บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโรงงานทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่จะไม่คำนึงถึงค่าเผื่อ (Tolerance) ในแต่ละชิ้นงานที่นำมาประกอบกันว่ามีความเหมาะสมและมีต้นทุนที่เกิดขึ้นต่ำสุดหรือไม่ ในความเป็นจริงวิศวกรควรต้องหาหนทางเพื่อลดหรือเพิ่มค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดให้กับชิ้นงาน นอกจากนี้โรงงานส่วนมากไม่ได้คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมการต้นทุนและค่าเผื่อที่เหมาะสมของชิ้นงานประกอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าไม่คุ้มกับเวลาและค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียไปในการวิเคราะห์ แต่ถ้าหันกลับมามองให้ดีในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมากมาย เช่น โรงงานผลิตอะไหล่รถยนต์ เป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปเนื่องจากการกำหนดค่าเผื่อที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการแก้ไขชิ้นงานที่จะนำมาประกอบใหม่และอาจจะรวมถึงค่าใช้จ่ายอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งถ้าผู้อ่านงานวิจัยนี้แล้วไม่เห็นด้วยก็ลองพิจารณาดูว่ามิเช่นนั้นแล้วทำไมผู้ที่ศึกษางานวิจัยด้านนี้จึงมีทฤษฎีในอุดมคติที่ว่าต้องการให้ค่าเผื่อเป็นศูนย์หรือก็คือ มีคุณภาพที่ดีที่สุด แต่ในความเป็นจริงค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในการแก้ไขนั้นไม่คุ้มกับที่ลงทุนเปลี่ยนแปลงจึงยอมให้มีค่าเผื่อเกิดขึ้นโดยค่าเผื่อแต่ละชิ้นงานนั้นก็จะมีความสัมพันธ์กับค่าการสวมใส่แบบหลวม (Clearance) ที่ทางโรงงานกำหนดให้

ในการออกแบบชิ้นส่วนที่จะนำมาประกอบนั้นจะต้องกำหนดค่าเผื่อแก่มิติทั้งหมด การประกอบกันของค่าเผื่อเหล่านี้ต้องรับประกันได้ว่ามีความกระชับเพียงพอ และการออกแบบนั้นก็ต้องเกิดขึ้นได้ตามที่มุ่งหวังไว้ สำหรับประเด็นที่ต้องพิจารณาสำหรับการผลิตชิ้นงานที่ผลิตเป็นจำนวนมากก็คือ ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ คุณภาพที่สูง และการปฏิบัติการของการออกแบบต้องมีความเหมาะสม วิศวกรออกแบบโดยปกติจะวิตกกังวลกับการกำหนดค่าเผื่อแก่มิติทั้งหมดในการที่จะทำให้การปฏิบัติการมีความเหมาะสมและผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ ส่วนวิศวกรการผลิตจะสนใจในเรื่องการทำอย่างไร จึงทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นและให้ต้นทุนลดลงเรื่อย ๆ หรือก็คือ ให้น้อยที่สุด อีกทั้งสนับสนุนให้ค่าเผื่อที่เกิดขึ้นมีช่วงที่กว้างหรือหลวมเข้าไว้ ข้อขัดแย้งที่เกิดขึ้นกับทั้งสองฝ่ายนี้สามารถถูกแก้ไขได้ ถ้าวิศวกรออกแบบสามารถหาค่าเผื่อที่มีการปฏิบัติการและคุณภาพที่เหมาะสมบนค่าวิกฤติทางด้านมิติเหล่านี้ ค่าเผื่อของค่าวิกฤติทางด้านมิตินี้โดยปกติจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของชิ้นงานที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน ทางด้านวิศวกรการผลิตก็จำเป็นที่จะต้องเตรียมเส้นโค้ง

ต้นทุนสำหรับมิติของชิ้นส่วนทุกชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชั่นของค่าเผื่อ โดยที่เส้นโค้งต้นทุนนี้จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชั่นของการปฏิบัติการผลิต ซึ่งต้นทุนนี้จะประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การได้มาซึ่งการจัดสรรค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดนั้นบุคลากรที่จะแก้ปัญหาต้องได้รับความร่วมมือจากทั้งสองฝ่ายเป็นอย่างดี

สำหรับรูปแบบในการวิเคราะห์ค่าเผื่อนี้นั้นรูปแบบหลัก ๆ ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 รูปแบบคือ หนึ่ง รูปแบบ (Worst Case, Worst Limits หรือ Worst-Limits) [7] หรือ Sure-fit [8] (บางครั้งอาจมีชื่อว่า Absolute Reliability) [13] และ สอง รูปแบบ Statistical [7] รูปแบบ Worst Limits นั้นสมมติว่ามิติทั้งหมดของชิ้นส่วนของการประกอบเป็นค่าขีดจำกัดของค่าเผื่อ 2 ค่า โดยเป็นค่ามากที่สุด (Maximize) หรือค่าน้อยที่สุด (Minimize) ด้วยเหตุนี้รูปแบบนี้จึงเป็นไปไม่ได้อย่างมากที่จะนำไปใช้จริงในการผลิต ดังนั้นจะเห็นได้ว่ารูปแบบ Worst Limits นี้ค่าเผื่อที่เกิดขึ้นนั้นกระชับอย่างไม่จำเป็นและแพงมากต่อการผลิต การพิจารณารูปแบบ Statistical นั้นจะเหมาะสมกับการปฏิบัติการจริงมากกว่า เพราะค่าเผื่อที่เกิดขึ้นนั้นถูกค้นพบว่ามีการกระจายแบบเกาซ์เซียน (Gaussian Distribution) [14, 15, 16] ถึงแม้ว่าการกระจายค่าเผื่อเหล่านั้นจะไม่เป็นแบบเกาซ์เซียนก็ตามทฤษฎีบทการเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Limit Theorem) ก็กล่าวว่าการกระจายความน่าจะเป็นของค่าเผื่อเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะกลายมาเป็นเกาซ์เซียน [8]

รูปแบบ Statistical ที่ใช้โดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่า ($\pm 3\sigma$) ซึ่งถูกเรียกค่านี้ว่า ค่าเผื่อธรรมชาติ (Nature Tolerance) [15] จึงหมายความว่า 99.73 เปอร์เซ็นต์ของมิติทั้งหมดจะตกอยู่ภายในค่าเผื่อ สำหรับการกำหนดให้ค่าเผื่อไม่เกิน 6σ ก็เพราะว่าโดยทั่วไปโรงงานส่วนใหญ่จะมีขีดจำกัดของเครื่องจักรหรือกระบวนการผลิตไม่เกินค่านี้

