 35 แสดงกฎสำหรับโครงสร้างของขวดแชมพู [8]

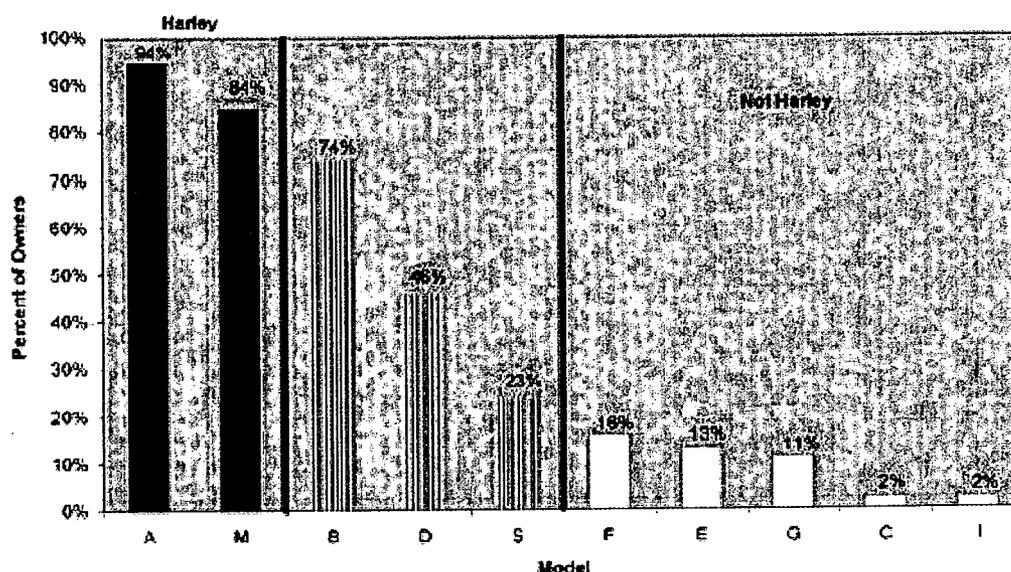
ขวดของแบรนด์ต่างๆ ถูกสร้างขึ้นด้วยไวยากรณ์รูปร่างที่มีการใช้เซตขอบเขตของกฎรูปร่างเดียวกันในสร้างการออกแบบแต่ละแบรนด์และคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของแต่ละแบรนด์ได้จากการสำรวจ สามารถได้รูปร่างใหม่สำหรับการออกแบบ ดังแสดงในภาพ 36



ภาพ 36 แสดงไวยากรณ์สร้างการออกแบบขวดแชมพูใหม่ [8]

งานวิจัยบางงานได้มีการตรวจสอบรูปร่างของการออกแบบที่คล้ายคลึงกัน จะเห็นได้จากงานของงานวิจัยของ Michael J. and Jonathan [6] โดยมีการสำรวจ 2 แนวทางโดยการตีพิมพ์ออนไลน์จำนวน 150 ข้อมูล และเจ้าของฮาร์เลย์เดวิดสันมากกว่า 100 คน โดยใช้สำหรับเป็นข้อมูล

ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีสำรวจโมเดลจำนวน 10 โมเดล ที่ถูกสุ่มเลือกจากไวยากรณ์รูปร่างของพวกเขา โดยมีทั้งโมเดลที่สร้างความพึงพอใจและไม่พึงพอใจแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ของความพึงพอใจใน 10 โมเดล ดังแสดงในภาพ 37



ภาพ 37 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเป็นฮาร์เลย์เดวิดสันโดยเจ้าของรถจักรยานยนต์ ฮาร์เลย์เดวิดสัน [6]

งานวิจัยของ Cui and Tang. [9] โดยมีการสำรวจรูปร่างด้วยสมการเมตริกเพื่อประเมินแบบอัตโนมัติ และพวกเขาได้เรียนเชิญนักออกแบบจำนวน 3 ท่านที่มีพื้นฐานการออกแบบที่แตกต่าง นักออกแบบตกแต่งภายใน นักออกแบบภูมิทัศน์เมืองและนักออกแบบแนวความคิดเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์นักออกแบบทั้ง 3 คน แสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับการสำรวจรูปร่างว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และรูปฟอร์มที่ได้จากการสำรวจการออกแบบจะเป็นประโยชน์สำหรับนักออกแบบในกระบวนการออกแบบ

