บทที่ 4

การนำข้อมูลที่รวบรวมได้ไปใช้

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ในบทที่ 3 จะนำข้อมูลดังกล่าวไปสู่การสร้างแบบจำลองของปัญหา โดยมุ่งประเด็นปัญหาไปในส่วนของการเปลี่ยนแปลงจำนวนแพลเลตในสายการผลิตให้มีจำนวนน้อยที่สุด เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตผลหรือผลลัพธ์ของแบบจำลองที่มากที่สุด

4.1 สมมุติฐานในการจำลองแบบปัญหา

สำหรับขอบเขตของการจำลองแบบปัญหาจะอยู่ภายใต้สมมุติฐานดังนี้ คือ

4.1.1 การจำลองแบบปัญหานี้จะเริ่มต้นตั้งแต่พนักงาน 1 เริ่มนำแผ่นวงจรไฟฟ้า วางลงบนแพลเลต แล้วนำแผ่นแพลเลตปล่อยลงยังสายพานลำเลียง (โดยไม่รวมเวลาเตรียมการ / ปรับแต่งเครื่องจักรให้อยู่ในสภาพพร้อมทำงาน)

4.1.2 การจำลองแบบปัญหานี้จะให้ค่าเริ่มต้นของจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งในเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เท่ากับจำนวนเต็มมาตรฐานของบรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆ

4.1.3 การจำลองแบบปัญหานี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียเวลาของคนเนื่องจากกระทำการกิจกรรมอื่นๆ ใดนอกจากงานที่ได้กำหนดไว้

4.1.4 การจำลองแบบปัญหานี้จะไม่คำนึงถึงการสูญเสียเวลาของเครื่องจักรเนื่องจากการหยุดของเครื่องจักรในกรณีใดๆ นอกจากงานที่ได้กำหนดไว้

4.1.5 การจำลองแบบปัญหานี้ กำหนดให้มีแผ่นวงจรไฟฟ้าตั้งต้นมากพอที่จะทำการผลิตต่อหนึ่งครั้งการผลิต

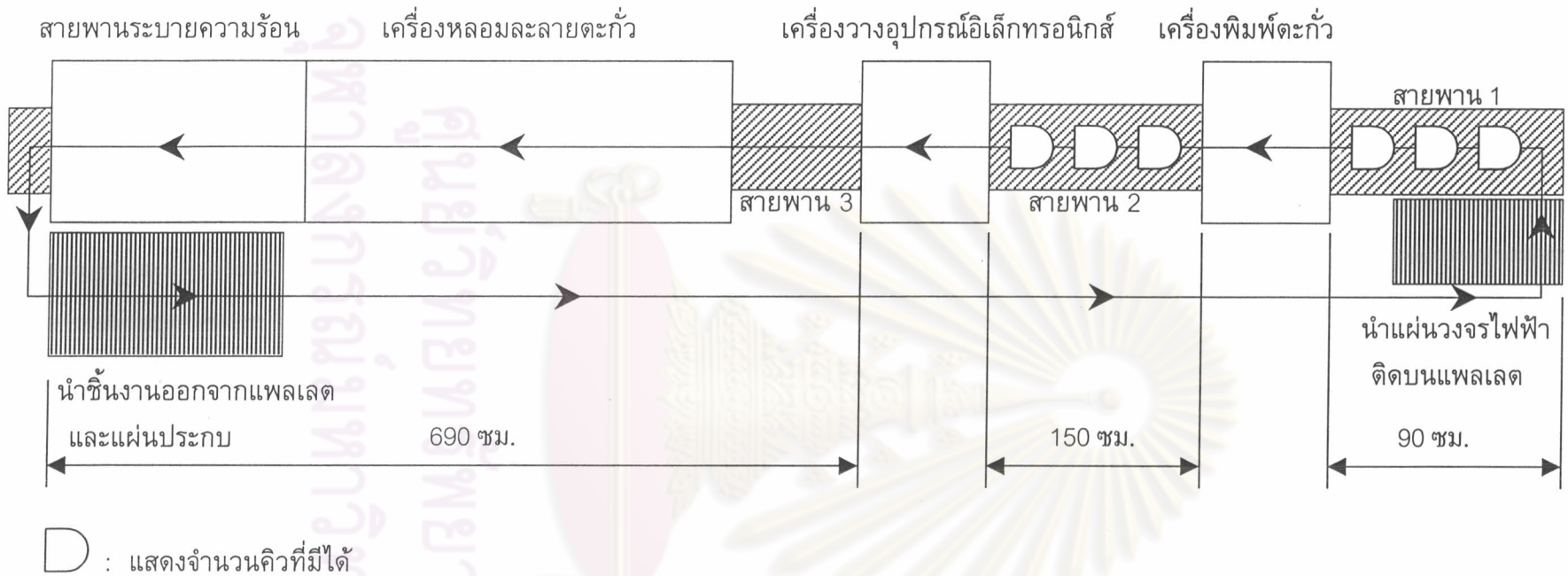
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การกำหนดข้อมูลในแบบจำลอง

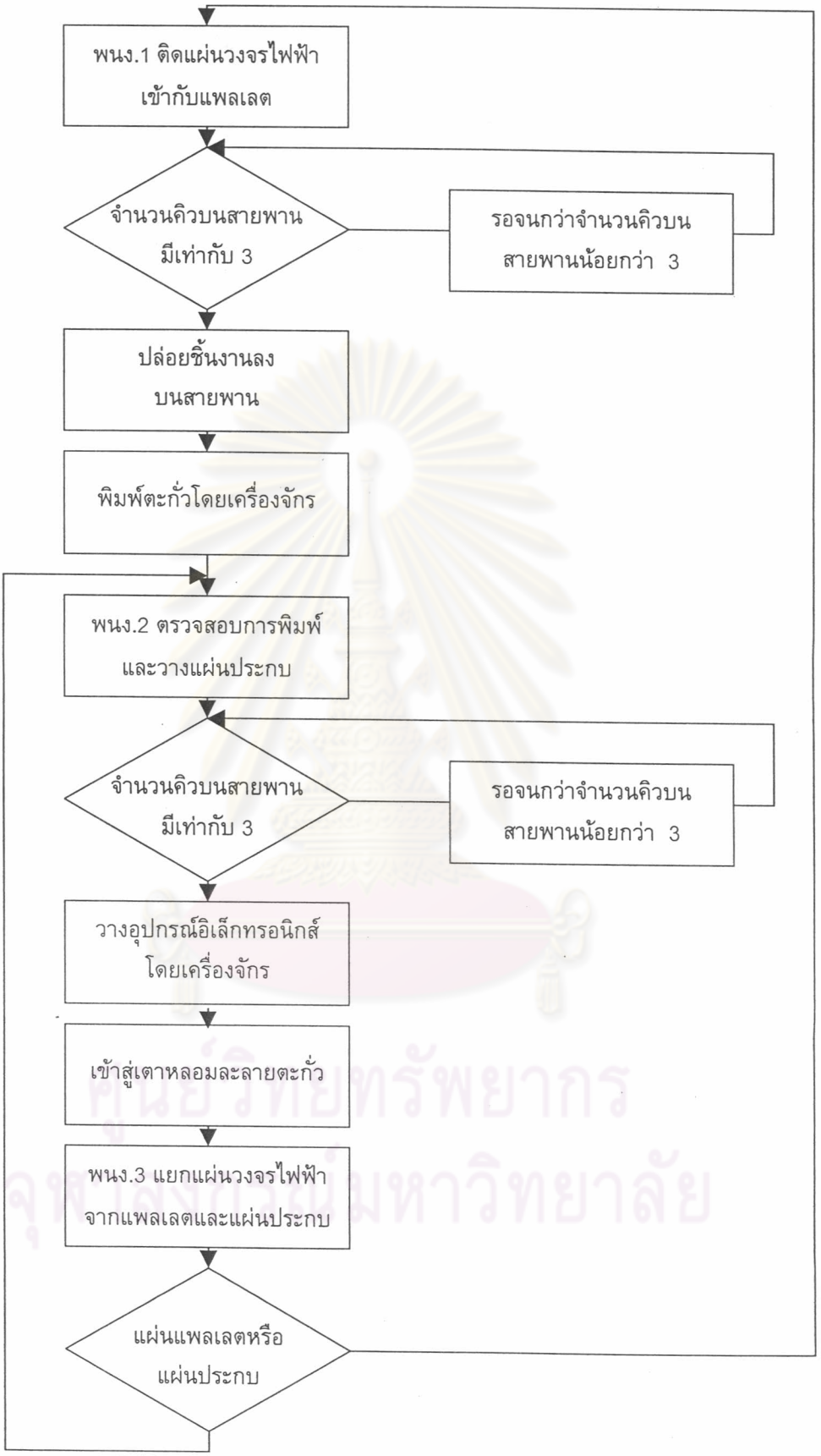
หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ถึงข้อมูลที่จำเป็นในแบบจำลองในหัวข้อ 3.2 แล้วนั้น ต่อไปก็จะเป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวที่สรุปเป็นตารางที่ 3.23 นั้นมาใส่ในแบบจำลองที่สร้างขึ้น ซึ่งแบบจำลอง จะหมายถึง ตัวแทนของวัตถุ ระบบ หรือแนวคิดที่เลียนแบบปัญหาจากระบบงานจริง เพื่อสามารถทำให้ได้เหมือนระบบงานจริงมากที่สุด และสามารถนำไปใช้แทนระบบงานจริงได้เลย แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถสร้างแบบจำลองปัญหา ให้เหมือนกับระบบงานจริงได้ทั้งหมด ซึ่งได้กำหนดเป็นสมมติฐานดังหัวข้อ 4.1 ไว้แล้วเพื่ออย่างน้อยแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจะได้เทียบเคียงหรือเหมือนกับระบบงานจริงมากที่สุด

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงถึงการไหลของแผ่นแพลเลต ซึ่งเป็นตัวแปรที่เราสนใจกำลังศึกษาอยู่ โดยเราจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ARENA ทำหน้าที่จำลองการทำงานของกระบวนการประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้า โดยได้เขียนแผนภูมิขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.2 ขึ้นมาเพื่อเป็นการแสดงลำดับ ขั้นตอนต่างๆ ของการทำงานของระบบ (การไหลของแผ่นแพลเลต) จากนั้นได้นำแผนภูมิขั้นตอนการทำงานที่เขียนขึ้นมาสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ARENA ซึ่งการจำลองแบบปัญหาดังกล่าวยังคงเน้นการจำลองที่ทำให้ได้ผลิตผลมากที่สุดในขณะที่ต้องใช้จำนวนแพลเลตในสายการประกอบน้อยที่สุด ซึ่งแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมสำเร็จรูป ARENA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