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องของการจัดสรรค่าเผื่อผู้วิจัยยังไม่พบเลยในประเทศไทยและยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้กับโรงงานจริง แม้กระนั้นก็ตามถ้าหากมีผู้ทำการวิจัยไว้แล้วสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ก็จะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง เพราะว่างานวิจัยด้านนี้เป็นงานวิจัยเฉพาะกรณีหรือไว้ดูเป็นแนวทางเพื่อการประยุกต์เท่านั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เป็นโครงการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีต้นทุนต่ำที่สุดของชิ้นส่วนประกอบเพลา (Shaft) และเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์ (Oil Pump) โดยที่ผลงานจากการวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้อย่างกว้างขวาง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาการวิจัยฉบับนี้คือ

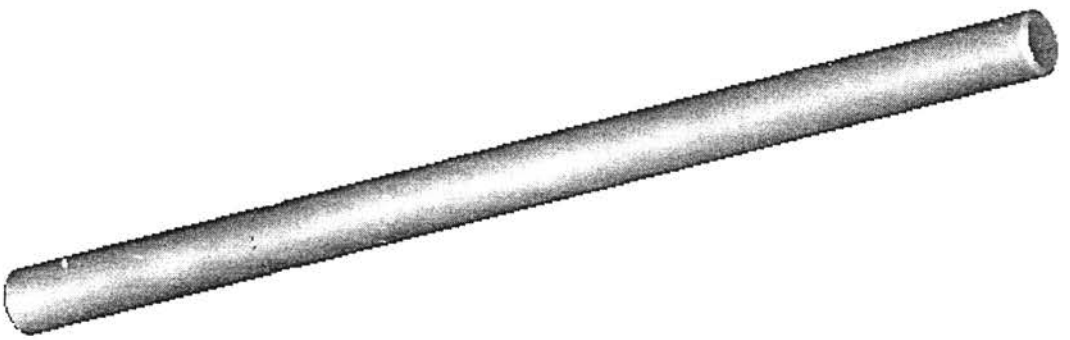
1.3.1 จะทำการวิเคราะห์หาค่าเผื่อโดยใช้รูปแบบ Statistical ซึ่งไม่ใช้รูปแบบ Worst Limits เพราะว่ารูปแบบ Statistical นั้นเหมาะสมกับการผลิตจริงในโรงงานมากกว่า [7] และทางโรงงานตัวอย่างยอมให้ค่าเผื่อการประกอบยอมรับได้ที่ $\pm 3\sigma$

1.3.2 สมการฟังก์ชั่นต้นทุนเป็นสมการไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear Equation) ซึ่งในที่นี้ใช้รูปแบบ Reciprocal ; $C = A + B / Tol$ [5] โดยที่ A คือ ต้นทุนคงที่ต่อชิ้น ซึ่งต้นทุนคงที่ ได้แก่ ต้นทุนการจัดเตรียมปรับตั้งเครื่องจักร (Setup Cost), เครื่องมือ (Tooling), วัสดุ (Material) เช่น สารหล่อเย็น (Coolant), การปฏิบัติการเตรียมความพร้อมของระบบก่อนทำการผลิต (Prior Operators) และอื่น ๆ ส่วน B คือ ต้นทุนแปรผันที่กำหนดขนาดค่าเผื่อออกแบบต่อชิ้น (Cost of producing a single component dimension to a specified tolerances) ซึ่งคือ ต้นทุนการผลิตแต่ละชิ้นส่วนที่มีขนาดค่าเผื่อที่กำหนด สำหรับเส้นโค้งต้นทุนเนื่องจากกราฟที่แสดงเส้นกราฟระหว่างตัวแปร 2 ตัวหรือการพล็อต (Plot) ออกมาในรูปแบบ Reciprocal Squared, Reciprocal และ Exponential ผลปรากฏว่าเส้นโค้งค่าเผื่อ Reciprocal มีความเหมาะสมกับเส้นโค้งกระบวนการทางเครื่องจักรกล (Machining Process) ที่สุด [7]

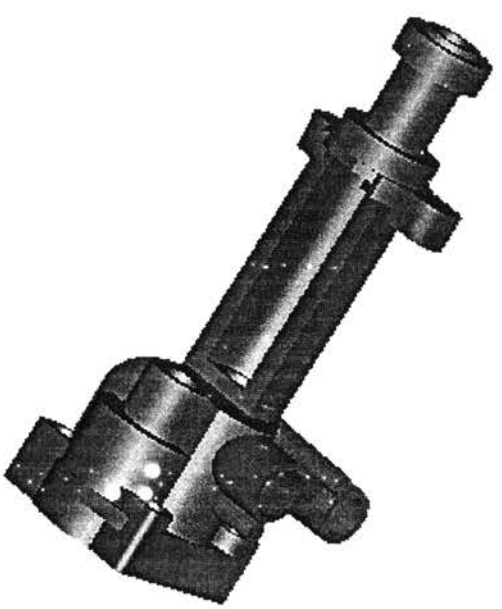
1.3.3 ไม่พิจารณาค่าการสวมใส่แบบหลวมในกรณีที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนดไว้

1.3.4 ในโรงงานตัวอย่างเป็นโรงงานผลิตและประกอบอะไหล่รถยนต์ ซึ่งประกอบด้วยสายการประกอบมากกว่า 10 กว่าสายงาน และมีค่าวิกฤติทางด้านมิติในการประกอบมากมายหลายจุด แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งความสนใจไปที่การประกอบชิ้นส่วนประกอบเพลา ดังแสดงในรูปที่ 1.3.4.1 และชิ้นส่วนประกอบเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.3.4.2 เนื่องจากจุดนี้เป็นจุดวิกฤติที่สุดของชิ้นงานประกอบ ซึ่งถ้าประกอบแน่นไปหรือหลวมไปจะทำให้เกิดปัญหาในด้านการทำงานของชิ้นงานประกอบได้ และยังเป็นชิ้นส่วนประกอบที่ผลิตเป็นจำนวนมากที่สุดในขณะนี้ ส่วนการประกอบของทั้งสองชิ้นส่วนแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 1.3.4.3

1.3.5 จำนวนชิ้นส่วนที่ใช้ในการทำการทดลองจะใช้เพลาและเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์ชนิดละ 100 ชิ้น เพราะเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่จะยอมรับได้ในการนำมาใช้คำนวณ [22]