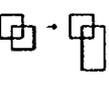
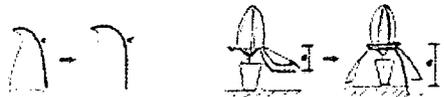
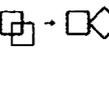
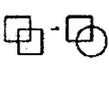
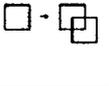
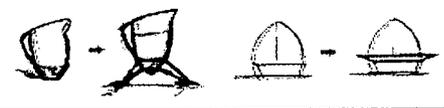
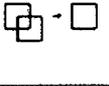
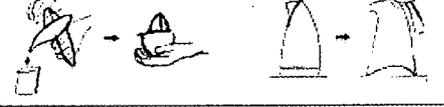
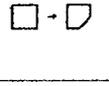
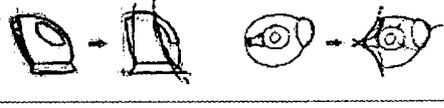
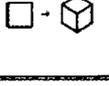
ในตาราง 11 ผลสรุปของรูปแบบการนำเสนอในแบบทั้งสองและสามมิติ การนำเสนอกฎรูปร่าง และการตรวจสอบและประเมินผลของงานวิจัยที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม

ตาราง 11 แสดงผลสรุปการนำเสนอกฎรูปร่าง การตรวจสอบและการประเมิน

ชื่อผู้แต่ง	ผลิตภัณฑ์	รูปแบบการนำเสนอ (มิติ)	การนำเสนอกฎรูปร่าง	ตรวจสอบและประเมิน
Manish and Jonathan [5]	เครื่องชงกาแฟ	2-3	ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์	
Michael J. and Jonathan [6]	รถจักรยานยนต์ แบรนด์ฮาร์เลย์เดวิดสัน	2	ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์	ความพึงพอใจ (Satisfying)
HauHing, et al. [7]	ขวดโคคาโคล่าและขวดเฮดแอนด์โซฟต์เดออร์	2-3	การแยกส่วนของผลิตภัณฑ์	
Xiaojuan, et al. [8]	ออกแบบบรรจุภัณฑ์	3	หน้าตัดของผลิตภัณฑ์	
Cui and Tang [9, 28]	ลายปักผ้าเชื้อชาติ ยูนนาน	2	ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์	ความพึงพอใจ

ในงานวิจัยของ Miquel, et al. [16] เสนอวิธีการออกแบบรูปร่างถูกสร้างขึ้นและสำรวจโดยใช้หลักการของการสเกตซ์ซึ่งในกระบวนการออกแบบมีการเปลี่ยนรูปร่างจากรูปร่างเริ่มต้นไปยังเป็นรูปร่างอื่นๆ ในกระบวนการออกแบบได้มีการเชื่อมต่อระหว่างการสเกตซ์โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและอธิบายตามกฎรูปร่าง ซึ่งกฎสามารถอธิบายการสำรวจของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและพัฒนาความเข้าใจของการสเกตซ์ในการทดลองเกี่ยวกับการสเกตซ์ซึ่งพวกเขาให้นักออกแบบในแต่ละสาขา ได้แก่ นักออกแบบอุตสาหกรรมมืออาชีพจำนวน 8 คน สถาปนิกมืออาชีพจำนวน 4 คน และนักวิจัยจำนวน 2 คน ซึ่งผู้เข้าร่วมจะต้องมีประสบการณ์มากกว่า 3 ปี ซึ่งเป็นระดับมืออาชีพในสาขานั้น พวกเขาทำการเลือกงาน 3 งานเป็นมาตรฐานในกระบวนการของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในการสำรวจการสเกตซ์จะทำการสังเกตในเรื่องของการแยกย่อยรูปร่าง การตีความหมายรูปร่าง และสมาชิก (Families) ของการออกแบบ ในการดำเนินงานของผู้มีส่วนร่วมถูกบันทึกไว้ด้วยวิดีโอ (Video) ซึ่งนักออกแบบทำการออกแบบบนกระดาษ พวกเขาสังเกตผลของการสเกตซ์ของผู้เข้าร่วมทั้งหมดในการผลิตรวมทั้งหมดเพียง 300 สเกตซ์ พบว่า นักวิจัยนำเสนอการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่องในงานสเกตซ์