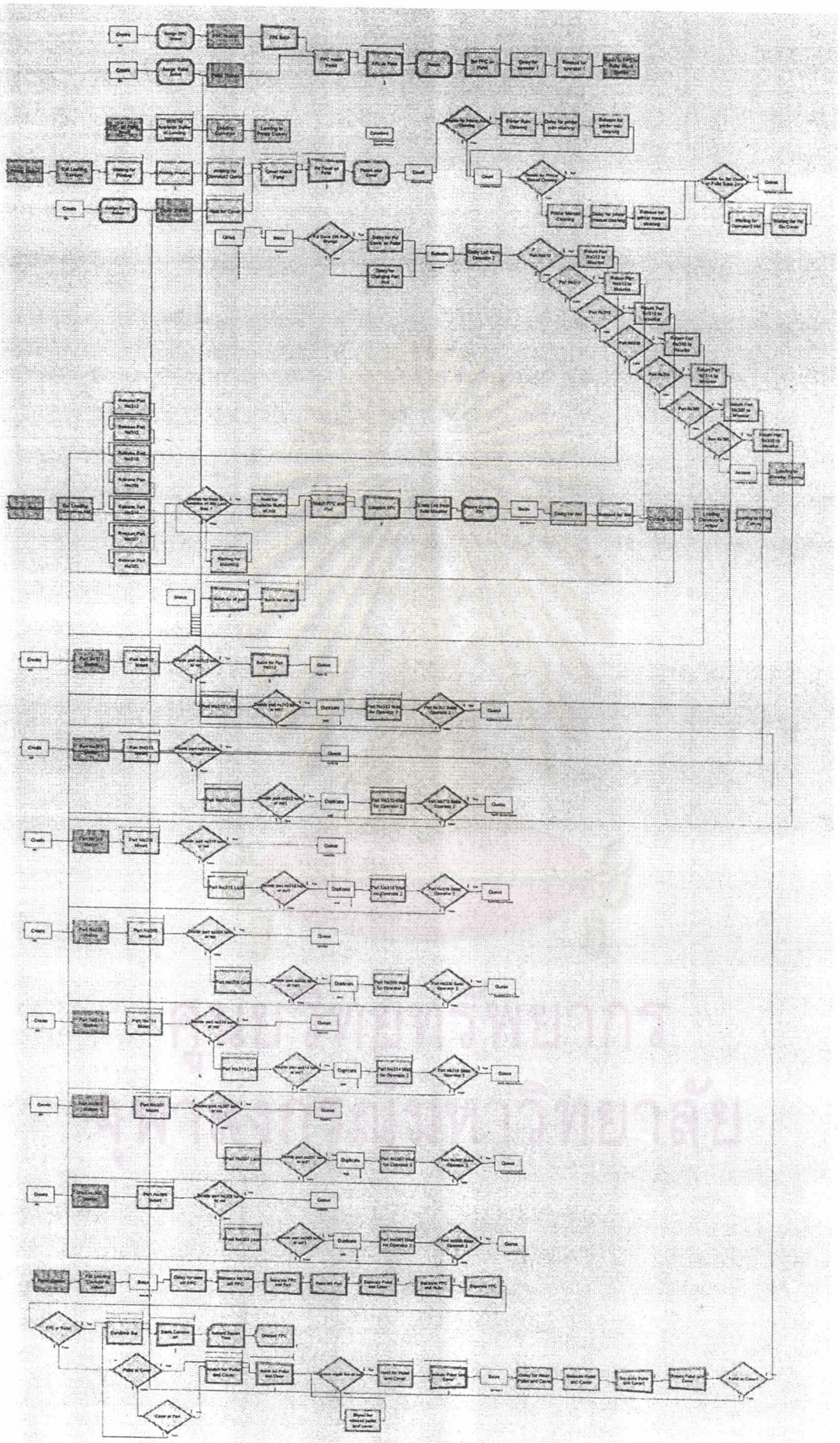


รูปที่ 4.1 แสดงการไหลของแผ่นแพลเลต



รูปที่ 4.2 แผนภูมิขั้นตอนการทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรมสำเร็จรูป ARENA

4.3 การทดลองของแบบจำลอง

ก่อนจะหาคำตอบจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมสำเร็จรูป ARENA ดังแบบจำลองรูปที่ 4.3 นั้นมารู้จักกับตัวแปรต่างๆ ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรได้ ซึ่งในแบบจำลองดังกล่าวมีทั้งหมด 5 ค่าตัวแปรด้วยกันอันได้แก่

1) ความเร็วของแปรงปาดตะกั่ว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.3 ว่า เวลาในการพิมพ์ตะกั่วนั้นจะประกอบไปด้วย เวลาที่ชิ้นงานไหลเข้าและออกจากเครื่องพิมพ์ตะกั่วรวมกับเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ตะกั่ว ซึ่งเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ตะกั่วนี้เองจะแปรผันตรงกับความเร็วของแปรงปาดตะกั่ว ซึ่งสามารถปรับค่าความเร็วได้ตั้งแต่ 0 ~ 250 มม./ วินาที แต่จากการสอบถามถึงผู้เชี่ยวชาญทางด้านนี้ในโรงงานกรณีศึกษาถึง ช่วงความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้อยู่ปัจจุบัน โดยไม่ทำให้เกิดงานเสีย ว่าอยู่ในช่วงใด ซึ่งก็ได้รับคำตอบจากประสบการณ์มาว่า ค่าความเร็วของแปรงปาดที่ใช้อยู่ปัจจุบันจะอยู่นช่วงความเร็วแปรงปาดต่ำกว่า 100 มม./ วินาที เพราะเคยใช้ค่าความเร็วที่สูงกว่านี้แล้วทำให้ ปริมาณตะกั่วที่พิมพ์ลงบนชิ้นงานไม่สมบูรณ์ จึงนำช่วงค่าความเร็วของแปรงปาดที่ทางผู้เชี่ยวชาญบอกนำมาเป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ARENA ที่ได้สร้างขึ้นต่อไป

ฉะนั้นเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ตะกั่วที่จะนำค่าไปใส่ในแบบจำลอง จะเกิดจากการรวมกันของ เวลาที่ชิ้นงานไหลเข้าและออกจากเครื่องพิมพ์ตะกั่ว โดยรูปแบบการกระจายที่ได้จากการวิเคราะห์ไปแล้วในบทที่ 3 คือ TRIA(25.1,26.2,26.7) และเวลาในการปาดตะกั่ว ซึ่งระยะปาดตะกั่วของชิ้นงานจะเท่ากับ 250 มม. (ความยาวของแผ่นแพลเลต) ฉะนั้นการคำนวณเวลาในการปาดตะกั่ว สามารถคำนวณได้จาก ระยะปาดตะกั่ว (มม.) / ความเร็วของแปรงปาดตะกั่ว (มม./วินาที) โดยที่เวลาในการปาดตะกั่วของแต่ละค่าความเร็วของแปรงปาดตะกั่วสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 โดยตารางที่ 4.1 จะใช้ความเร็วของแปรงปาดตะกั่วทุกๆ ค่าที่ห่างกันช่วงละ 10 มม./ วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 เวลาในการพิมพ์ตะกั่วเมื่อมีค่าความเร็วแปรงปาดต่าง ๆ

ความเร็วแปรงปาด (มม./วินาที)	เวลาในการพิมพ์ตะกั่ว (วินาที)	ความเร็วแปรงปาด (มม./วินาที)	เวลาในการพิมพ์ตะกั่ว (วินาที)
10	25	60	4.17
20	12.5	70	3.57
30	8.33	80	3.125
40	6.25	90	2.78
50	5	100	2.5

2) ความถี่ในการทำความสะอาดด้านใต้แผ่นสกรีนต่อจำนวนครั้งในการพิมพ์ตะกั่วแบบอัตโนมัติ ซึ่งความถี่ที่ดีที่สุดก็น่าจะเป็นการพิมพ์ตะกั่ว 1 ครั้งต่อการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีน 1 ครั้งเช่นกัน แต่ในความเป็นจริงนั้นอาจจะเสียเวลาเพราะอาจจะทำให้กระบวนการพิมพ์ตะกั่วนี้เองเป็นกระบวนการคอขวดไปเสีย ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการผลิตลดลง หรือความถี่ในการทำความสะอาดอาจจะมากกว่า 1 ครั้งแต่ยังคงไม่ทำให้เกิดงานเสียอยู่ ซึ่งสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการผลิตนี้ในโรงงานกรณีศึกษาพบว่า ความถี่ในการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนอัตโนมัตินั้น ไม่ควรเกิน 5 แพลเลตต่อการทำความสะอาด 1 ครั้ง

3) ความถี่ในการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนต่อจำนวนครั้งในการพิมพ์ตะกั่วด้วยมือ ซึ่งการทำความสะอาดด้วยมือนี้เอง เป็นการเสริมหรือเพิ่มการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนแบบอัตโนมัติให้มีความถี่มากยิ่งขึ้น เนื่องจากการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนแบบอัตโนมัติไม่เพียงพอที่จะทำให้ใต้แผ่นสกรีนสะอาดได้ จึงต้องมีการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนด้วยมือเพิ่มเข้าไปด้วย ฉะนั้นความถี่ในการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีน จึงไม่มีการกำหนดตายตัวว่าความถี่ควรจะเป็นเท่าใด แต่ควรจะกำหนดความถี่นี้ให้มากพอที่จะกำหนดได้

4) การกำหนดจำนวนแผ่นแพลเลตที่ต้องนำไปใช้ใหม่ในต้นสายการประกอบแต่ละครั้ง โดยเมื่อพนักงาน 3 ได้ทำการถอดแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ทำการประกอบแล้วออกจากแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบแล้ว จะต้องนำแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบดังกล่าวไปคืนยังต้นสายการผลิต

เพื่อจะนำไปใช้ใหม่ โดยในการนำไปคืนแต่ละครั้งจะมีการกำหนดจำนวนแพลเลตไว้ด้วย ซึ่งตัวแปรนี้มีผลสำคัญต่อการคำนวณจำนวนแพลเลตในสายการประกอบ เพราะว่าถ้าการนำไปคืนต้นสายการประกอบในแต่ละครั้งมีแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบเป็นจำนวนมาก อาจจะเป็นผลดีคือความถี่ในการเดินของพนักงาน 3 ลดลง แต่ผลที่ตามมาคือ จะต้องมีจำนวนแพลเลตในสายการประกอบมากตามขึ้นด้วย แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีการนำแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบไปคืนยังต้นสายการประกอบเป็นจำนวนน้อย ความถี่ในการเดินของพนักงาน 3 ย่อม มากขึ้น แต่ทำให้จำนวนแพลเลตในสายการประกอบลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ไม่ได้หมายความว่า การนำแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบที่มีจำนวนน้อยไปคืนยังต้นสายการประกอบจะดีเสมอไป เพราะต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมด้วย เพราะอาจจะเป็นไปได้ที่การการนำแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบทีมีจำนวนน้อยไปคืนยังต้นสายการประกอบ อาจจะทำให้ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการคอขวด ซึ่งทำให้มีผลต่อความสามารถในการผลิตลดลงนั่นเอง

5) จำนวนแพลเลตและแผ่นประกบที่ใช้ทั้งหมดในสายการผลิต โดยจำนวนของทั้งสองนี้จะถูกกำหนดไว้ตอนเริ่มแรกของการทดลอง โดยระบุไว้ในจำนวนแพลเลตและจำนวนแผ่นประกบตั้งต้นก่อนเริ่มทำการจำลองผล โดยควรจะระบุจำนวนแพลเลตและแผ่นประกบเท่ากันในแบบจำลอง เพราะถ้ากำหนดไม่เท่ากันก็หมายความว่าจำนวนที่มากกว่าอีกชนิดหนึ่งก็จะไม่ใช้ให้เกิดประโยชน์ในแบบจำลองเลย และการกำหนดจำนวนแพลเลตและแผ่นประกบที่เหมาะสมในแบบจำลองจะต้องคำนึงถึงว่าจำนวนดังกล่าวไม่ทำให้การทำงานในแบบจำลองต้องเกิดการรอคอยจำนวนแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบ หรือ ต้องไม่กำหนดจำนวนให้มากเกินไป โดยจำนวนที่เกิดจะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดในแบบจำลอง

สำหรับความเร็วของสายพาน 1 และสายพาน 2 นั้น จะถูกตั้งค่าให้เป็นความเร็วของสายพานที่เร็วที่สุด คือ 780 ซม./ นาที เพื่อเราต้องการได้ผลของแบบจำลองที่ทำให้ผลผลิตมากที่สุดในขณะที่มีจำนวนแพลเลตในสายการผลิตน้อยที่สุดนั่นเอง ส่วนสายพาน 3 และสายพานระบายความร้อน จะถูกตั้งค่าคงที่ให้เท่ากับความเร็วของเครื่องหลอมละลายตะกั่ว คือ 105 ซม./ นาที ก็เนื่องจากจะได้ไม่มีปัญหาที่ทำให้ชิ้นงานที่อยู่บนแผ่นแพลเลตเคลื่อนตัวระหว่างช่วงต่อของสายพานทั้งสาม

4.4 ผลจากแบบจำลอง

หลังจากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ARENA ก็ทำการแทนค่าตัวแปรทั้ง 4 จากหัวข้อ 4.3 เพื่อทำให้จำนวนแพลเลตในสายการผลิตทั้งหมดน้อยที่สุดโดยมีจำนวนผลผลิตมากที่สุดนั้น มีขั้นตอนในการหาคำตอบของการทดลองดังกล่าวดังนี้

1) เริ่มแทนค่าเวลาที่เกิดจากความเร็วของแปรงปาดตะกั่วที่ 100 มม./ นาที ลงในแบบจำลอง เนื่องจากเวลาดังกล่าวเป็นเวลาเร็วสุดที่เครื่องพิมพ์ตะกั่วสามารถทำได้ และไม่ก่อให้เกิดกระบวนการคอขวดที่กระบวนการพิมพ์ตะกั่ว

2) แทนค่าจำนวนแพลเลตและจำนวนแผ่นประกบที่คาดว่าจะเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ โดยอาศัยจากการคาดเดา โดยในที่นี้จะเริ่มจากจำนวนเท่ากับ 23 แผ่น