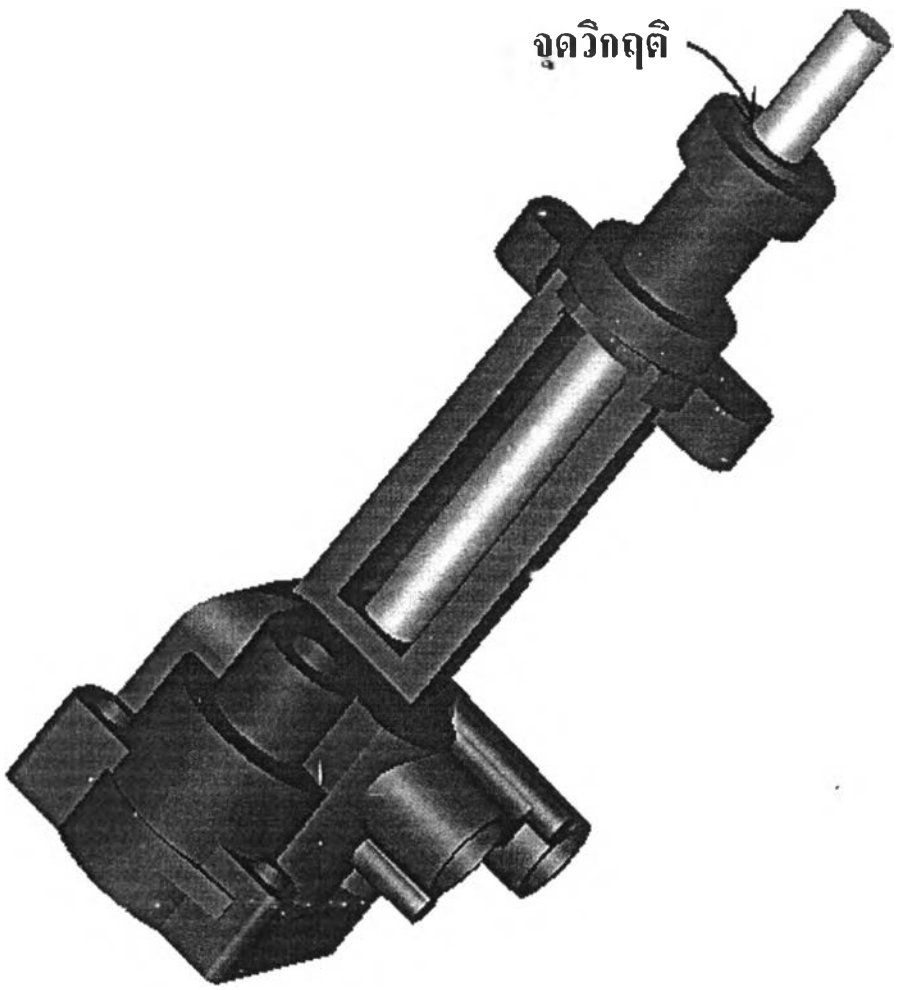


<u>รูปที่ 1.3.4.1</u> แสดงรูปร่างชิ้นส่วนประกอบเพลา



<u>รูปที่ 1.3.4.2</u> แสดงรูปร่างชิ้นส่วนประกอบเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



<u>รูปที่ 1.3.4.3</u> แสดงรูปร่างการประกอบชิ้นส่วนประกอบเพลาและเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์

1.3.6 กำหนดว่าค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดนั้น เป็นค่าที่เครื่องจักรในโรงงานที่ทำการวิจัยนั้นสามารถปฏิบัติการได้ ซึ่งมีความละเอียดที่สุดที่ 1 ไมครอน

1.3.7 การออกแบบค่าเผื่อที่เหมาะสมนี้ จะแสดงค่าเผื่อการประกอบชิ้นส่วนทั้งสองชนิดจากค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุด และเสนอคู่ทางเลือกอื่น ๆ อีกให้โรงงานทำการเลือกคู่ค่าเผื่อที่พึงพอใจ เพื่อขจัดปัญหาการที่โรงงานต้องมาวิเคราะห์ฟังก์ชั่นการสูญเสียคุณภาพร่วมกับฟังก์ชั่นต้นทุนการผลิตเหมือนกับทฤษฎีงานวิจัยของ Jeang ดังนั้นทางโรงงานจึงให้ลูกค้าทำการกำหนดช่วงมิติของชิ้นส่วนทั้งสองชนิดมาที่ลูกค้ายอมรับได้มาให้เพราะลูกค้าต้องรู้ค่าจำกัดอยู่แล้ว จากนั้นทางโรงงานจึงค่อยพิจารณาหาคู่ค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงาน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

1.4.1 ทำการค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และสำรวจงานวิจัย

1.4.2 ทำการศึกษาขั้นตอนการทำงานในสภาพปัจจุบันของโรงงานตัวอย่างในทุก ๆ แผนก

1.4.3 ทำการหาค่าการสวมใส่แบบหลวมที่ต้องการ (Require Clearance) ของการประกอบชิ้นส่วนประกอบเพลาและเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์ ซึ่งเป็นการสวมใส่แบบหลวมที่โรงงานกำหนดขึ้นมา

1.4.4 ทำการหา ค่าเฉลี่ย (Average) , ค่าเผื่อเดิม (Original Tolerance) , ค่าการสวมใส่แบบหลวมเฉลี่ย (Average Clearance) และค่าเผื่อการประกอบ (Tolerance Assembly ; T_{ASM}) ของชิ้นส่วนประกอบ เพลากับเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์ ณ การปฏิบัติการจริง

1.4.5 ทำการหาค่าการสวมใส่แบบหลวมเฉลี่ย และค่าเผื่อการประกอบที่เกิดขึ้นจากค่าเผื่อในข้อ 3 ซึ่งเป็นค่าวิกฤติทางด้านมิติ (Critical Dimension) ของการประกอบชิ้นส่วนประกอบเพลาและเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์

1.4.6 ทำการตรวจสอบค่าการสวมใส่แบบหลวมเฉลี่ย และค่าเผื่อการประกอบที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติการจริงว่าถูกต้องตามการสวมใส่แบบหลวมที่ต้องการหรือไม่