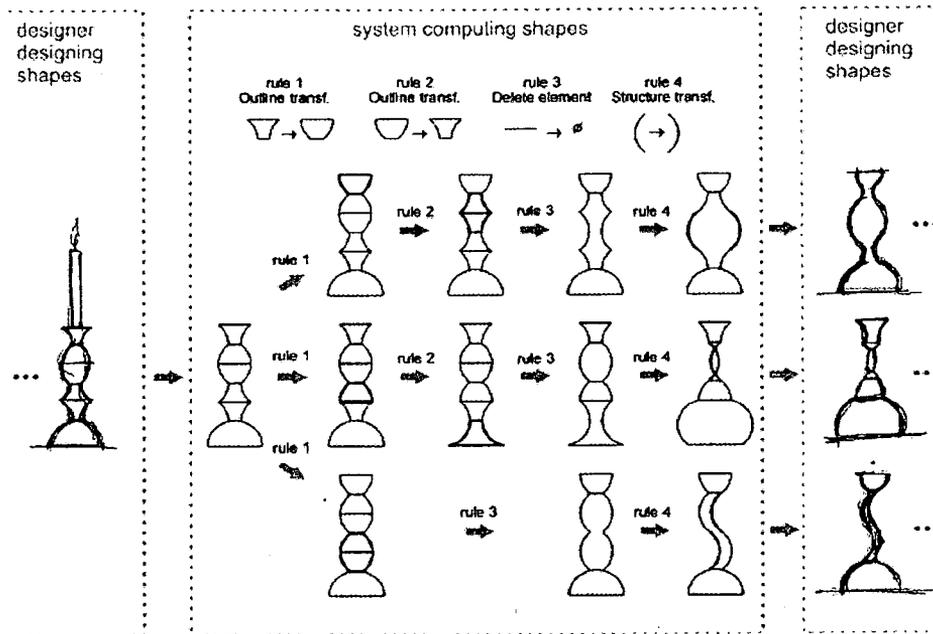
สามารถอธิบายผ่านในจำนวนจำกัดของกฎรูปร่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงโครงร่าง (Outline Transformation) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Structure Transformation) การแทนที่ขององค์ประกอบ (Substitute Element) การเพิ่มขององค์ประกอบ (Add Element) การลบขององค์ประกอบ (Delete Element) การตัดขององค์ประกอบ (Cut Element) และการเปลี่ยนมุมมอง (Change View) ดังแสดงในภาพ 38

Researcher 1 Rules - ID	Researcher 2 Rules - Arch	Schema	Examples from sketches
Outline transformation	Bend		
	Straighten		
	Thicken		
	Extend shape		
Structure transformation	Change width/length		
	Flip		
	Change angles		
	Change direction		
Substitute element	Split (use both parts)		
	Change position		
Add element	...		
	Combine shapes		
Delete element	Add a new shape		
	Combine shapes		
Cut element	Delete element		
	Split (use one part)		
Change view	Change view		

ภาพ 38 แสดงกฎรูปร่างทั่วไปจากตัวอย่างการสเก็ตช์จากนักออกแบบ [16]

และในการวิเคราะห์การสร้างการสเก็ตช์โดยผู้เข้าร่วม การออกแบบได้ให้การกำหนดของรูปร่างย่อยและการเปลี่ยนแปลงของผู้เข้าร่วม ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการสำรวจการออกแบบ ในการทำซ้ำและการแก้ไขทำเครื่องหมายการทำซ้ำในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางความคิดสร้างสรรค์และ

การพัฒนา การนำเสนอรูปร่างและรูปร่างย่อยสามารถตีความหมายได้หลากหลายวิธี และได้ทำการอธิบายแนวความคิดเริ่มต้น ดังแสดงในภาพ 39 และเซตของตัวแทนกฎรูปร่างที่ได้จากสำรวจการสังเกตของผู้เข้าร่วม ซึ่งระบบคำนวณรูปร่างสามารถสร้างทางเลือกของการออกแบบเชิงเทียน โดยประยุกต์ใช้กฎรูปร่างที่มีประโยชน์ในกระบวนการออกแบบ



ภาพ 39 แสดงความหลากหลายของผลลัพธ์การออกแบบด้วยเซตต่างๆ ของกฎรูปร่างที่ประยุกต์สำหรับการออกแบบเริ่มต้นของเชิงเทียน [16]

ในงานวิจัยของ Miquel, et al. [16] ให้กฎที่ทำให้รูปร่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการออกแบบ ที่สามารถนำกฎรูปร่างมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้