3) แทนค่าจำนวนแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบที่ต้องนำไปใช้ใหม่ในต้นสายการประกอบแต่ละครั้ง ลงในแบบจำลอง โดยเริ่มแทนค่าจำนวนที่คาดว่าจะเป็นไปได้คือ 1 แผ่น หมายความว่าหลังจากที่พนักงาน 3 แยกชิ้นงานออกจากแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบแล้ว จะนำแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบนั้นไปคืนยังต้นสายการผลิตเลย

4) กำหนดว่าไม่มีการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนแบบอัตโนมัติ

5) กำหนดว่าไม่มีการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนด้วยมือ

จากนั้นพิจารณาค่า %Utilization ของแหล่งทรัพยากรทั้งหมดว่า ทรัพยากรใดเป็นจุดคอขวด โดยดูจากค่า %Utilization ที่มากที่สุดก็คือจุดที่เป็นคอขวด โดยจากกระบวนการดังกล่าวจุดที่เป็นคอขวดควรจะเป็นกระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากกระบวนการนี้ไม่สามารถมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใดๆ ทั้งสิ้น หลังจากการพิจารณาแล้วถ้าเห็นว่าแหล่งทรัพยากรเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่มี %Utilization ที่มากที่สุด ก็ให้ลองเปลี่ยนตัวแปรในทิศทางเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นตอนข้อ 2) 3) 4) และ 5) ตามลำดับ ซึ่งตารางที่ 4.2 เป็นตารางซึ่งแสดงตัวอย่างการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้ความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่ 100 มม./ วินาที มีจำนวนแพลเลตที่น้อยที่สุดในขณะที่มีจำนวนผลผลิตมากที่สุด โดยกำหนดเวลาในการจำลองผลอยู่ที่ 5 ชั่วโมง เนื่องจากจำนวนชั่วโมงดังกล่าวเป็นเวลาที่โรงงานกรณีศึกษามักใช้บ่อยในการผลิตครั้งหนึ่งๆ

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของแบบจำลองที่ความเร็วแปรงปาดตะกั่ว 100 มม./ วินาที

จำนวน Pallet	จำนวน Return	ความถี่ AC	ความถี่ MC	จำนวนผลผลิต	% Utilization				
					พนง.1	พนง.2	พนง.3	Printer	AM
23	1	-	-	1,956	56.30%	55.12%	96.81%	53.81%	72.81%
23	2	4	-	2,700	77.52%	76.52%	95.21%	93.39%	99.25%
23	2	5	-	2,706	77.50%	76.38%	95.65%	89.53%	99.31%
23	2	5	15	2,694	80.61%	76.56%	94.60%	96.51%	98.90%
23	2	5	18	2,700	80.16%	76.53%	94.40%	94.40%	98.99%
23	2	5	20	2,706	80.09%	76.56%	94.95%	95.75%	99.24%
24	2	4	-	2,712	77.74%	76.73%	96.13%	93.61%	99.41%
24	2	4	7	2,670	83.78%	75.43%	94.06%	99.53%	98.02%
24	2	4	8	2,688	83.66%	76.03%	95.15%	99.24%	98.70%
24	2	4	9	2,700	83.25%	76.59%	94.80%	98.99%	99.23%
24	2	4	10	2,700	82.65%	76.26%	95.74%	98.61%	99.20%
24	2	4	11	2,700	81.99%	76.25%	95.89%	97.97%	99.27%
24	2	4	12	2,700	81.59%	76.71%	94.91%	97.51%	99.27%
24	2	4	13	2,700	81.59%	76.49%	95.29%	97.55%	99.27%
24	2	4	14	2,706	81.19%	76.60%	95.52%	97.24%	99.30%
24	2	4	15	2,712	81.09%	76.81%	95.86%	96.98%	99.37%
24	2	4	16	2,712	80.49%	76.57%	95.03%	96.68%	99.38%
25	2	5	15	2,712	81.27%	76.68%	95.65%	97.12%	99.38%

จำนวน Pallet หมายถึง จำนวนแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบที่ใช้ในสายการผลิตทั้งหมด

จำนวน Return หมายถึง จำนวนแพลเลตและแผ่นประกบที่ต้องกลับนำไปใช้ใหม่ยังต้นสายการผลิต

ความถี่ AC หมายถึง ความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนแบบแบบอัตโนมัติ (จำนวนแพลเลต/ครั้ง)

ความถี่ MC หมายถึง ความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ (จำนวนแพลเลต/ครั้ง)

จำนวนผลผลิต หมายถึง จำนวนผลิตที่ได้จากการจำลองผลที่เวลา 5 ชั่วโมง

พนง.1 หมายถึง แหล่งทรัพยากรพนักงาน 1

พนง.2 หมายถึง แหล่งทรัพยากรพนักงาน 2

พนง.3 หมายถึง แหล่งทรัพยากรพนักงาน 3

Printer หมายถึง แหล่งทรัพยากรเครื่องพิมพ์ตะกั่ว

AM หมายถึง แหล่งทรัพยากรเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากตารางที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นว่าเริ่มต้นเมื่อแทนค่าด้วยจำนวนแพลเลตและแผ่นประกบในแบบจำลองและแทนค่าจำนวนที่จะต้องนำแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบกลับไปคืนยังต้นสายสายผลิตเท่ากับ 1 แผ่น โดยไม่มีการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนใดๆ จะเห็นว่า %Utilization ของพนักงาน 3 มีมากกว่าแหล่งทรัพยากรอื่นๆ นั้นก็หมายความว่าพนักงาน 3 เป็นจุดคอขวด อาจเนื่องมาจากที่เรากำหนดให้จำนวนคืนต่อครั้งของแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบไปยังต้นสายการผลิตน้อยเกินไป จากนั้นก็ได้ลองเพิ่มจำนวนคืนต่อครั้งของแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบไปยังต้นสายการผลิตให้มากขึ้น และลองเปลี่ยนค่าความถี่การทำความสะอาดใต้สกรีนทั้งแบบอัตโนมัติและด้วยมือดู ผลปรากฏว่า %Utilization เปลี่ยนเป็นเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และได้เงื่อนไขของจำนวนแพลเลตและแผ่นประกบทั้งหมด 23 แผ่นในสายการผลิตที่ดีที่สุดอยู่สองเงื่อนไขที่ทำให้ได้ผลผลิต 2,706 ชิ้นคือที่มีจำนวนคืนแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบต่อครั้งไปยังต้นสายการผลิตเท่ากันคือ 2 แผ่น และความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติเท่ากันคือ 5 แผ่นต่อครั้ง แต่ในขณะที่เงื่อนไขหนึ่งไม่ให้มีการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ กับอีกเงื่อนไขกำหนดให้มีความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือเท่ากับ 20 แผ่นต่อครั้ง แต่เนื่องจากถ้านับจำนวนครั้งในการทำความสะอาดทั้งหมดแล้ว เงื่อนไขที่กล่าวมาเป็นลำดับสองมีจำนวนครั้งในการทำความสะอาดมากกว่า จึงเป็นเงื่อนไขที่ควรถูกเลือก ณ ตอนนี้ เนื่องจากการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยความถี่มากเท่าใด ก็จะทำให้เกิดงานเสียเนื่องจากการพิมพ์ตะกั่วน้อยเท่านั้น และจากเงื่อนไขนี้ลองพิจารณาถึง %Utilization ที่มากที่สุดคือจุดที่เป็นคอขวดคือกระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือมีค่าเท่ากับ 99.41% ก็หมายความว่า แบบจำลองนี้จะสามารถให้ผลผลิตมากที่สุดด้วย %Utilization ของกระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มากกว่ากว่าหรือใกล้เคียงค่านี้

ฉะนั้นลองเปลี่ยนค่าจำนวนแพลเลตและแผ่นประกบทั้งหมดในสายการผลิตจาก 23 แผ่นเป็น 24 แผ่น และลองเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ ดู ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.2 และลองพิจารณาดูเงื่อนไขที่ทำให้ได้ผลผลิตสูงสุดคือ 2,712 ชิ้นคือเงื่อนไขที่มีจำนวนคืนแผ่นแพลเลตและแผ่นประกบต่อครั้งไปยังต้นสายการผลิตเท่ากันคือ 2 แผ่น และความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติเท่ากันคือ 4 แผ่นต่อครั้ง แต่ในขณะที่เงื่อนไขหนึ่งไม่ให้มีการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ กับอีกสองเงื่อนไขที่กำหนดให้ความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกีนด้วยมือเท่ากับ 15 และ 16 แผ่นต่อครั้งตามลำดับ แต่เนื่องจากถ้านับจำนวนครั้งในการทำความสะอาดทั้งหมด

แล้ว เงื่อนไขที่กล่าวมาเป็นลำดับสอง คือมีความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 15 แผ่นต่อครั้ง มีจำนวนครั้งในการทำความสะอาดมากที่สุด จึงเลือกเงื่อนไขนี้ และถ้าสังเกตดูจำนวนผลิตผล 2,712 ชิ้นเป็นจำนวนที่มากที่สุดที่สายการผลิตนี้จะทำได้ด้วย ก็เนื่องจากประการแรกถ้าเราเพิ่มความถี่ในการทำความสะอาดด้วยมือให้มากกว่า 15 แผ่นต่อครั้ง และประการที่สองคือเพิ่มจำนวนแผ่นแพลเลตในสายการผลิตให้มากกว่า 24 แผ่น ก็จะได้จำนวนผลผลิตเท่าเดิมคือ 2,712 ชิ้น โดยสังเกตค่า %Utilization ของเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งไม่สามารถทำให้ %Utilization ดังกล่าวมีค่ามากกว่าไปนี้ได้แล้ว จึงสรุปว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ผลผลิตมากที่สุดของเงื่อนไขความเร็วแปรงปาดตะกั่ว 100 มม./ วินาที คือมีความถี่ในการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนแบบอัตโนมัติ 4 แพลเลตต่อครั้ง และความถี่ในการทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีนด้วยมือเท่ากับ 15 แพลเลตต่อครั้ง โดยมีจำนวนแพลเลตและแผ่นประกบที่ต้องนำกลับไปใช้ใหม่ยังต้นสายการผลิตคราวละ 2 แพลเลตต่อครั้ง

จากนั้นได้นำวิธีทดลองดังกล่าวเพื่อจะหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วตั้งแต่ที่ความเร็ว 10 ~ 90 มม./ วินาที ซึ่งในการทดลองจำลองผลจะกำหนดเวลาในการทดลองผลคือที่ 5 ชั่วโมงเท่ากัน และได้สรุปออกมาเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่ว (รวมถึงค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่ว 100 มม./ วินาที ที่ได้ทดลองไปแล้ว) ดังตารางที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงเงื่อนไขที่ทำให้มีจำนวนแพลเลตในสายการผลิตน้อยที่สุด และมีผลผลิตมากที่สุด

จำนวนแพลเลตทั้งหมดในสายการผลิต	จำนวนคืนแพลเลตยังต้นสายการผลิต	ความเร็วในการพิมพ์ตะกั่ว (มม./วินาที)	ความถี่การทำความสะอาดอัตโนมัติ (จน.แพลเลตต่อครั้ง)	ความถี่การทำความสะอาดด้วยมือ (จน.แพลเลตต่อครั้ง)	จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ชิ้น)
24	2	100	4	15	2,712
24	2	90	4	18	2,712
24	2	80	4	19	2,712
24	2	75	4	21	2,712
24	2	70	5	12	2,712
24	2	60	5	14	2,712
24	2	50	5	25	2,712
24	2	40	5	-	2,706
23	2	30	5	-	2,580

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าเงื่อนไขของความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่ทำให้มีผลผลิตมากที่สุดคือ 100, 90, 80, 70, 60 และ 50 มม./ วินาที และสังเกตปริมาณผลผลิตที่ได้จากแบบจำลองที่ความเร็วแปรงปาดตะกั่วน้อยกว่า 50 มม./ วินาที จะเห็นว่ามีค่าลดลง ก็เนื่องจากค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่ต่ำกว่า 50 มม./ วินาที จะทำให้ %Utilization มากสุดที่เครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เปลี่ยนมาเป็นที่เครื่องพิมพ์ตะกั่ว (เนื่องจากความเร็วการพิมพ์ลดลง) ทำให้เป็นการย้ายจุดคอขวด เป็นผลทำให้สายการผลิตนี้ไม่สามารถให้ผลผลิตได้มากที่สุด ฉะนั้นเรานำเงื่อนไขที่มีความเร็วแปรงปาดตะกั่วมากกว่าหรือเท่ากับ 50 มม./ วินาที ไปพิจารณาต่อไป