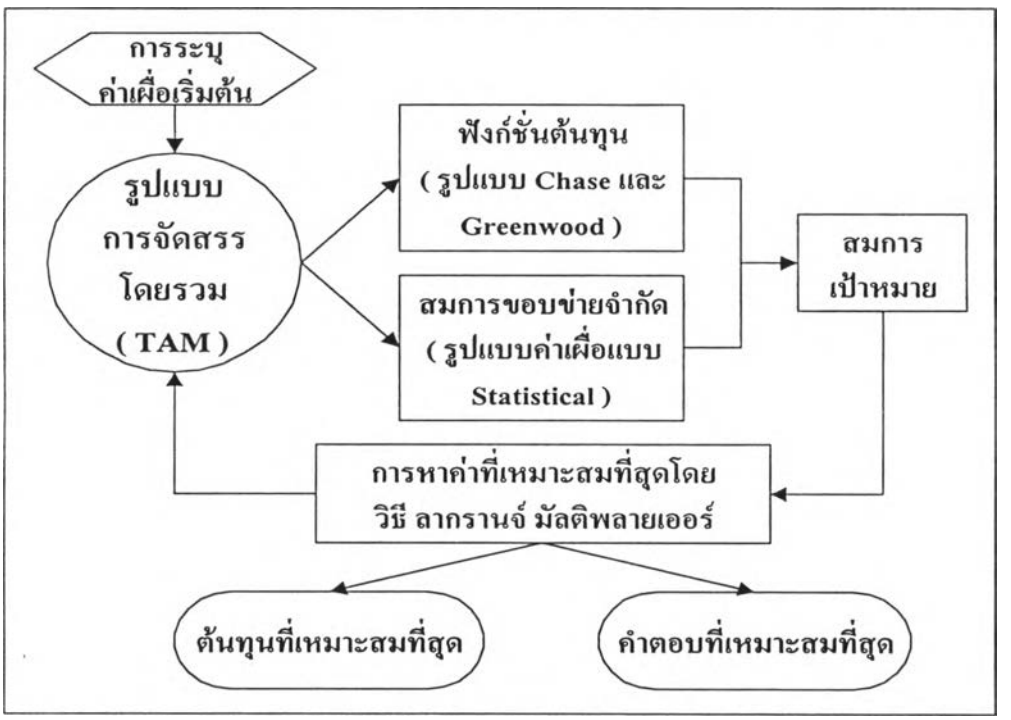
1.4.7 ทำการหาสมการฟังก์ชั่นต้นทุน (Cost Function), สมการขอบข่ายจำกัด (Constraint) และสมการเป้าหมาย (Objective Equation)

1.4.8 ทำการหาค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ต้นทุนการประกอบที่สุด ซึ่งมีแผนผังการจัดสรรแสดงให้เห็นดังรูปที่ 1.4.1

1.4.9 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.4.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

สำหรับขั้นตอนวิธีการดำเนินงานในการวิจัยดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาเขียนแผนผังดำเนินงานได้ดังรูปที่ 1.4.2



<u>รูปที่ 1.4.1</u> แสดงแผนผังการจัดสรรค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ต้นทุนการประกอบที่ต่ำที่สุด

1.5 <u>ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ</u>

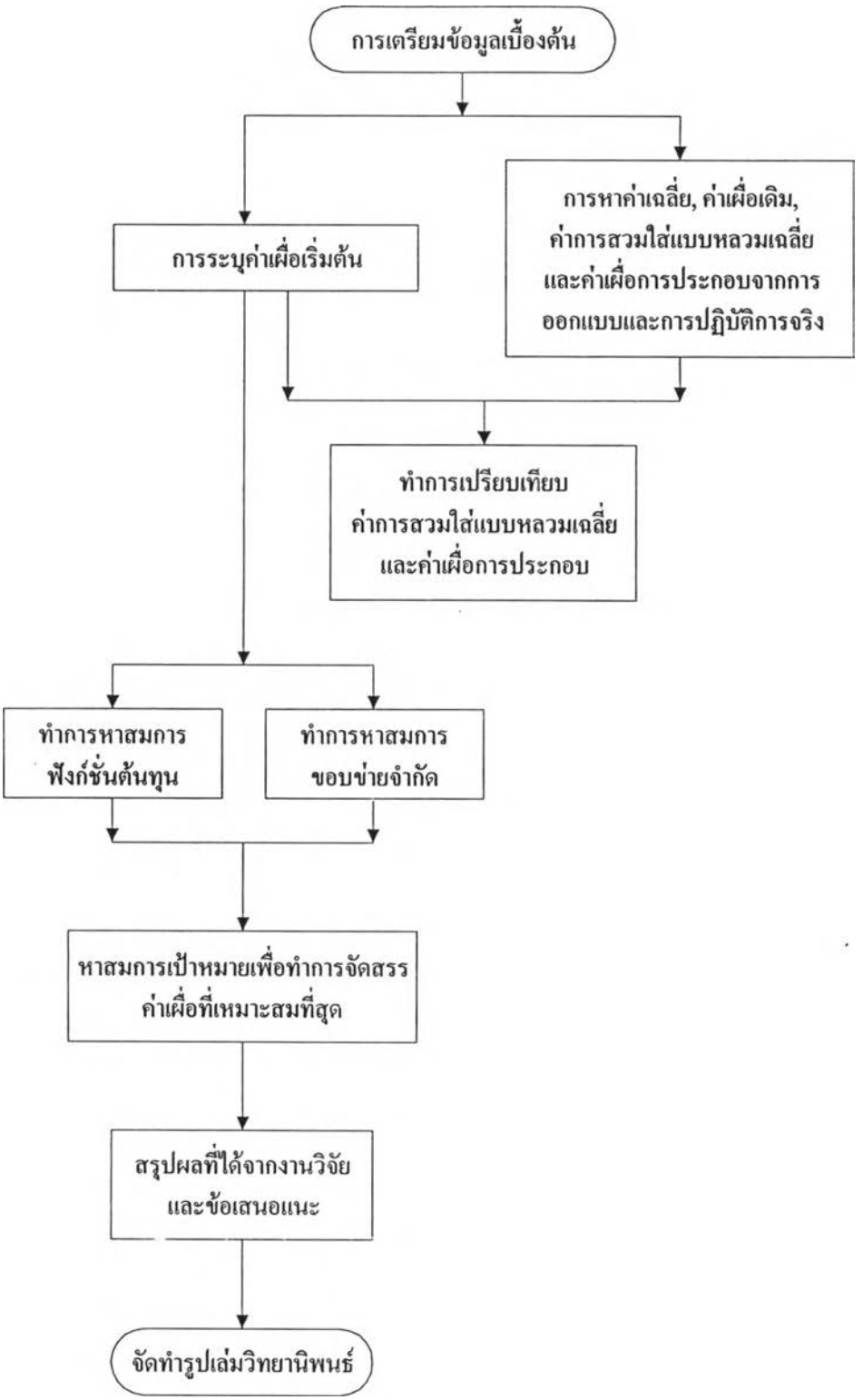
1.5.1 งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการหาค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุด โดยที่มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำที่สุดของการประกอบชิ้นส่วนประกอบเพลาและเครื่องสูบน้ำมันรถยนต์