จากตารางที่ 4.3 นั้นเป็นเพียงบางค่าของตัวแปรที่ลองแทนเข้าไปในแบบจำลอง โดยบางค่าของตัวแปรดังกล่าวก็คือค่าความเร็วของแปรงปาดตะกั่วที่ห่างกันช่วงละ 10 และค่าความเร็วของแปรงปาดตะกั่วค่ากึ่งกลางระหว่างค่าความเร็วสูงสุดและต่ำสุดที่ทำให้มีจำนวนผลผลิตมากที่สุด โดยตัวแปรตัวอื่นจะเป็นตัวแปรตาม ทำให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงอาจจะมีค่าตัวแปรอื่นอีกหลายเงื่อนไขที่ให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเหมือนกัน (แต่ที่นี้ไม่ได้นำมาแสดงทุกเงื่อนไขที่เป็นไปได้) แต่ทุกเงื่อนไขที่ทำให้ได้ปริมาณผลิตผลมากที่สุดในขณะที่มีจำนวนแพลเลตในสายการผลิตน้อยที่สุดนั้น ไม่ได้หมายความว่าจำนวนผลิตผลทั้งหมดนั้นจะอยู่

ในรูปของงานดี ซึ่งงานเสียที่เกิดขึ้นนั้นถือเป็นว่าเป็นค่าใช้จ่ายชนิดหนึ่งที่ทำให้มีต้นทุนเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่างานเสียดังกล่าวจะสามารถซ่อมได้ก็ตาม ฉะนั้นเราจึงต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดต่อสายการผลิตที่ทำให้มีปริมาณงานเสียน้อยที่สุด จึงต้องทำการทดลองเพื่อดูผลของเงื่อนไขดังกล่าวต่อไป

4.5 นำผลจากแบบจำลองมาทดลองทางวิศวกรรม

จากตารางที่ 4.3 สามารถแบ่งตัวแปรที่อาจจะมีผลต่ออัตรางานเสียที่เกิดขึ้นได้อยู่ 2 ตัวแปรหลัก ได้แก่ ความเร็วของแปรงปาดตะกั่ว (มม./ วินาที) และจำนวนครั้ง (ความถี่) ในการทำความสะอาดใต้สกรีน (ซึ่งจำนวนครั้งในการทำความสะอาดใต้สกรีน หมายถึง การทำความสะอาดใต้สกรีนทั้งแบบอัตโนมัติและด้วยมือ เพราะทั้งสองตัวแปรมีจุดประสงค์เหมือนกัน คือการทำความสะอาดใต้สกรีน) ส่วนตัวแปรตัวอื่น เนื่องจากเราไม่ได้เปลี่ยนแปลงจึงสันนิษฐานทำให้ไม่มีผลต่ออัตรางานเสีย หรือถ้ามีผลก็มีในอัตรางานเสียที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้ง 2 ตัวคือความเร็วของแปรงปาดตะกั่ว และความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีน ฉะนั้นจึงนำ 2 ปัจจัยดังกล่าวมาทดลองทางวิศวกรรมเพื่อทดสอบว่าความเร็วของแปรงปาดตะกั่วและจำนวนครั้ง (ความถี่) ในการทำความสะอาดใต้สกรีนมีอันตรกิริยากันหรือไม่ โดยการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งหมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยสำหรับกรณีที่เราจะศึกษานั้น จะเป็นกรณี 2 ปัจจัย โดยกำหนดให้ปัจจัยความเร็วแปรงปาดตะกั่ว (A Treatment) ประกอบไปด้วย 5 (a) ระดับ (ซึ่งจะอธิบายต่อไป) และปัจจัยความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีน (B Treatment) ประกอบด้วย 5 (b) ระดับ ฉะนั้นในการทดลอง 1 เรพลิเคต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด 5x5 = 25 (n) การทดลอง แต่ในการทดลองครั้งนี้กำหนดการทดลองเป็น 2 เรพลิเคต (ซึ่งจะอธิบายต่อไป) และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน โดยผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ซึ่งในที่นี้หมายถึงจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง และสำหรับความหมายของงานเสียที่จะทำการเก็บข้อมูลต่อไปนั้น จะหมายถึง งานเสียที่เป็นงานสำเร็จที่ออกมาจากเครื่องหลอมละลายตะกั่ว นั่นก็หมายความว่า ชิ้นงานได้ผ่านเครื่องพิมพ์ตะกั่ว และผ่านมายังเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และผ่านออกมาจากเครื่องหลอมละลายตะกั่ว ซึ่งงานเสียนี้ได้แก่ ปริมาณตะกั่วที่ชิ้นงานน้อยกว่าปกติ ปริมาณตะกั่วที่ชิ้น

งานมากกว่าปกติ ตะกั่วที่มีพื้นที่ติดกันเชื่อมต่อเข้าหากัน (ตะกั่วซ็อต) เท่านั้น เพื่อจะวัดผลของเครื่องพิมพ์ตะกั่วเพียงอย่างเดียว

จากเงื่อนไขค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่เป็นไปได้คือค่าตั้งแต่ 50 ~ 100 มม./วินาที โดยเราไม่สามารถที่จะทดลองผลของเงื่อนไขดังกล่าวได้ทั้งหมด จึงทดสอบกับความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เพื่อที่จะครอบคลุมหรือหาความสัมพันธ์ได้คือ ระดับสูง (100 มม./ วินาที) ระดับค่อนข้างสูง (90 มม./ วินาที) ระดับกลาง (75 มม./ วินาที) ระดับค่อนข้างต่ำ (60 มม./ วินาที) และระดับต่ำ (50 มม./ วินาที) กับจำนวนครั้ง (ความถี่) ในการทำความสะอาดใต้กรีนที่แตกต่างกัน 5 ระดับเช่นกันคือ ความถี่สูงที่การทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 4 แพลเลตต่อครั้งกับการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 15 แพลเลตต่อครั้ง ความถี่ค่อนข้างสูงที่การทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 4 แพลเลตต่อครั้งกับการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 18 แพลเลตต่อครั้ง ความถี่กลางที่การทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 4 แพลเลตต่อครั้งกับการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 21 แพลเลตต่อครั้ง ความถี่ค่อนข้างต่ำที่การทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติ 5 แพลเลตต่อครั้งการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 14 แพลเลตต่อครั้ง และความถี่ต่ำที่การทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 5 แพลเลตต่อครั้งกับการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 25 แพลเลตต่อครั้ง โดยทำการออกแบบการทดลองแบบสุ่มบริบูรณ์ และแบ่งการทดลองเพื่อหาจำนวนงานเสียออกเป็นเงื่อนไขละ 2 เรพลิเคต เรพลิเคตละ 25 แพลเลต (150 ชิ้นงาน) ซึ่งจำนวนย่อยของการทดลองในแต่ละเรพลิเคตที่ถูกกำหนดให้เท่ากับ 25 แพลเลตนั้น ก็เนื่องมาจากเงื่อนไขที่มีความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือต่ำสุดคือ 25 แพลเลต ฉะนั้นจึงกำหนดจำนวนนี้เป็นจำนวนย่อยของการทดลองในแต่ละ Replicate เพื่อให้ครอบคลุมถึงเงื่อนไขการทดลองทุกเงื่อนไข และที่กำหนดจำนวนการทดลองของแต่ละเงื่อนไขเป็น 2 เรพลิเคต นั้น ก็เนื่องมาจากว่า ทางโรงงานกรณีศึกษาให้เวลาสำหรับการทดลองนี้เพียง 1 วันเท่านั้น (รวมกะเช้าและกะดึก) ฉะนั้นจึงต้องเก็บข้อมูลให้ได้มากที่สุดที่เป็นไปได้ และเมื่อคำนวณดูเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแบบสุ่มบริบูรณ์มื่อกำหนดการทดลองของแต่ละเงื่อนไขๆ ละ 2 เรพลิเคต ซึ่งคิดเวลาคร่าวๆ ว่าแต่ละแพลเลตจะใช้เวลาประมาณ 40 วินาที หรือ 0.7 นาที (ได้มาจากเวลาของกระบวนการคอขวดคือกระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์) ฉะนั้นมี 5 ตัวแปร โดยแต่ละเงื่อนไขต้องทดลอง 25 เพลเลตและเงื่อนไขละ 2 เรพลิเคต ฉะนั้นเวลาที่ใช้โดยประมาณทั้งหมด คือ 5x5x25x2x0.7 = 875 นาที หรือประมาณ 14.5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่ยังสามารถทดลองได้ แต่ถ้ากำหนดเป็น 3 เรพลิเคต จะเกิน 1 วันที่ทางโรงงานกรณีศึกษากำหนดให้ ฉะนั้นการทดลองนี้กำหนดให้หาจำนวนงานเสียของทั้ง 5 ตัวแปรแบบการทดลองสุ่มบริบูรณ์ โดยแบ่งการทดลองเพื่อหาจำนวนงานเสียออกเป็น 2 เรพลิ

เคต และ เรพลิเคตละ 25 แพลเลต ซึ่งลำดับของการสุ่มบริบูรณ์ของข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และผลของการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 : แสดงลำดับการสุ่มบริบูรณ์ของข้อมูล

ลำดับที่	ความเร็วแปรงปาด (มม./ วินาที)	ความถี่การทำความสะอาด (แพลเลตต่อครั้ง)
1	75	AC=4, MC=15
2	50	AC=4, MC=18
3	50	AC=4, MC=15
4	50	AC=5, MC=14
5	75	AC=5, MC=25
6	50	AC=5, MC=14
7	90	AC=4, MC=15
8	90	AC=5, MC=25
9	50	AC=4, MC=15
10	60	AC=5, MC=25
11	100	AC=5, MC=14
12	90	AC=4, MC=21
13	75	AC=4, MC=21
14	100	AC=4, MC=21
15	90	AC=4, MC=18
16	75	AC=5, MC=14
17	100	AC=4, MC=18
18	75	AC=4, MC=15
19	100	AC=4, MC=21
20	75	AC=4, MC=18
21	50	AC=4, MC=21
22	60	AC=4, MC=18
23	50	AC=4, MC=18
24	100	AC=4, MC=15
25	90	AC=4, MC=15

ลำดับที่	ความเร็วแปรงปาด (มม./ วินาที)	ความถี่การทำความสะอาด (แพลเลตต่อครั้ง)
26	100	AC=4, MC=18
27	90	AC=5, MC=25
28	75	AC=4, MC=21
29	90	AC=5, MC=14
30	100	AC=4, MC=15
21	90	AC=4, MC=18
32	75	AC=5, MC=14
33	100	AC=5, MC=25
34	60	AC=5, MC=14
35	60	AC=4, MC=15
36	75	AC=5, MC=25
37	100	AC=5, MC=14
38	75	AC=4, MC=18
39	100	AC=5, MC=25
40	50	AC=5, MC=25
41	60	AC=5, MC=14
42	50	AC=5, MC=25
43	60	AC=5, MC=25
44	60	AC=4, MC=21
45	60	AC=4, MC=18
46	90	AC=4, MC=21
47	60	AC=4, MC=15
48	60	AC=4, MC=21
49	50	AC=4, MC=21
50	90	AC=5, MC=14

AC : การทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ

MC : การทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงจำนวนงานเสียต่อชิ้นงาน 150 ชิ้นที่ความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนค่าต่าง ๆ 5 ระดับ

ความเร็วแปรงปาด (มม./วินาที)	ความถี่ (จำนวนครั้ง) ในการทำความสะอาดใต้สกรีน									
	AC=4 MC=15		AC=4 MC=18		AC=4 MC=21		AC=5 MC=14		AC=5 MC=25	
100	3	3	3	4	4	4	4	4	2	5
90	2	3	1	3	2	3	2	4	2	3
75	3	2	2	2	2	3	3	3	2	3
60	4	3	4	3	4	4	5	4	4	5
50	5	5	6	5	6	4	5	7	5	6

AC : การทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติ MC : การทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ

จากจำนวนงานเสียที่ได้จากการทดลองแบบสุ่มบริบูรณ์ ของที่ความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนตามตารางที่ 4.5 นั้น นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังกล่าวจะเป็นการวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการแยกความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดออกเป็นความแปรปรวนย่อยเพื่อการตัดสินใจ โดยสามารถสรุปวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบตัวแบบอิทธิพลคงที่ (Fixed Effects Model) ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปรแบบตัวแบบอิทธิพลคงที่

แหล่งแปรผัน	ผลรวมกำลังสอง	องศาความอิสระ	ความแปรปรวน	F_0
A Treatment	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B Treatment	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
อันตรกิริยา	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
ความผิดพลาด	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
ผลรวม	SS_T	$abn-1$		

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a} y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_B = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b} y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หรือ $SS_E = SS_T - SS_{Subtotals}$

โดยที่ i หมายถึง ระดับที่ (i = 1, 2, ..., a) ของปัจจัย A

j หมายถึง ระดับที่ (j = 1, 2, ..., b) ของปัจจัย B

k หมายถึง จำนวนเรพลิเคต (k = 1, 2, ..., n)

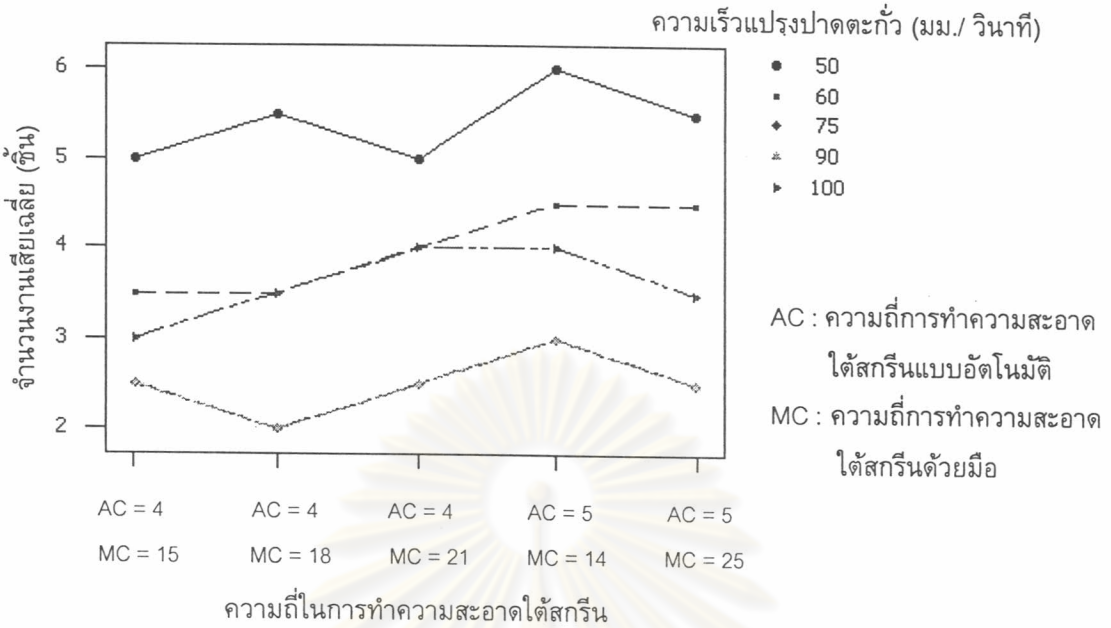
ฉะนั้นจากการทดลองที่เก็บข้อมูลจากตารางที่ 4.5 นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองสรุปได้ดังตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของจำนวนงานเสียระหว่างความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีน

แหล่งแปรผัน	ผลรวมกำลังสอง	องศาความอิสระ	ความแปรปรวน	F_0	P-Value
ความเร็วแปรงปาด	58.20	4	14.55	19.14	<0.001
ความถี่ทำความสะอาด	4.40	4	1.10	1.45	0.248
อันตรกิริยา	2.40	16	0.15	0.20	0.999
ความผิดพลาด	19.00	25	0.76		
ผลรวม	84.00	49			

จากค่าของ F ภายใต้ความน่าจะเป็น 0.05 ที่มากกว่าค่าที่กำหนด จะได้ว่าที่ $F_{0.05,16,25} = 2.074$ ฉะนั้น ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 5% อันตรกิริยาระหว่างความเร็วของแปรงปาดตะกั่วกับความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนไม่มีนัยสำคัญ (เพราะว่า $F_0 = 0.20 < 2.074$ หรือพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งเท่ากับ 0.999 > 0.05) ก็สามารถสรุปได้เหมือนกันว่าที่ระดับความมีนัยสำคัญ 5% อันตรกิริยาระหว่างความเร็วของแปรงปาดตะกั่วกับความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 4.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์จำนวนงานเสียระหว่างความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีน

จากรูปที่ 4.4 เป็นการพล็อตกราฟระหว่างการทดลองร่วมปัจจัยแต่ละจุดระหว่างความเร็วแปรงปาดตะกั่วกับความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนและจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นจากปัจจัยร่วมทั้งสอง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเลยว่า เส้นกราฟที่เกิดขึ้นไม่มีการตัดกันของเส้นในแต่ละปัจจัย ซึ่งก็เป็นการยืนยันคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่คำนวณดังตารางที่ 4.7 ว่า ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 5% อันตรกิริยาระหว่างความเร็วของแปรงปาดตะกั่วที่อยู่ระหว่าง 50 ~ 100 มม./ วินาที กับความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนที่มีความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 4 ~ 5 แพลเลตต่อครั้งและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 14 ~ 25 แพลเลตต่อครั้ง ไม่มีนัยสำคัญ

ในเมื่อความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน จึงทำการรวมความผันแปรของอิทธิพลของความเร็วการพิมพ์ตะกั่วกับความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนเข้าด้วยกัน ด้วยการลดรูปของ ANOVA ซึ่งสามารถคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อปัจจัยทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน สรุปได้เป็นตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อปัจจัยทั้งสองไม่มีอัตรากิริยาต่อกัน

แหล่งแปรผัน	ผลรวมกำลังสอง	องศาความอิสระ	ความแปรปรวน	F_0
A Treatment	SS_A	A – 1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B Treatment	SS_B	B – 1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
ความผิดพลาด	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B$	abn-a-b+1	$MS_E = \frac{SS_E}{abn-a-b+1}$	
ผลรวม	SS_T	abn - 1		

ฉะนั้นนำผลจากการทดลองที่เก็บข้อมูลจากตารางที่ 4.5 นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองโดยให้ปัจจัยทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาต่อกันสรุปได้ดังตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของจำนวนงานเสียโดยความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน

แหล่งแปรผัน	ผลรวมกำลังสอง	องศาความอิสระ	ความแปรปรวน	F_0	P-Value
ความเร็วแปรงปาด	58.20	4	14.55	27.88	<0.001
ความถี่ทำความสะอาด	4.40	4	1.10	2.11	0.097
ความผิดพลาด	21.40	41	0.522		
ผลรวม	84.00	49			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากค่าของ F ภายใต้ความน่าจะเป็น 0.05 ที่มากกว่าค่าที่กำหนด จะได้ว่าที่ $F_{0.05,4,41} = 2.606$ ฉะนั้น ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 5% ผลหลักที่เกิดจากความเร็วแปรงปาดตะกั่วมีผลอย่างมีนัยสำคัญ (เพราะว่า $F_0 = 27.88 > 2.606$ หรือพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05) ในขณะที่ความถี่ของการทำความสะอาดใต้สกรีนที่มีความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 4 ~ 5 แพลเลตต่อครั้งและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 14 ~ 25 แพลเลตต่อครั้ง ไม่มีนัยสำคัญ (เพราะว่า $F_0 = 2.11 < 2.606$ หรือพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งเท่ากับ 0.097 > 0.05) ซึ่งก็หมายความว่าผลหรือจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นจากความถี่ของการทำความสะอาดใต้สกรีนในช่วงที่มีความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ 4 ~ 5 แพลเลตต่อครั้งและความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 14 ~ 25 แพลเลตต่อครั้ง ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 5% ไม่มีความแตกต่าง

ถึงแม้ว่าความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนในช่วงค่าดังกล่าวจะไม่มีผลกับจำนวนเสีย แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าจะใช้ค่าความถี่ในช่วงค่าดังกล่าวกับแบบจำลองได้ทุกค่า ก็เนื่องมาจากถ้าเราใช้ค่าความถี่ในการทำสะอาดที่มากไปกับความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่ไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้เปลี่ยนจุดคอขวดจากกระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาเป็นกระบวนการพิมพ์ตะกั่วแทน ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตน้อยกว่าที่ควรจะผลิตได้ ฉะนั้นในการกำหนดค่าความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีน ควรจะกำหนดให้มีความถี่ที่เหมาสมที่ไม่ทำให้เปลี่ยนจุดคอขวด (ซึ่งอาจจะใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.2 เป็นตัวหาความถี่ที่เหมาะสม) หรือกำหนดไปเลยว่าให้ค่าความถี่ในการทำความสะอาดใต้กรีนแบบอัตโนมัติเป็น 5 แพลเลตต่อครั้งและค่าความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือเป็น 25 แพลเลตต่อครั้ง สำหรับทุกค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วตั้งแต่ 50 ~ 100 มม./ วินาที

4.6 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)

ในการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลต้องเริ่มจากการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลว่าเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติที่มีค่าความแปรปรวนคงที่หรือไม่ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) โดยส่วนตกค้างสำหรับแบบจำลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยคือ

$$\varepsilon_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk}$$

และเนื่องจากว่าค่าของ $\hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{ij.}$ (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการสังเกตในเซลล์ที่ ij) ดังนั้นจึงเปลี่ยนสมการใหม่เป็น

$$\varepsilon_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ijk}$$

ฉะนั้นจากข้อมูลตามตารางที่ 4.5 สามารถเขียนส่วนตกค้างของจำนวนงานเสีย ดังแสดงในตารางที่ 4.10

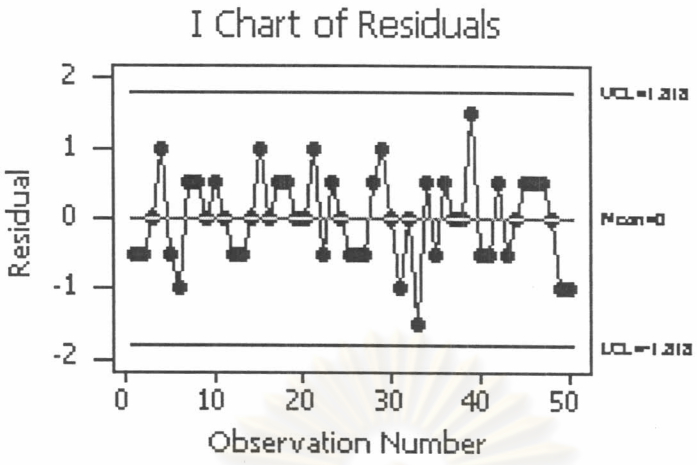
ตารางที่ 4.10 แสดงส่วนตกค้างของจำนวนงานเสีย

ความเร็วแปรงปาด (มม./วินาที)	ความถี่ (จำนวนครั้ง) ในการทำความสะอาดใต้สกรีน									
	AC=4 MC=15		AC=4 MC=18		AC=4 MC=21		AC=5 MC=14		AC=5 MC=25	
100	0	0	-0.5	+0.5	0	0	0	0	-1.5	+1.5
90	-0.5	+0.5	-1	+1	-0.5	+0.5	-1	+1	-0.5	+0.5
75	+0.5	-0.5	0	0	-0.5	+0.5	0	0	-0.5	+0.5
60	+0.5	-0.5	+0.5	-0.5	0	0	+0.5	-0.5	-0.5	+0.5
50	0	0	+0.5	-0.5	+1	-1	-1	1	-0.5	+0.5

AC : การทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติ MC : การทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ

4.6.1 พิจารณาจาก I Chart

I Chart เป็นการพล็อตกราฟระหว่างลำดับในการสุ่มของข้อมูลกับส่วนตกค้าง เพื่อดูลักษณะสุ่มภายใต้พิกัดควบคุมหรือไม่ ซึ่งจากข้อมูลลำดับการสุ่มข้อมูลตามตารางที่ 4.4 และค่าส่วนตกค้างของแต่ละข้อมูลการสุ่มดังค่าในตารางที่ 4.10 สามารถพล็อตกราฟออกเป็นดังรูปที่ 4.6