1.5.2 สามารถตรวจสอบว่าการสวมใส่แบบหลวมเฉลี่ย และค่าเผื่อการประกอบที่เกิดขึ้นจริงถูกต้องตามการสวมใส่แบบหลวมที่ต้องการซึ่งกำหนดไว้หรือไม่

1.5.3 สามารถนำงานวิจัยที่ได้ไปใช้เป็น แนวทางในการประยุกต์ใช้กับการประกอบชิ้นงานชนิดอื่น ๆ ได้

1.5.4 จากการศึกษางานวิจัยทำให้รู้แนวทางในการหาต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน

1.5.5 งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่รองรับการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต เมื่อโรงงานในประเทศไทยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้กลับกลายสถานภาพจากผู้รับแบบหรือผู้ลอกเลียนแบบมาเป็นผู้ออกแบบขนาดชิ้นส่วนประกอบด้วยตนเอง



<u>รูปที่ 1.4.2</u> แสดงแผนผังขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

1.6 การสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะดำเนินงานวิจัยได้นั้นต้องมีการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นทฤษฎีและแนวทางไว้ใช้อ้างอิง ซึ่งงานวิจัยของแต่ละบุคคลนั้นก็จะมีส่วนสอดคล้องกับการดำเนินการของผลงานวิจัยฉบับนี้

1.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับค่าเผื่อ

ในปี ค.ศ. 1934 Shewhart ได้กล่าวถึงลักษณะเด่นระหว่างการออกแบบรายละเอียดในงานวิศวกรรม (Design Specifications) และการตรวจสอบรายละเอียดในงานวิศวกรรม (Inspection Specifications) การออกแบบรายละเอียดในงานวิศวกรรมจัดการด้วยรายละเอียดในงานวิศวกรรม (Specifications) ที่อยู่ในมาตราสัญญาที่ถูกใช้ในการผลิต ซึ่งถูกเรียกว่า ฟังก์ชั่นรายละเอียดในงานวิศวกรรม (Specification Function) ส่วนการตรวจสอบรายละเอียดในงานวิศวกรรมจัดการด้วยค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงจากการผลิต ซึ่งถูกเรียกว่า ฟังก์ชั่นการตรวจสอบ (Inspection Function) [10]

ในปี ค.ศ. 1942 Darwin ได้กล่าวว่าค่าเผื่อที่เกิดขึ้นในการผลิตนั้นเป็นค่าเผื่อที่ถูกกำหนดให้มากกว่าค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สมควรจะเป็น ด้วยเหตุนี้ Darwin จึงพยายามค้นหาแนวทางการหาค่าเผื่อที่เหมาะสม เพื่อสิ่งนี้ทุก ๆ ครั้งที่ Darwin ได้พบวิศวกรเขาจะถามวิศวกรว่าคุณกำหนดค่าเผื่ออย่างไร ซึ่งคำตอบที่ได้รับมีความหลากหลายโดยที่บางครั้งก็ได้รับคำอธิบายเพียงเล็กน้อย และ Darwin ก็อธิบายเรื่องค่าเผื่อให้กับบุคคลที่เกี่ยวข้องในสายงานที่แตกต่างกัน แต่สิ่งที่เป็นประเด็นที่ Darwin ตระหนักถึงเป็นอย่างมากก็คือ *มีสักกี่คนที่สนใจในเรื่องของค่าเผื่ออย่างจริงจัง* [3]

ในปี ค.ศ. 1944 Rice ได้กล่าวไว้ว่าในธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลและโรงงานที่ทำงานเกี่ยวกับโลหะนั้นในอนาคตถ้าต้องการให้ธุรกิจมีความก้าวหน้าและเจริญเติบโตขึ้นต้องพิจารณาถึงค่าเผื่อโดยต้องปรับปรุงให้เหมาะสมอยู่ตลอดเวลา สำหรับแบบพิมพ์เขียว (Blueprint) อาจจะกำหนดสำหรับหนึ่งค่าเผื่อ เครื่องมือตรวจสอบอาจจะให้มีค่าเผื่อได้หลาย ๆ ค่า และหัวหน้าคนงานอาจจะไม่ค่อยคำนึงถึงค่าเผื่อ สามอย่างที่กล่าวมานี้มีจุดยืนที่แตกต่างกันคือ วิศวกรจะออกแบบให้มีค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว ผู้ตรวจสอบจะพยายามรักษาค่าเผื่อให้มีคุณภาพที่ยอมรับได้ก็เพียงพอแล้ว ส่วนหัวหน้าคนงานก็จะผลิตชิ้นงานให้ได้มากที่สุด (เน้นปริมาณ) ดังนั้นต้นทุนที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่ที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายและมีการทำใหม่ก็มาจาก 3 ส่วนนี้ ต้นทุนนี้จะเกิดการสูญเสีย เวลา เงิน และกำลังแรงคน [11]

ในปี ค.ศ. 1970 Samson *et al.* ได้กล่าวว่าในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ค่าเผื่อถูกจัดการโดยปราศจากการพิจารณาถึงระดับขีดความสามารถของเครื่องจักรและความต้องการในการปฏิบัติการ บางครั้งค่าเผื่อก็ถูกบีบให้แคบกว่าที่จำเป็นและบางกรณีก็กว้างกว่าที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงได้ใช้เทคนิคทางสถิติ (Statistical Techniques) ภายใต้รูปแบบเส้นโค้งนอร์มอล

ขีดความสามารถของเครื่องจักร = 6σ ($\pm 3\sigma$)

= ความเป็นไปได้ของผลิตภัณฑ์ตกอยู่ช่วง 99.7%

สำหรับเทคนิคทางสถิติของ Samson และคณะ นี้ได้นำเอาสูตรทางคณิตศาสตร์มาทำการแก้ปัญหาจัดการ โดยใช้รากที่สองของผลบวกกำลังสอง ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$\sigma_{\text{การประกอบ}} = \sqrt{(\sigma_{\text{ชิ้นส่วน 1}})^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_3)^2 + \ldots + (\sigma_n)^2} \quad [2]$$

ในปี ค.ศ. 1972 Speckhart ได้เสนอบทความแสดงวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาการกำหนดค่าเผื่อที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือทางกลโดยให้มีต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งใช้วิธีลากรานจ์มัลติพลายเออร์ทำการหาคำตอบโดยมีรูปแบบสมการฟังก์ชั่นต้นทุน คือ $C = Ae^{B(Tol)}$ [8]