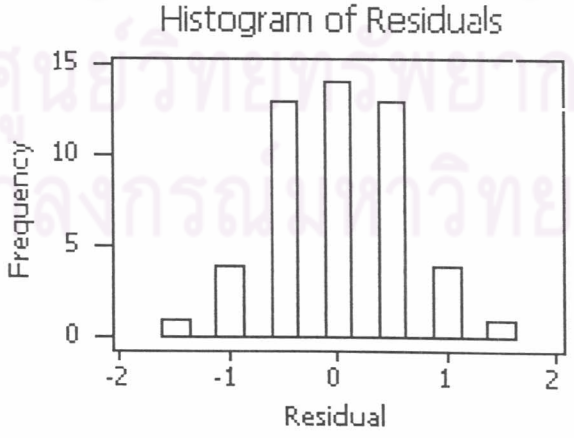


รูปที่ 4.5 แผนภูมิ I Chart

จากกราฟรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งหมด 50 ข้อมูลมีลักษณะสุ่มภายใต้พิกัดควบคุม

4.6.2 *พิจารณาจากฮีสโตแกรมของส่วนตกค้าง*

การพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างและความถี่ของค่าส่วนตกค้างนั้น แสดงให้เห็นถึงการกระจายของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ ซึ่งจากข้อมูลส่วนตกค้างดังตารางที่ 4.10 สามารถนำมาพล็อตฮีสโตแกรมได้ดังรูปที่ 4.6

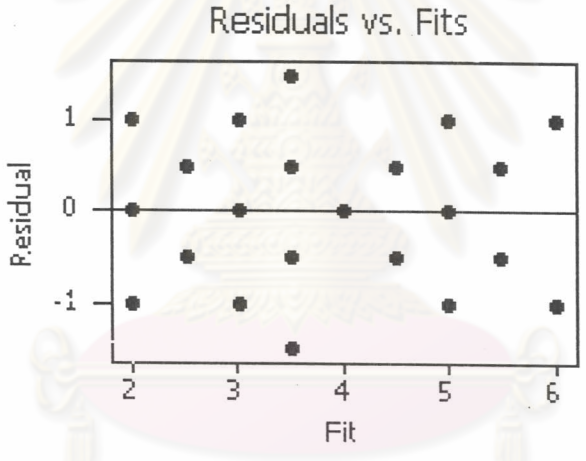


รูปที่ 4.6 แสดงฮีสโตแกรมของส่วนตกค้าง

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการกระจายของข้อมูลนั้นมีลักษณะเป็นรูปทรงระฆังคว่ำ แสดงว่าการกระจายข้อมูลเป็นแบบปกติ แต่ที่ไม่ค่อยเห็นการกระจายชัดเจนจากกราฟฮีสโตแกรมมากนักก็เพราะ ข้อมูลที่เราเก็บมาเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ ฉะนั้นจึงไม่ค่อยมีความหลากหลายมากนัก

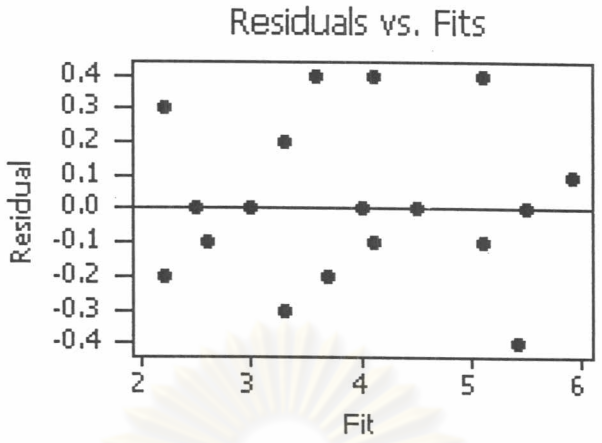
4.6.3 พิจารณาจากการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าฟิต

ค่าฟิต ก็คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการสังเกตในเซลล์ ที่ ij ก็คือค่า $\hat{y}_{ijk}$ และการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าฟิตนั้น จะเป็นการพิจารณาว่าข้อมูลในแต่ละตัวแปรมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์หรือไม่ ซึ่งจากข้อมูลสามารถพล็อตส่วนตกค้างกับค่าฟิตได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 : แสดงการพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าฟิต

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอยู่รอบค่าศูนย์อย่างสม่ำเสมอ และการกระจายของข้อมูลดังกล่าวไม่มีแนวโน้มอย่างเห็นชัด ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าข้อมูลจึงมีการกระจายแบบปกติ และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว แสดงให้เห็นว่าตัวแปรความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่การทำความสะอาดใต้แผ่นสกรีน ไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นได้ด้วยกราฟเช่นกัน โดยถ้าเป็นของแบบจำลองสองปัจจัยแบบไม่มีอันตรกิริยานั้น ค่าฟิตคือ $\hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}$ และส่วนตกค้างคือค่า $\hat{y}_{ij.} - \bar{y}_{ijk}$ (ค่าเฉลี่ยของเซลล์ลบด้วยค่าฟิตของเซลล์นั้น) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

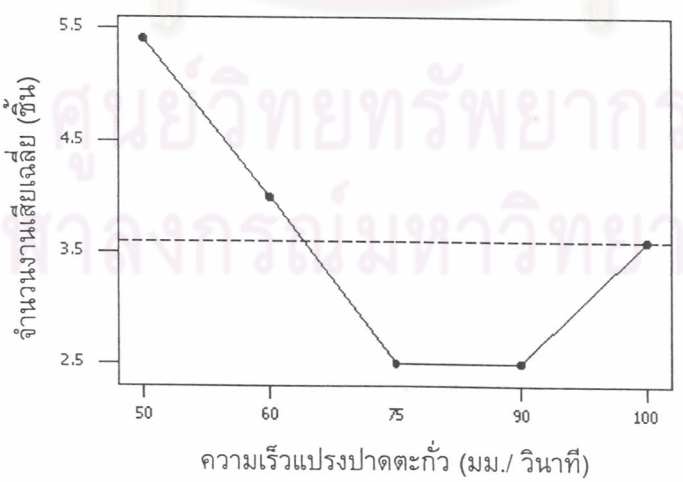


รูปที่ 4.8 แสดงการพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าฟิต กรณีสองปัจจัยไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน

จากรูปที่ 4.8 จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะกราฟที่ไม่แสดงถึงรูปแบบแนวโน้มใดๆ ซึ่งก็เป็นแสดงให้เห็นถึงว่าตัวแปรทั้งสองอันได้แก่ความเร็วแปรงปาดตะกั่วและความถี่การทำความสะอาดใต้สกรีนไม่มีอันตรกิริยาต่อกันนั่นเอง

4.7 การสร้างแบบจำลองการถดถอย

จากหัวข้อ 4.6 ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแล้วความเร็วแปรงปาดตะกั่วเป็นผลหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมัชฌิมจำนวนงานเสียกับความเร็วแปรงปาดตะกั่ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งจากรูปที่ 4.9 เป็นเพียงความเร็วของแปรงปาดตะกั่วเพียงบางค่าเท่านั้น ที่มีผลโดยตรงกับจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้น แต่เราต้องการทราบถึงค่าของความเร็วของแปรงตะกั่วที่มีผลทำให้เกิดงานเสียน้อยที่สุด จึงต้องมาใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ซึ่งการวิเคราะห์การถดถอย หมายถึง กลวิธีทางสถิติหนึ่งที่ใช้ในการวินิจฉัยและสร้างตัวแปรที่ให้ความสนใจ โดยค่าถดถอย จะหมายถึงจุดที่ข้อมูลมีแนวโน้มจะถดถอยเข้าหา ซึ่งจะมีความหมายเป็นค่าที่ควรจะเป็นของตัวแปรตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยการวิเคราะห์การถดถอยนี้จะได้มาจากการกำหนดตัวแปรอิสระ ที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจะเรียกตัวแปรตัวนี้ว่า ตัวถดถอย (Regressor) หรือตัวทำนาย (Predictor) ซึ่งในกรณีศึกษานี้ก็คือค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่ว และเมื่อกำหนดค่าของตัวแปรถดถอยค่าหนึ่งๆ แล้ว จะทำการศึกษาถึงค่าของตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม ซึ่งจะเรียกตัวแปรนี้ว่าตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ซึ่งในกรณีศึกษานี้ก็คือจำนวนงานเสีย

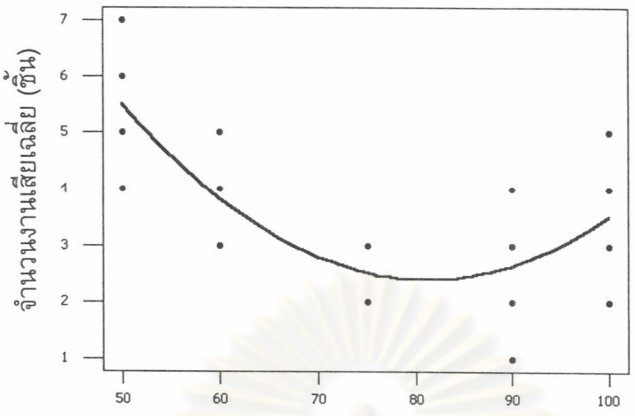
เทคนิคหนึ่งที่นำมาใช้ในการหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวทำนายและตัวแปรตอบสนองที่นิยมแพร่หลายก็คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) ซึ่งจะทำให้สมการที่สร้างขึ้นทำให้ค่าเบี่ยงเบนระหว่างข้อมูลจริงกับค่าที่พยากรณ์มีค่าน้อยที่สุด

สำหรับกรณีนี้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า รูปแบบสมการถดถอยที่จะสร้างขึ้นระหว่างความเร็วแปรงปาดตะกั่วกับจำนวนงาน จะต้องไม่เป็นความสัมพันธ์ลักษณะเชิงเส้นตรงอย่างแน่นอน ดังนั้นเราจะสร้างสมการถดถอยกำลังสองให้แก่ข้อมูลดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$$

โดยที่ β_0, β_1 และ β_2 คือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ต้องถูกประมาณ และ ε คือ ความผิดพลาดสุ่ม

ในการหาสมการถดถอยกำลังสองให้แก่ข้อมูลนี้ ปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปมากมายที่จะสามารถหาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก็ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ในการประมวลผล และสามารถแสดงสมการถดถอยกำลังสองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแปรงปาดตะกั่วกับจำนวนงานเสีย ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแปรงปาดกับจำนวนงานเสียในรูปแบบสมการถดถอย

จากรูปที่ 4.10 สามารถแสดงสมการถดถอยกำลังสองได้ดังนี้

จำนวนงานเสีย = 23.3702 – (0.516307 x ความเร็วแปรง) + (0.0031773 x ความเร็วแปรง^2)

จากสมการที่ได้นำมาทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวผลตอบ y (จำนวนงานเสีย) และตัวแปรถดถอย x หรือไม่ โดยสมมติฐานที่ใช้คือ

$$H_o : \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ for at least one j}$$

โดยสามารถสรุปวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 4.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

แหล่งแปรผัน	ผลรวมกำลังสอง	องศาความอิสระ	ความแปรปรวน	F_0
Regression	$SS_R = \hat{\beta}_1 S_{xy}$	k	$MS_R = \frac{SS_R}{k}$	$F_0 = \frac{MS_R}{MS_E}$
ความผิดพลาด	$SS_E = S_T - \hat{\beta}_1 S_{xy}$	n – k - 1	$MS_E = \frac{SS_E}{n-k-1}$	
ผลรวม	SS_T	n - 1		

โดยที่ $\hat{\beta}1 = \frac{Sxy}{Sxx}$

Sxx = ผลรวมกำลังสองของ x $= \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$

Sxy = ผลรวมของผลคูณระหว่าง x กับ y $= \sum_{i=1}^{n} y_i (x_i - \bar{x})$

k = จำนวนพจน์ของตัวแปรถดถอยที่แทนเข้าไปในสมการ

ฉะนั้นจากข้อมูลดังตารางที่ 4.5 และสมการถดถอยที่ได้ นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตาราง 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 : ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยระหว่างตัวถดถอยความเร็วแปรงปาดตะกั่วกับผลตอบจำนวนงานเสีย

แหล่งแปรผัน	ผลรวมกำลังสอง	องศาความอิสระ	ความแปรปรวน	F_0	P-Value
Regression	57.5422	2	28.7711	51.1095	<0.001
ความผิดพลาด	26.4578	47	0.5629		
ผลรวม	84.0000	49			