ในปี ค.ศ. 1973 Spotts ได้เสนอบทความแสดงวิธีการจัดสรรค่าเผื่อเพื่อให้การประกอบชิ้นส่วนประกอบมีต้นทุนต่ำที่สุด โดยทั่วไปต้นทุนในการผลิตจะลดลงถ้าค่าเผื่อมีช่วงกว้างขึ้น ซึ่ง เห็นได้ชัดว่าต้นทุนจะลดลงอย่างแน่นอนถ้าชิ้นส่วนที่มีราคาแพงมีค่าเผื่อที่มีช่วงกว้าง และในชิ้นส่วนที่มีราคาต่ำกว่ากำหนดให้มีช่วงค่าเผื่อที่แคบเข้า โดยสิ่งที่กล่าวมานี้ต้องมีข้อจำกัดว่าค่าเผื่อของการประกอบต้องคงที่ถ้าตัวหนึ่งลดอีกตัวหนึ่งต้องเพิ่ม สำหรับการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้ต้นทุนที่ต่ำที่สุดและค่าเผื่อที่เหมาะสมนี้นั้น Spotts ก็ได้ใช้วิธีลากรานจ์มัลติพลายเออร์ ทำการแก้ปัญหาหาคำตอบ โดยกำหนดรูปแบบสมการฟังก์ชั่นต้นทุน คือ $C = A + B/tol^2$ [9]

ในปี ค.ศ. 1982 Jamieson ได้เสนอบทความแสดงการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับค่าเผื่อโดยศึกษาจากชิ้นส่วนที่ผลิตจริงโดยมีกระบวนการในการเอาเนื้อโลหะออกหลายกระบวนการ ผลที่ได้ก็คือว่าเมื่อชิ้นส่วนที่มีกระบวนการที่เปลี่ยนไปเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับค่าเผื่อก็จะเปลี่ยนไป [6]

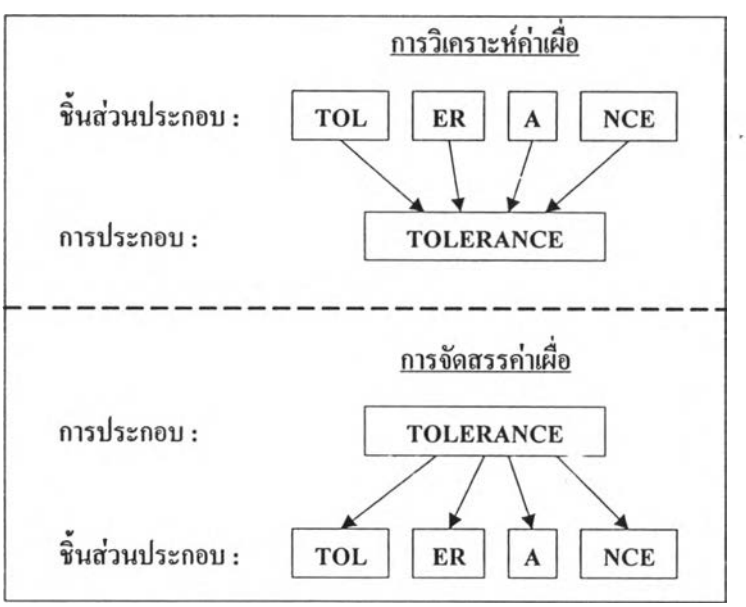
ในปี ค.ศ. 1987 Greenwood และ Chase ได้เสนอบทความซึ่งเป็นบทความที่ขยายมาจากผลงานวิจัยของ Spotts (1973) โดยมีรูปแบบฟังก์ชั่นต้นทุนที่เสนอใหม่ในรูปแบบ $C = A + B/tol$ [5]

ในปี ค.ศ. 1988 Chase และ Greenwood ได้เสนอบทความที่อธิบายถึงการออกแบบการ

วิเคราะห์ค่าเผื่อที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่ควรจะพิจารณา แต่การวิเคราะห์ค่าเผื่อที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรนี้ต้องขึ้นอยู่กับการผลิตด้วยจึงสามารถทำให้สินค้าสามารถแข่งขันในตลาดได้ งานวิจัยนี้ดู ๆ แล้วอาจจะไม่น่าสนใจแต่ผู้วิจัยคิดว่าจากประสบการณ์ในการทำงานที่ผ่านมาปัญหานี้เป็นปัญหาหลักปัญหาหนึ่งของบริษัทโดยส่วนใหญ่ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการไม่ประสานกันระหว่างฝ่ายออกแบบและฝ่ายผลิต ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการสื่อสารที่มีประสิทธิผล

การสื่อสารที่แย่ระหว่างการออกแบบและการผลิตในแง่ของการวิเคราะห์ค่าเผื่อที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรก็คือ การขาดการนิยามการหาค่าเผื่อ ส่วนการที่ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบน (Mean Shift) ไปทำให้เกิดการโต้เถียงในการประยุกต์ใช้กับรูปแบบ Worst Limits และ Simple Statistical กับทั้งสองฝ่าย ดังนั้นรูปแบบการประมาณค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบน (Estimated Mean Shift) จึงถูกเสนอขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาความขัดแย้งนี้ แต่ถ้าพิจารณาโดยประยุกต์ใช้กับ 2 รูปแบบดังที่กล่าวมาให้ไม่มีปัญหาฝ่ายผลิตจะต้องใช้เทคนิคการควบคุมคุณภาพมาเกี่ยวข้องเพื่อควบคุมค่าการสวมใส่แบบหลวมที่ต้องการได้อย่างเหมาะสมเพราะถ้าควบคุมได้แล้วก้จะทำให้แก้ปัญหาค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนได้

Chase และ Greenwood ได้กล่าวว่าพื้นฐานของการวิเคราะห์ค่าเผื่อ (Tolerance Analysis) เกิดจากค่าเผื่อของแต่ละชิ้นส่วนรวมกันเป็นค่าเผื่อของการประกอบ ส่วนกรณีการจัดสรรค่าเผื่อ (Tolerance Allocation) เกิดจากการรู้ค่าเผื่อจากการประกอบและทำการหาค่าเผื่อแต่ละชิ้นส่วนดังในรูปที่ 1.6.1.1