จากค่าของ F ภายใต้ความน่าจะเป็น 0.05 ที่มากกว่าค่าที่กำหนด จะได้ว่าที่ $F_{0.05,2,47} = 3.202$ แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลได้ค่า $F_0 = 51.1095$ ซึ่งมากกว่า 3.202 (หรือพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับความมีนัยสำคัญ 0.05 เช่นกัน) จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานด้วยระดับความมีนัยสำคัญ 0.05 ก็สรุปได้ว่า ความเร็วแปรงปาดตะกั่วสามารถอธิบายความผันแปรต่อจำนวนงานเสียได้

จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ R^2 (Coefficient of Determination) ซึ่งค่า R^2 นี้จะแสดงให้เห็นถึงการตัดสินใจว่าตัวแบบถดถอยนี้มีความถูกต้องมากน้อยเพียงไร จะขึ้นอยู่กับข้อมูลที่แสดงผลที่ว่าความผันแปรในตัวแปรตอบสนองสามารถอธิบายได้ด้วยข้อมูลตามตัดแบบถดถอยนั้นได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งค่า R^2 สามารถคำนวณได้จาก

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย}}{\text{ความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล}}$$

$$= \frac{SS_R}{S_T}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉะนั้นจากข้อมูลข้างต้นสามารถคำนวณหา R^2 = 68.5% แต่โดยทั่วไปแล้วเราจะใช้ค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้วมากกว่า เนื่องจากว่าการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ค่า R2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไปนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้ว สามารถคำนวณได้โดย

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p}\right)(1-R^2)$$

โดยที่ p คือดัชนีที่แสดงถึงจำนวนเทอมในตัวแบบถดถอย ซึ่งเท่ากับ 3 สำหรับสมการถดถอยดังกล่าว ฉะนั้น ค่า R^2 แบบปรับแล้ว ที่คำนวณได้ = 67.2% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่ากับ R^2 ตัวเดิม จะเห็นความแตกต่างกันไม่มากนัก แสดงให้เห็นถึงพจน์ที่เติมเข้าไปในสมการมีนัยสำคัญและข้อมูลมีจำนวนมากพอ ซึ่งค่า 67.2% ถือว่าเป็นค่าที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่านี้ได้ว่าความผันแปรของข้อมูลจำนวนงานเสียมีความสัมพันธ์กับความเร็วแปรงปาดตะกั่วในสมการถดถอยที่สร้างขึ้น เท่ากับ 67.2% โดยปริมาณที่เหลืออีก 32.8% ไม่สามารถอธิบายได้ว่ามาจากแหล่งความผันแปรใด แต่เนื่องจากค่า R^2 ที่คำนวณได้ไม่สูงมากนัก จึงใช้เพียงสมการถดถอยเพื่อดูแนวโน้มของจำนวนงานเสียที่น้อยที่สุด ว่าอยู่ในช่วงระยะความเร็วแปรงปาดตะกั่วใด

จากสมการถดถอยที่คำนวณได้ นำมาหา 10 ค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่ทำให้เกิดงานเสียน้อยที่สุดได้แก่ ช่วงความเร็วแปรงปาดตะกั่ว 77 ~ 86 มม./ วินาที ซึ่งทำให้เกิดจำนวนงานเสียเฉลี่ยประมาณ 2.40~ 2.47 ชิ้นจากจำนวนผลผลิต 150 ชิ้น หรือคิดเป็นอัตรางานเสียได้ 1.60% ~ 1.64% ซึ่งจะลองนำค่าความเร็วช่วงดังกล่าวไปทดสอบกับการทำงานจริงต่อไปเพื่อทดสอบถึงการนำไปใช้ได้ของสมการถดถอย

4.8 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นการวิเคราะห์เพื่อช่วยให้ผู้เขียนหรือผู้ออกแบบแบบจำลองมั่นใจว่า แบบจำลองนั้นสามารถทำงานได้ตรงตามที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม และต้องสามารถนำแบบจำลองนั้นไปใช้กับการทำงานจริงได้ ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ดีที่สุด ก็คือเปรียบเทียบผลกับการทำงานจริงเมื่อกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ของการทำงานจริงให้ตรงกับเงื่อนไขในแบบจำลอง แต่ก่อนที่จะทำขั้นตอนนี้ เราควรทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมเสียก่อน เพื่อที่จะสร้างความมั่นใจในการใช้แบบจำลองนี้

กับการทำงานจริง ฉะนั้นการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

4.8.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูป ARENA สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อทำแบบจำลองได้ใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การเขียนโปรแกรมเพียงอย่างเดียว และการเขียนโปรแกรมควบคู่ไปกับการแสดงผลของโปรแกรมด้วยภาพแอนนิเมชั่น (Animation) ซึ่งการเขียนโปรแกรมเพียงอย่างเดียวนั้น อาจไม่สามารถตรวจสอบเบื้องต้นของผลที่ได้จากโปรแกรมที่เขียนไว้ได้เลยว่าสามารถนำโปรแกรมไปใช้แทนแบบจำลองของการทำงานจริงได้ ซึ่งต้องใช้การเปรียบเทียบผลกับการทำงานจริงเพียงอย่างเดียว แต่สำหรับการเขียนโปรแกรมอย่างหลังนั้นคือการเขียนโปรแกรมควบคู่ไปกับการแสดงผลของโปรแกรมด้วยภาพแอนนิเมชั่น สามารถที่จะตรวจสอบการขั้นทำงานที่ถูกต้อง ความผิดพลาดเนื่องจากการเขียนโปรแกรมผิด และที่สำคัญสามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายด้วยภาพการเคลื่อนไหวที่แสดงให้เห็น ก่อนที่จะโปรแกรมไปใช้แทนแบบจำลองของการทำงานจริง ซึ่งในการเขียนโปรแกรมของผู้เขียนนั้นจะใช้แบบนี้ ฉะนั้นในระหว่างการเขียนโปรแกรม ผู้เขียนจะตรวจสอบการทำงานให้ถูกต้องด้วยภาพการเคลื่อนไหวแอนนิเมชั่นอยู่ตลอด ฉะนั้นจึงมั่นใจถึงความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาว่าใช้แทนแบบจำลองของปัญหากับการทำงานจริงได้

4.8.2 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับการทำงานจริง

การนำผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำงานจริง เป็นการทดสอบความถูกต้องเพื่อจะยอมรับว่าสามารถนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง สำหรับวัตถุประสงค์ที่เราสร้างแบบจำลองนี้ขึ้นมาก็เพื่อหาจำนวนแพลเลตที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ได้ผลผลิตมากที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองที่สร้างขึ้นทำให้เราทราบเงื่อนไขที่ทำให้ได้เป้าหมายตามวัตถุประสงค์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงเงื่อนไขที่ทำให้ผลผลิตในสายการผลิตสูงสุดโดยมีจำนวนแพลเลตน้อยที่สุด

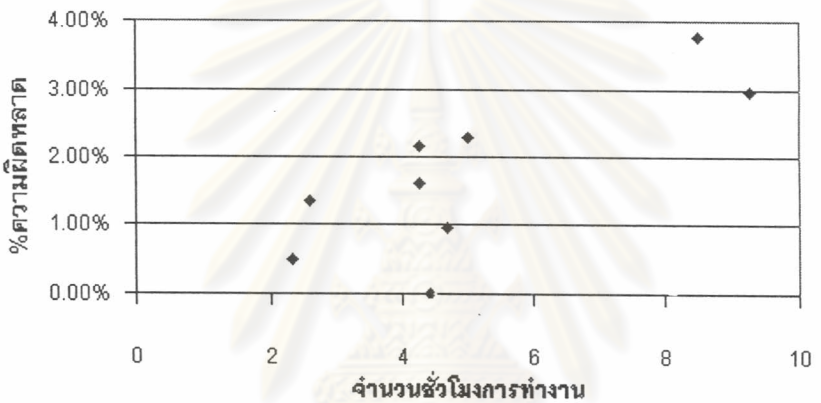
ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้มีผลผลิตในสายการผลิตสูงสุดโดยมีจำนวนแพลเลตน้อยที่สุด			
ตัวแปร	ค่าของตัวแปร	ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
จำนวนแพลเลตที่ใช้ทั้งหมดในสายการผลิต	24 แผ่น	ความเร็วแปรงปาดตะกั่ว	50 ~ 100 (มม./ วินาที)
ความถี่ในการคืนแพลเลตยังต้นสายการผลิต	2 (แผ่น / ครั้ง)	ความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ (ขึ้นกับความเร็วแปรงปาด)	4 ~ 5 (แผ่น / ครั้ง)
ความเร็วสายพาน 1 และ 2 (ความเร็วสูงสุดสายพาน)	780 (ซม./ นาที)	ความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ (ขึ้นกับความเร็วแปรงปาด)	14 ~ 25 (แผ่น / ครั้ง)
ความเร็วสายพาน 3 และสายพานระบายความร้อน	105 (ซม./ นาที)	ความเร็วสายพานเครื่องหลอมละลายตะกั่ว	105 (ซม./ นาที)

สำหรับค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่จะนำไปใช้ในการทดลองจริงนั้น จะใช้ค่าที่น่าจะทำให้เกิดงานเสียน้อยที่สุดตามการวิเคราะห์สมการถดถอยในหัวข้อ 4.6 คือค่าช่วงความเร็วแปรงปาดตะกั่วระหว่าง 77 ~ 86 มม./ วินาที และจากการตรวจสอบสภาพการทำงานจริงพบว่า ความเร็วแปรงปาดตะกั่วที่ใช้อยู่ปัจจุบันคือ 85 มม./ วินาที จึงกำหนดค่าความเร็วแปรงปาดตะกั่วนี้กับการทดลองจริง ส่วนความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนนั้น จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 4.9 นั้นสรุปว่าความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนไม่ได้เป็นผลหลักต่อการเกิดงานเสีย จึงสามารถนำค่าความถี่ที่ต่ำที่สุดมาใช้ในการทดลองจริงได้ (เพราะไม่มีผลต่อจำนวนผลผลิตที่เกิดขึ้น) ซึ่งค่านั้นคือความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติเท่ากับ 5 แผ่น / ครั้ง และค่าความถี่ในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือเท่ากับ 25 แผ่น / ครั้ง และจากแบบจำลองก็สามารถคำนวณหาความถี่สูงสุดในการทำความสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติ โดยไม่กระทบต่อยอดผลผลิต ได้เท่ากับ 4 แผ่น / ครั้ง และค่าความถี่สูงสุดในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ โดยไม่กระทบต่อยอดผลผลิต ได้เท่ากับ 19 แผ่น / ครั้ง ฉะนั้นค่าของความถี่ในการทำความสะอาดที่อาจจะแทนเข้าไปในการทดลองจริงจะต้องอยู่ระหว่างสี่ค่านี้ แต่เราจะนำค่าความถี่ต่ำสุดเข้ามาแทนในการทดลองจริง เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเก็บข้อมูลและนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับค่าจากแบบจำลองได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลจากการทำงานจริงเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง

วันที่	จำนวนชั่วโมงที่ผลิต	จำนวนผลผลิตที่ได้ (ชิ้น)			จากการทำงานจริง		จากสมการถดถอย	%ความผิดพลาด (เทียบจากสมการถดถอย)
		จากการทำงานจริง	จากแบบจำลอง	%ความผิดพลาด (เทียบจากการทำงานจริง)	จำนวนงานเสีย	%งานเสีย	%งานเสีย	
14 สค. 46	4.67	2,496	2,520	0.96%	44	1.76%	1.63%	8.15%
11 สค. 46	4.25	2,244	2,292	2.14%	41	1.83%	1.63%	12.09%
8 สค. 46	8.50	4,470	4,638	3.76%	79	1.77%	1.63%	8.43%
6 สค. 46	4.25	2,256	2,292	1.60%	39	1.73%	1.63%	6.06%
4 สค. 46	2.33	1,212	1,218	0.50%	24	1.98%	1.63%	21.48%
31 กค. 46	4.42	2,382	2,382	0.00%	42	1.76%	1.63%	8.17%
29 กค. 46	9.25	4,854	4,998	2.97%	74	1.52%	1.63%	6.47%
25 กค. 46	2.58	1,338	1,356	1.35%	26	1.94%	1.63%	19.21%
23 กค. 46	5.00	2,652	2,712	2.26%	40	1.51%	1.63%	7.47%
รวม	45.25	23,904	24,408	2.11%	407	1.71%	1.63%	4.97%