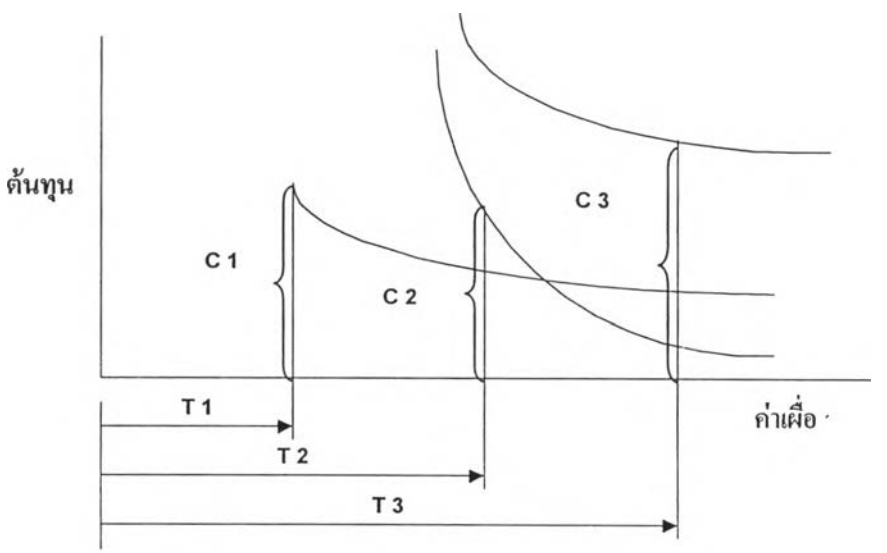
รูปที่ 1.6.1.1 แสดงการวิเคราะห์ค่าเผื่อเทียบกับการจัดสรรค่าเผื่อ

โดยที่รูปแบบหลักที่ใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ใช้กันอยู่มี 2 ประเภท คือ Worst Case Synthesis และ Statistical Synthesis ซึ่ง Worst Case จะเกิดจากการพิจารณาค่าเผื่อแต่ละชิ้น ณ

ส่วนมากที่สุดหรือต่ำที่สุดตามแบบพิมพ์เขียวที่กำหนด แต่ Statistical จะพิจารณาค่าเผื่อแต่ละชิ้นส่วนที่ 6σ ซึ่งเกิดจากการกระจายแบบนอร์มอล (Normal Distribution) หรือ การกระจายแบบ Classical Bell-Shaped หรือ การกระจายแบบเกาส์เซียนจากการปฏิบัติการจริง รายละเอียดต่าง ๆ ที่สมบูรณ์มากขึ้นนั้นสามารถหาดูได้จากงานวิจัยของ *Fortini* [4]

การจัดสรรหรือการสังเคราะห์ของค่าเผื่อในการออกแบบและการผลิตเป็นสิ่งที่ยากมาก วิธีขนาดสัดส่วน (Proprotional Scaling Method) และวิธีปัจจัยความแม่นยำ (Precision Factor Method) ก็เป็นวิธีการจัดสรรค่าเผื่อแต่เป็นวิธีที่ง่ายและเป็นวิธีแบบหยาบ ๆ ด้วยเหตุนี้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาต้นทุน (Cost Optimization) จึงถูกพิจารณาสำหรับการจัดสรรค่าเผื่อ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นเพียงแค่การศึกษาเป็นแนวทางสำหรับโรงงานตัวอย่างเท่านั้น เพราะแต่ละโรงงานต้องนำไปประยุกต์ใช้เองตามความเหมาะสม

<u>การจัดสรรค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุด</u>



ต้นทุนโดยรวม : ขอบข่ายจำกัด :

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 \qquad T_{tot} = T_1 + T_2 + T_3 \quad [\text{Worst Case}]$$

$$= \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2} \quad [\text{Statistical}]$$

<u>รูปที่ 1.6.1.2</u> แสดงการจัดสรรค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับต้นทุนที่ต่ำที่สุด

คำอธิบายรูปที่ 1.6.1.2 เป็นการแสดงให้เข้าใจถึงแนวคิดสำหรับการหาค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยทำการยกตัวอย่างการประกอบชิ้นส่วนประกอบสามชิ้นส่วนมาเป็นตัวอย่างในการอธิบาย โดยที่ C_1 , C_2 และ C_3 เป็นฟังก์ชั่นต้นทุนการผลิตที่สัมพันธ์กับค่าเผื่อของชิ้นส่วนที่ 1, ชิ้นส่วนที่ 2 และชิ้นส่วนที่ 3 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับ

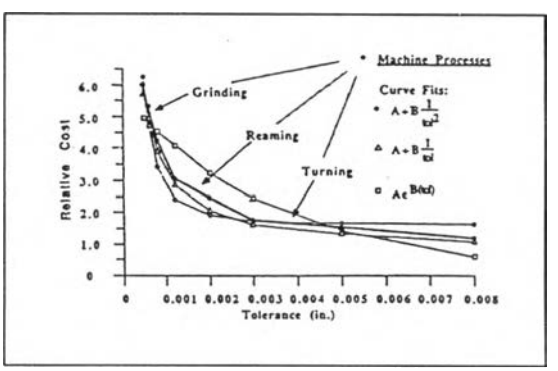
ค่าเผื่อก็ต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องในสมการฟังก์ชั่นต้นทุนค่าเผื่อ C = A + B/Tol โดยที่ A และ B คือ ค่าคงที่, C คือ ต้นทุนการผลิต และ Tol คือ ค่าเผื่อ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าเผื่อจะแปรผกผันกับต้นทุนการผลิตเป็นรูปแบบสมการไม่เป็นเส้นตรงสอดคล้องตามรูปดังกล่าว

จากการวิจัยที่ศึกษานั้นมีรูปแบบสมการต้นทุนอยู่ 3 แบบหลักทั่วไปที่พบ ดังตารางที่ 1.6.1.1 และผลจากการเปรียบเทียบพบว่ารูปแบบ Reciprocal เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน ซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ 1.6.1.3 [7]

ตารางที่ 1.6.1.1 แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ฟังก์ชั่นต้นทุนกับค่าเผื่อ

รูปแบบต้นทุน		*ผู้วิจัย*
Reciprocal	$A + B / tol$	Chase & Greenwood [5]
Reciprocal Squared	$A + B / tol^2$	Spotts [8]
Exponential	$A e^{B(Tol)}$	Speckhart [9]

การสรุปผลลัพธ์ที่เกิดจากรูปที่ 1.6.1.3 นั้นเป็นผลการศึกษาของ Jamieson [6] โดยทดลองทำการศึกษากระบวนการขจัดเนื้อโลหะหลายกระบวนการอันได้แก่ การขัดรู, การกลึง, การเจียระไน, การคว้านรู, การไส, การกัด และการเจาะ ในชิ้นส่วนหลายชนิด ต่อจากนั้นก็ได้นำรูปแบบความสัมพันธ์ฟังก์ชั่นต้นทุนกับค่าเผื่อทั้งสามรูปแบบจากตารางที่ 1.6.1.1 มาทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย แล้วทำการสรุปผลที่เกิดขึ้นว่าเส้นโค้งค่าเผื่อรูปแบบ Reciprocal นั้นเหมาะสมกับกระบวนการทางเครื่องจักรกลมากที่สุด



รูปที่ 1.6.1.3 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบฟังก์ชั่นต้นทุนกับค่าเผื่อ

ในปี ค.ศ. 1997 Jeang ได้กล่าวว่าการออกแบบค่าเผื่อที่ได้พัฒนามาในแนวทางเดียวกันนั้นมีอยู่ 2 วิธี คือ การสูญเสียคุณภาพ (Quality Loss) และการพิจารณาต้นทุนการผลิต โดยงานวิจัยการสูญเสียคุณภาพสามารถดูได้จาก Taguchi *et al.* (1989), Kapur (1989) และ Fathi (1990) ส่วนวิธีการพิจารณาต้นทุนการผลิตสามารถดูได้จากงานวิจัยของ Speckhart (1972), Spotts (1973) และ Chase *et al.* (1990) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ข้อแตกต่างระหว่าง 2 วิธีที่ได้กล่าวมา คือ แต่ละวิธีจะพิจารณาเฉพาะแนวทางของตนเองเท่านั้น สำหรับการสูญเสียคุณภาพจะพิจารณาถึงความสูญเสียหลังจากที่ขายไปให้ลูกค้าแล้วโดยความสูญเสียนั้นเบี่ยงเบนไปจากเป้าหมายเท่าใด ส่วนการพิจารณาต้นทุนการผลิตจะเป็นกรณีที่พิจารณาก่อนขายให้ลูกค้า ดังนั้น Jeang จึงเสนอแนวทางใหม่โดยปรับค่าเผื่อเพื่อที่จะให้สมดุลกันระหว่างการสูญเสียคุณภาพและต้นทุนการผลิต สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์จะประยุกต์เข้ากับรูปแบบ NTB, STB, LTB และ ALF ของฟังก์ชั่นการสูญเสียคุณภาพ [1]

และในปีเดียวกัน Fathi *et al.* ได้เสนอบทความแสดงวิธีการหาทางเลือกขั้นตอนการผลิตและการสร้างค่าเผื่อโดยยกกรณีศึกษาขึ้นมา โดยผลสรุปที่ผู้วิจัยต้องการว่าจะสรุปทางเลือกไหนดีกว่ากัน ก็ใช้ผลสรุปเดียวกันกับงานวิจัยฉบับนี้คือ การหาค่าเผื่อที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด

แต่กระนั้นก็ตามการจะได้มาถึงผลสรุปในความเป็นจริงไม่ง่ายเหมือนกรณีการศึกษาที่แสดงให้เห็น สิ่งที่ต้องรู้อย่างกระจ่างชัดก่อนก็คือ สิ่งที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน เช่น ต้นทุนในการจัดเตรียมปรับตั้งเครื่องจักร, ต้นทุนอุปกรณ์ที่ติดตั้งแล้ว (Fixturing), และต้นทุนการเปลี่ยนเครื่องมือเป็นต้น [18]

1.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับต้นทุน

ในปี พ.ศ. 2536 เพียงจันทร์ จริงจิตร ได้ทำการศึกษาระบบข้อมูลต้นทุนการผลิต เพื่อการควบคุมต้นทุนในอุตสาหกรรมผลิตร่ม เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดของโรงงานตัวอย่าง จากนั้นทำการปรับปรุงและจัดระบบเอกสารที่ใช้เก็บข้อมูลและวิเคราะห์โครงสร้างของต้นทุนการผลิต เพื่อช่วยในการลดและควบคุมต้นทุนการผลิตให้ผลผลิตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการควบคุมต้นทุนการผลิตควบคุมด้วยการควบคุมการเบิกจ่ายวัสดุ การลงทุน เอกสาร และโปรแกรมโลตัส 1-2-3 (Lotus 1-2-3) ในขณะเดียวกันข้อสนเทศต่างๆ สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริหารในระดับต่างๆ ได้ด้วย [41]

ในปี พ.ศ. 2538 กิ่งกนก พิทยานุคุณและคณะ ได้แต่งหนังสือแนะนำหลักเกณฑ์วิธีการพร้อมทั้งยกตัวอย่างวิธีการบันทึกข้อมูลขั้นต้นเกี่ยวกับการผลิต การรวบรวมข้อมูล การคำนวณต้นทุนการผลิต เพื่อให้นำไปปรับใช้ให้เหมาะกับวิธีการผลิตสินค้าของกิจการที่เกี่ยวข้อง อีกทั้ง

อธิบายถึงเทคนิคการนำข้อมูลต้นทุนไปใช้ เพื่อการตัดสินใจวางแผนและควบคุมของฝ่ายบริหาร ด้วย [38]

ในปี พ.ศ. 2539 เจริญเทพ สิริปัญญาทิพย์ ได้ทำการศึกษาพัฒนาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการหาต้นทุนมาตรฐานในโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องเพชรพลอย โปรแกรมประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใช้ในการคำนวณและส่วนที่ใช้เป็นฐานข้อมูล ทั้งด้านการผลิตของโรงงานและฐานข้อมูลด้านต้นทุนมาตรฐาน ซึ่งทั้งสองส่วนถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual FoxPro Version 5.0 บน Microsoft Window 95 โดยผลการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ สามารถลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการกำหนดต้นทุนมาตรฐาน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับต้นทุนมาตรฐานวัตถุดิบ ต้นทุนมาตรฐานค่าแรงงานและต้นทุนมาตรฐานค่าใช้จ่ายการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้บริหารในการบริหารงานควบคุม [36]

ในปี พ.ศ. 2540 วันชัย ริจิรวนิช และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน ได้เขียนหนังสือขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนของวิชา *การวิเคราะห์ต้นทุนอุตสาหกรรมและงบประมาณ (Industrial Cost Analysis and Budgeting)* โดยมีการครอบคลุมเนื้อหาด้านการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตการใช้ต้นทุนเพื่อการตัดสินใจ รวมทั้งการจัดทำงบประมาณและการวิเคราะห์งบการเงิน [37]