จากตารางที่ 4.14 พิจารณาจากข้อมูลเปรียบเทียบผลผลิตต่อชั่วโมงระหว่างแบบจำลองกับการทำงานจริงเมื่อเรากำหนดเงื่อนไขจำนวนแพลเลตในสายการผลิตให้มีเพียง 24 แผ่น และกำหนดจำนวนแพลเลตในการคืนไปยังต้นสายการผลิตครั้งละ 2 แผ่น จะเห็นได้ว่าแบบจำลองมี %ความผิดพลาดเมื่อเทียบกับการทำงานจริงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.11% โดยมี %ความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 3.76% และ %ความผิดพลาดต่ำสุดอยู่ 0.00% ซึ่งจาก %ความผิดพลาดที่สรุปมาได้นั้นมีค่าไม่มาก ฉะนั้นอาจสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเป็นเหตุเป็นผลกับการทำงานจริง ฉะนั้นลองมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั่วโมงการทำงานกับ %ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นดู ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั่วโมงการทำงานกับ %ความผิดพลาด

จากรูปที่ 4.11 เมื่อดูแนวโน้มของข้อมูลอาจจะสันนิษฐานได้ว่า %ความผิดพลาดจะสูงขึ้นเมื่อมีจำนวนชั่วโมงการทำงานสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุที่ในแบบจำลองเรากำหนดข้อสมมติฐานไว้ว่าจะไม่คำนึงถึงการสูญเสียเวลาของคนเนื่องจากกระทำการกิจกรรมอื่นๆ ใดนอกจากงานที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งในการทำงานจริงในช่วงที่มีชั่วโมงการทำงานมาก อาจจะหลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับข้อสมมติฐานนี้ เพราะว่าพนักงานที่ทำงานอาจจะเข้าห้องน้ำ หรือทำกิจกรรมอื่นใดๆ ซึ่งมีผลทำให้การทำงาน ณ จุดนั้นต้องล่าช้าออกไป เป็นเหตุให้ได้ผลผลิตน้อยกว่าที่ควรจะเป็น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม อย่างที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า สภาพการทำงานจริงในโรงงานกรณีศึกษานั้น จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อครั้งส่วนใหญ่จะไม่เกิน 5 ชั่วโมง ซึ่งในช่วงชั่วโมงการทำงานดังกล่าวจะมี %ความผิดพลาดเฉลี่ยของจำนวนผลผลิตที่ได้จากการแบบจำลองเทียบกับการทำงานจริงไม่เกิน 2% ฉะนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมกับการทำงานปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา

สำหรับ %งานเสีย จากการเก็บข้อมูลการทำงานจริงจากตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการทำงานจริงมี %งานเสียเฉลี่ยอยู่ที่ 1.71% ในขณะที่จากสมการการถดถอยคำนวณได้อยู่ที่ประมาณ 1.63% ซึ่งเมื่อเทียบเป็น %ความผิดพลาดแล้วจะเท่ากับ 4.97% อาจจะดูไม่มาก แต่ถ้าดูไปถึงรายละเอียดแล้ว %ความผิดพลาดมีมากสุดถึง 21.48% เลยทีเดียว ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก พนักงาน 1 ในขั้นตอนการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือนั้น อาจจะทำความสะอาดได้ไม่ดีพอ เลยเป็นผลให้อาจมีคราบตะกั่วครีมยังคงติดอยู่ที่ใต้สกรีน ทำให้เมื่อเครื่องพิมพ์ตะกั่วพิมพ์ตะกั่วสำหรับแผ่นวงจรไฟฟ้าชิ้นต่อไป เป็นผลให้คราบตะกั่วครีมที่ติดอยู่ใต้สกรีนนั้นไปเปื้อนชิ้นงานดังกล่าวในตำแหน่งที่นอกเหนือที่กำหนด ทำให้เกิดงานเสียได้ ซึ่งข้อมูลในการทำงานจริงดังตารางที่ 4.14 นั้นเป็นข้อมูลที่ได้จากการทำงานหลายวัน ฉะนั้นพนักงาน 1 ก็ไม่ใช่คนเดียวกัน เลยเป็นสาเหตุให้ทักษะหรือความสนใจในการทำงานในขั้นตอนการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือต่างกันไป และอย่างที่เคยกล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.5 ว่าการทำงานสะอาดใต้สกรีนแบบอัตโนมัติเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ใต้แผ่นสกรีนสะอาดได้ จึงต้องมีการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ ด้วยเหตุผลนี้เอง %ความผิดพลาดของอัตรางานเสียที่ได้จากการทำงานจริง เทียบกับอัตรางานเสียที่ได้จากสมการถดถอยแตกต่างกัน ดังนั้นถ้าเราสามารถควบคุมแหล่งทรัพยากรพนักงาน 1 ให้มีความสามารถหรือทักษะการทำงานให้เหมือนหรือเทียบเท่ากันทุกคน สมการถดถอยก็ยังคงเป็นสมการที่สามารถอธิบายจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นได้อยู่

ฉะนั้นภาพโดยรวมจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้แทนการจำลองปฏิบัติงานจริงได้อย่างมีเหตุมีผล ดังเหตุผลได้ที่กล่าวมาแล้ว และแบบจำลองถดถอยนั้น เราสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวอธิบายจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นได้ ถ้าควบคุมให้แหล่งทรัพยากรพนักงาน 1 มีความเทียบเท่ากัน

4.9 การคำนวณต้นทุนที่เกิดจากจำนวนแพลเลตในสายการประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้า

ผลสรุปของแบบจำลองดังที่กล่าวมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าจำนวนแพลเลต 24 แผ่น เป็นจำนวนแพลเลตที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แล้ว ซึ่งจะนำจำนวนแพลเลตนี้มาเปรียบเทียบกับการคำนวณวิธีหาจำนวนแพลเลตที่ทางโรงงานกรณีศึกษาใช้หาเพื่อทำการสั่งซื้อแพลเลตมาใช้ในแต่ละชนิดของแผ่นวงจรไฟฟ้า โดยการคำนวณที่ทางโรงงานกรณีศึกษาใช้นั้นจะเริ่มโดยการหากระบวนการที่ก่อให้เกิดคอขวดโดยเครื่องจักร และไม่สนใจการทำงานที่เกิดจากคน เพราะว่า ถ้ากระบวนการที่เกิดจากคนเป็นกระบวนการคอขวด ก็อาจจะเพิ่มจำนวนคนเข้าไป ดี

กว่าเปล่าให้เครื่องจักรมีเวลาสูญเปล่าโดยใช่เหตุ ซึ่งกระบวนการประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ใช้เครื่องจักรนี้ มีกระบวนการซึ่งก่อให้เกิดคอขวดหลัก อยู่ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการพิมพ์ตะกั่ว และ กระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถคำนวณหาเวลาได้ดังนี้

กระบวนการพิมพ์ตะกั่ว :

- เวลาสำหรับชิ้นงานเข้าและออกจากเครื่องพิมพ์ตะกั่ว = 26.0 วินาที
- เวลาในการพิมพ์ตะกั่ว เมื่อระยะปาดเท่ากับ 250 ซม. = 2.9 วินาที
  (กำหนดความเร็วแปรงปาด 85 มม./ วินาที)
- เวลาในการทำความสะอาดใต้สกรีนอัตโนมัติ 1 ครั้ง = 30.0 วินาที
  (กำหนดทุกๆ 5 แพลเลตต่อทำความสะอาด 1 ครั้ง)
  เวลาเฉลี่ยการทำความสะอาดอัตโนมัติต่อ 1 แพลเลต = 6.0 วินาที
- เวลาในการทำความสะอาดใต้สกรีนด้วยมือ 1 ครั้ง = 20.0 วินาที
  (กำหนดทุกๆ 25 แพลเลตต่อทำความสะอาด 1 ครั้ง)
  เวลาเฉลี่ยการทำความสะอาดด้วยมือต่อ 1 แพลเลต = 0.8 วินาที

ฉะนั้น ใน 1 แพลเลต ต้องใช้เวลาทั้งสิ้น = 26.0 + 2.9 + 6.0 + 0.8
= 35.7 วินาที

กระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ :

- เวลาสำหรับชิ้นงานเข้าและออกจากเครื่องจักร = 11.2 วินาที
- เวลาในการเช็คจุดอ้างอิงก่อนทำการวางอุปกรณ์ = 0.5 วินาที
  (1 ชิ้นงานต้องเช็ค 2 จุด โดย 1 แพลเลตมี 6 ชิ้นงาน) = 0.5 * 2 * 6
  = 6.0 วินาที
- เวลาในการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวเล็ก = 0.36 วินาที
  (ผลิตภัณฑ์นี้มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวเล็ก 8 ตัว = 0.36 * 8 * 6
  โดย 1 แพลเลตมี 6 ชิ้นงาน) = 17.28 วินาที
- เวลาในการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวใหญ่ = 0.7 วินาที
  (ผลิตภัณฑ์นี้มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวใหญ่ 1 ตัว = 0.7 * 1 * 6
  โดย 1 แพลเลตมี 6 ชิ้นงาน) = 4.2 วินาที

ฉะนั้น ใน 1 แพลเลต ต้องใช้เวลาทั้งสิ้น = 11.20 + 6.0 + 17.28 + 4.2
= 38.68 วินาที

จากทั้งสองกระบวนการจะเห็นได้ว่ากระบวนการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นกระบวนการคอขวด กล่าวคือ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการกำหนดความสามารถของทั้งสายการผลิต จึงนำเวลาที่คำนวณได้ของกระบวนการนี้ไปคำนวณต่อในกระบวนการหลอมละลายตะกั่ว เพื่อหาจำนวนแพลเลตที่สายพานบนกระบวนการนี้ลำเลียงได้ โดยสายพานนี้จะรวมถึงสายพาน 3 และสายพานระบายความร้อนด้วย เพราะจะปรับความเร็วของสายพานให้เท่ากันคือ 105 ซม./ นาที เพื่อป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนตัวเมื่อผ่านข้อต่อระหว่างสายพาน โดยสามารถคำนวณจำนวนแพลเลตที่กระบวนการนี้สามารถมีได้ดังนี้

- ความเร็วของสายพาน = 105 ซม./ นาที
- ความยาวของสายพาน = 690 ซม.
- เวลาที่เป็นคอขวด = 38.68 วินาที = 0.645 นาที

ฉะนั้นระยะช่องว่างระหว่างแพลเลตบนสายพาน = 0.645 * 105

= 67.725 ซม.

ดังนั้นสายพานนี้สามารถลำเลียงแพลเลตได้ = 690 / 67.725

= 10 แพลเลต

จากกระบวนการประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้าทั้งหมดสามารถสรุปการคำนวณจำนวนแพลเลตที่ต้องได้ทั้งหมดดังนี้

- สายพานหน้าเครื่องพิมพ์ตะกั่วสามารถลำเลียงแพลเลตได้ 3 แพลเลต
- เครื่องพิมพ์ตะกั่วสามารถลำเลียงแพลเลตได้ 1 แพลเลต
- สายพานหลังเครื่องพิมพ์ตะกั่วสามารถลำเลียงแพลเลตได้ 3 แพลเลต
- เครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถลำเลียงแพลเลตได้ 1 แพลเลต
- สายพานหลังเครื่องวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ + สายพานเครื่องหลอมละลายตะกั่ว + สายพานระบายความร้อนสามารถลำเลียงแพลเลตได้ 10 แพลเลต
- หลังสายพานระบายความร้อนสามารถลำเลียงแพลเลตได้ 4 แพลเลต
- จำนวนแพลเลตที่ส่งคืนจากท้ายไปยังต้นสายการผลิต 10 แพลเลต

ฉะนั้นจำนวนแพลเลตในสายการผลิตทั้งหมด 32 แพลเลต

จากการคำนวณ จะได้จำนวนแพลเลตที่ต้องสั่งซื้อสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ก่อนการผลิตคือ 32 แผ่น แต่จากแบบจำลองสามารถคำนวณหาจำนวนแผ่นแพลเลตได้เพียง 24 แผ่น ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกัน ก็จะเห็นได้ว่าจากการคำนวณของโรงงานกรณีศึกษานั้นทำให้มีจำนวนแพลเลตที่สั่งซื้อมาเกินความจำเป็นถึง 8 แผ่น ซึ่งจำนวนแพลเลตที่เกินมานี้ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดๆ ให้กับสายการผลิตนี้เลย

ฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้แบบจำลองปัญหาสามารถที่จะช่วยให้คำนวณจำนวนแพลเลตที่น้อยที่สุดที่ใช้จริงในสายการผลิตได้ โดยอย่างน้อยเป็นการลดต้นทุนส่วนหนึ่งของการประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้า ดังที่แสดงให้เห็นไปแล้วข้างต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย