

## การปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงานในการอบแห้งเตาหลอมด้วยการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ Improvement of Operating Conditions in Furnace Drying by Evolutionary Operation

สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ\*

Satit Rungrudesombatkit\*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University

\*E-mail: Satit.run@kbu.ac.th

Received: Dec 01, 2021

Revised: Mar 14, 2022

Accepted: Mar 25, 2022

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงานในการอบแห้งเตาหลอมอุณหภูมิเหนียวที่เกิดรอยแตกร้าวภายในเตาด้วยการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ โดยทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบูรณ 2 ระดับ 2 ปัจจัยรวมจุดกึ่งกลาง ซึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 48 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยไปที่ละน้อยขณะกำลังดำเนินการผลิตตามปกติอย่างต่อเนื่อง ผลการวิจัยพบว่า เงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสมอยู่ที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้ง 56 ชั่วโมง ดีกว่าเงื่อนไขการดำเนินงาน ซึ่งปรับปรุงโดยฝ่ายผลิตที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้ง 24 ชั่วโมง เพราะมวลน้ำที่จากเตาหลอมเพิ่มขึ้นจาก 52 กิโลกรัม เป็น 74.8 กิโลกรัม และความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาหลอมลดลงจาก 10% เหลือ 4.20% นอกจากนี้ยังดีกว่าเงื่อนไขการดำเนินงานเดิมก่อนปรับปรุงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้ง 72 ชั่วโมง เพราะระยะเวลาในการอบแห้งลดลงจาก 72 ชั่วโมง เหลือ 56 ชั่วโมง และไม่พบปัญหารอยแตกร้าว โดยมวลน้ำที่จากเตาหลอมมีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานที่ 76 กิโลกรัม และความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาไม่เกิน 7%

**คำสำคัญ:** การดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ การอบแห้งเตาหลอม มวลน้ำที่ ความชื้นสัมพัทธ์

### Abstract

This article aimed to improve the operating conditions in drying aluminium holding furnace in which cracks occur by evolutionary operation. The 2<sup>2</sup> Full Factorial Designs were performed with a center point which was used as the starting point for the experiment at 760°C for a 48-hour holding period, and then gradually changed the factor level while continuing normal production. The results showed that the optimum operating condition was at 780°C with a holding time of 56 h. This was better than that adjusted by the production department at 820°C with a holding time of 24 h because mass of drain water from the furnace increased from 52 kg to 74.8 kg and relative humidity inside the furnace reduced from 10% to 4.20%. Moreover, it was better than the original operating condition before improvement at 700°C with a holding time of 72 h because the holding time was reduced from 72 h to 56 h and no crack problem was found. Mass of drain water was close to the standard at 76 kg and relative humidity inside the furnace was not more than 7%.

**Keywords:** Evolutionary operation, Furnace drying, Mass of drain water, Relative humidity

### 1. บทนำ

บริษัท โทนเนทส์ไทย จำกัด ดำเนินกิจการผลิตเตาหลอมโดยมีลูกค้ำที่อยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งนำอลูมิเนียมมาใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ทดแทนเหล็กกล้าเพื่อลดน้ำหนัก ทั้งนี้การใช้อะลูมิเนียมในชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นอัลลอยหล่อฉีดที่ใช้ในกระบวนการหล่อฉีด (Die casting) เป็นหลัก [1]

การหล่อฉีดคือกระบวนการที่โลหะหลอมละลายถูกอัดฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง [2] การหล่ออลูมิเนียมด้วยแรงดันสูง (High pressure die casting) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1) ห้องเครื่องร้อน (Hot chamber casting) จะมีเตาหลอมติดตั้งภายในเครื่องหล่อฉีดและมีท่อต่อจากแม่พิมพ์เข้าเตาหลอมโดยตรง 2) ห้องเครื่องเย็น (Cold chamber casting) เตาหลอมไม่ได้ติดตั้งกับเครื่องหล่อฉีด โลหะจะถูกเทหลอมเหลวอยู่ในเตาที่แยกออกจากเครื่องหล่อฉีด โลหะเหลวจะถูกเติมผ่านท่อต่อเข้าแม่พิมพ์ด้วยกระบวย (Ladle) [3]

สำหรับเตาหลอมที่บริษัทฯ ผลิตให้กับลูกค้ำ คือเตาหลอมที่ใช้กับเครื่องหล่อฉีดชนิดห้องเครื่องเย็นที่ใช้ไฟฟ้ในการให้ความร้อนอุ่นน้ำอลูมิเนียม (Holding) และใช้กระบวยในการตักน้ำอลูมิเนียม (Figure 1)

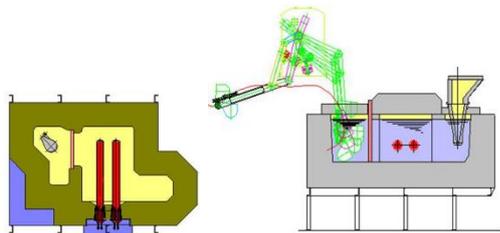


Figure 1 Aluminium holding furnace

การผลิตเตาหลอมอุ่นน้ำอลูมิเนียมของบริษัทฯ มีขั้นตอนดังนี้คือ 1) ทำโครงสร้างเตาหลอม 2) บუნนทวนความร้อน 3) ตั้งแบบและเทคอนกรีตทนไฟชั้นนอก 4) บ่มคอนกรีตและแกะแบบชั้นนอก 5) ตั้งแบบและเทคอนกรีตทนไฟชั้นใน 6) บ่มคอนกรีตและแกะแบบชั้นใน 7) ออบแห้งไล่ความชื้น 8) ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ชั้นส่วนนิวแมติกส์ ชั้นส่วนเชิงกล อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ 9) ดูดอากาศออก

เนื่องด้วยบริษัทฯ ได้รับข้อร้องเรียนจากลูกค้ำว่าเกิดการร้าวไหลของอลูมิเนียมขณะเตาหลอมรองรับน้ำอลูมิเนียม ซึ่งหลังจากการตรวจสอบ พบว่ามีรอยแตกร้าวภายในเตาหลอมบริเวณผิวสัมผัสกับน้ำอลูมิเนียม (Figure 2)



Figure 2 Internal crack of furnace

พนักงานจึงได้ระดมสมองหาสาเหตุที่เตาแตกร้าวด้วยแผนผังก้างปลาพบว่ามีส่วนสาเหตุหลัก 4 สาเหตุ (Figure 3)

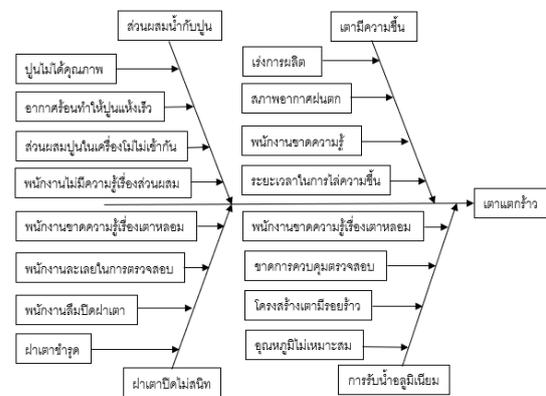


Figure 3 Fish bone diagram demonstrating possible causes of cracking in furnace

เพื่อค้นหาสาเหตุที่แท้จริง พนักงานจึงได้ร่วมกันวิเคราะห์โดยอาศัย Why-Why Analysis (Figure 4)

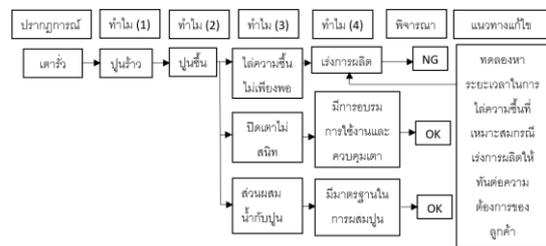


Figure 4 Why-Why Analysis for finding the actual cause of cracking in furnace

จะเห็นได้ว่า สาเหตุที่แท้จริงมาจากการเร่งการผลิต (Figure 4) ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบประวัติเตาหลอม พบว่าเป็นเตาหลอมที่มาจากคำสั่งซื้อเพิ่มเติม ซึ่งคำสั่งเพิ่มเติม มักจะส่งผลกระทบต่อแผนการผลิตปกติ จนเป็นเหตุให้ฝ่ายผลิตจำเป็นต้องเร่งการผลิตให้ทันต่อความต้องการของลูกค้า ช่วงเวลานั้น โดยพยายามปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการดำเนินงานให้เร็วขึ้นในบางขั้นตอน

จากเงื่อนไขการดำเนินงานอบแห้งไล่ความชื้นเตาหลอมที่ปรับเปลี่ยนโดยฝ่ายผลิต (Figure 5) จะเห็นว่าในช่วงแรกเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิเดิม 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 วัน ทำให้ระยะเวลาอบแห้งจากเดิม 3 วัน ลดลงเหลือ 2 วัน ต่อมาในช่วงที่ 2 เริ่มมีการปรับค่าอุณหภูมิอบแห้งจากเดิมที่ 700 ขึ้นเป็น 820 องศาเซลเซียส ทำให้ระยะเวลาอบแห้งจากเดิม 3 วัน ลดลงเหลือ 1 วัน และในช่วงที่ 3 ปรับค่า

อุณหภูมิอบแห้งจากเดิม 950 ขึ้นไปเป็น 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ระยะเวลาอบแห้ง 3 วัน ลดลงเหลือ 1 วัน

ในระหว่างอบแห้ง (Dry Out) พนักงานได้บันทึกมวลน้ำที่ทิ้งจากเตา (Mass of Drain Water) เริ่มตั้งแต่ช่วงการอบแห้งที่ 500 องศาเซลเซียสไปจนถึงช่วงปล่อยให้เตาเย็นตัวลงที่ 654 องศาเซลเซียส ได้มวลน้ำที่ทิ้งจากเตาเท่ากับ  $6+19+24+3 = 52$  กิโลกรัมซึ่งมีค่าน้อยกว่ามวลน้ำที่ตามเกณฑ์มาตรฐานที่ 76 กิโลกรัม (Figure 6) ซึ่งค่า 76 กิโลกรัมนี้อ้างอิงมาจากเงื่อนไขการดำเนินงานเดิมก่อนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 3 วัน โดยค่า 76 กิโลกรัมได้มาจากมวลน้ำที่ทิ้งจากเตาหลอมที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตา 4.9% ซึ่งเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน (STD. Ref) 7% (Figure 6) ดังนั้นจึงได้กำหนดให้ค่า 76 กิโลกรัมเป็นเกณฑ์มาตรฐานเอาไว้ด้วย

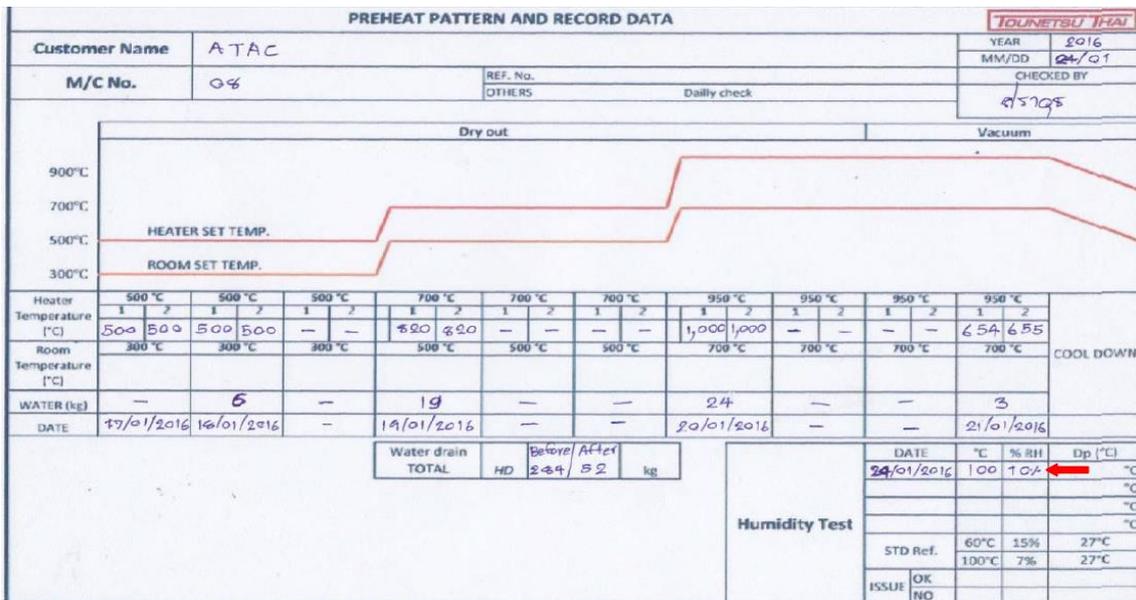


Figure 5 Furnace drying operating conditions modified by the production department



Figure 6 Mass of drain water and relative humidity reference standard

หลังจากลดอุณหภูมิลงจาก 1000 ไปเป็น 654 องศาเซลเซียสแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง (Cool Down) พนักงานจะปิดรูน้ำที่รอบเตา ปิดเตาให้สนิทแล้วดูดอากาศ (Vacuum) ออกและรอจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 100 องศา

เซลเซียส จึงวัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาได้ 10% จะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นค่าที่เกินมาตรฐาน (STD. Ref) 7% (Figure 5)

ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการดำเนินงานอบแห้งอย่างมากและทันทีทันใดจาก 700 ขึ้นไปเป็น 820 องศาเซลเซียสและ 950 ขึ้นไปเป็น 1000 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่น้อยเกินไปของฝ่ายผลิตน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เตาหลอมเกิดรอยร้าว

ในการอบแห้งวัสดุพูนังเตาทนไฟนั้น Jenkins et al. [4] ได้ให้นิยามว่า เป็นกระบวนการควบคุมการให้ความร้อนกับวัสดุพูนังเตาเพื่อไล่น้ำออกโดยไม่ทำให้วัสดุพูนังเตาได้รับ

ความเสียหาย และยังเป็นกระบวนการที่ต้องคำนึงถึงข้อตกลงร่วมกันระหว่างข้อเสนอแนะของผู้ผลิตวัสดุทนไฟกับผู้ใช้งานที่ต้องการลดเวลาในการปฏิบัติงาน [5] การที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุผงในระหว่างการอบแห้งยังมิได้มีการพัฒนาให้เป็นมาตรฐาน เป็นเพราะสาเหตุจากความซับซ้อนของความแตกต่างของวัสดุทนไฟ ความหนา จำนวนชั้นของวัสดุผงทนไฟและวิธีการอบแห้ง ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่มีการให้ความร้อนกับชิ้นส่วนอุณหภูมิสูง จึงจำเป็นต้องนำตารางเวลาการให้ความร้อน (Heating Schedules) ที่พัฒนาขึ้นจากประสบการณ์ของผู้ผลิตหรือวิธีปฏิบัติจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานมาใช้ [6] กล่าวโดยสรุปก็คือกระบวนการอบแห้งที่มีอยู่นั้น ยังคงไม่สามารถทำให้มั่นใจได้ว่าจะไล่ไอน้ำได้หมดอย่างเพียงพอ [5]

ด้วยเหตุที่ตารางเวลาการให้ความร้อนที่ผู้ผลิตจัดทำไว้ยังไม่มีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจติดตามอุณหภูมิของวัสดุผงอย่างต่อเนื่อง เพราะอาจเกิดรอยร้าวและการระเบิดอย่างรวดเร็วอันเป็นผลมาจากการไม่ปฏิบัติตามตารางเวลาการอบแห้ง [6] ซึ่งในกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องนั้น จะเป็นการเหมาะสมหากนำวิธีการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ (Evolutionary Operation, EVOP) มาปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยที่รูปแบบของการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการจะยังคงรักษาข้อกำหนดอย่างเป็นทางการของระบบประกันคุณภาพเอาไว้ [7] ทั้งนี้ การดำเนินการอย่างวิวัฒนาการจะมีประโยชน์กับสิ่งต่าง ๆ ดังนี้ คือ การหล่อฉีดโลหะ การอบชุบโลหะ การผลิตอาหาร การอัดขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูปพลาสติก [8]

ดังนั้น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาการแตกร้าวและทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเตาหลอมลดลง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงานในการอบแห้งเตาหลอมอุณหภูมิต่ำลง โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการดำเนินการไปที่ละน้อยขณะกำลังดำเนินการผลิตตามปกติอย่างต่อเนื่อง [8] เฉพาะการอบแห้งในช่วงที่สองคือช่วง 700 – 820 องศาเซลเซียส (ส่วนการอบแห้งในช่วงแรกที่ 500 องศาเซลเซียสและช่วงที่ 3 ที่ 950 องศาเซลเซียสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขใด ๆ) ด้วยวิธีการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายเหมาะสำหรับพนักงานหน้างาน เพราะมีขั้นตอนและการคำนวณที่เป็นพื้นฐานมาก [9] เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสม

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1. วัสดุและอุปกรณ์

#### 2.1.1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ คอนกรีตทนไฟผสมเสร็จชนิดทั่วไป (Conventional Castable) ซึ่งมีแคลเซียมอลูมิเนตซีเมนต์เป็นตัวประสานหลัก (Based Binder) คอนกรีตทนไฟผสมเสร็จประกอบด้วยส่วนผสมระหว่างเม็ดวัสดุหยาบ (Aggregate) 79 wt% คอนกรีตซีซีเอ็ม 15 wt% และ CA14M (Calcium Aluminate Cement) 6 wt% นำไปผสมกับน้ำตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ในใบกำกับผลิตภัณฑ์เพื่อให้การไหลตัวดีและง่ายต่อการหล่อคอนกรีต

#### 2.1.2. อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

- เตาหลอม ได้จากการผสมคอนกรีตทนไฟกับน้ำแล้วนำไปเทลงในแบบหล่อเตาหลอม (Furnace formwork) แล้วบ่มคอนกรีต (Concrete curing) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90% โดยการคลุมด้วยแผ่นพลาสติกเป็นระยะเวลาประมาณ 1 วัน (Figure 7)

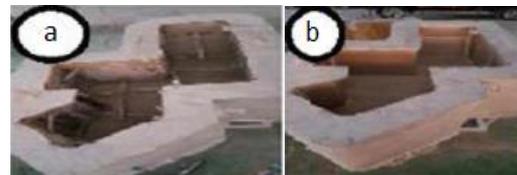


Figure 7 Furnace formwork (a) and Concrete curing (b)

- เทอร์โมคัปเปิล ที่ใช้เป็นชนิด K โดยการเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับคอนโทรลเลอร์ 2 ตัว ซึ่งสามารถตั้งค่าขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของอุณหภูมิได้ โดยเมื่อถึงขีดจำกัดบนสัญญาณจะถูกส่งไปปิดเตา เมื่อถึงขีดจำกัดล่างสัญญาณจะถูกส่งไปเปิดเตา (Figure 8), (Figure 9)

- ฮีทเตอร์ ใช้ในการให้ความร้อนกับแบบหล่อและบริเวณโดยรอบวัสดุผงในเตาทั้งในขั้นตอนการบ่มและการอบแห้ง ทั้งนี้หลังการติดตั้งควรตรวจสอบไม่ให้ฮีทเตอร์สัมผัสกับผิวของวัสดุผงในเตาโดยตรง (Figure 9)

- เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น สามารถแสดงค่าผ่านหน้าจอได้ มีช่วงวัดอุณหภูมิระหว่าง -200 ถึง 1,820 องศาเซลเซียสและช่วงวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0% ถึง 100%

- ป้อนอากาศ เป็นป้อนแบบโรตารี ใช้สำหรับดูดอากาศและความชื้นเพื่อให้อยู่ในระดับแรงดันสูญญากาศ มีช่วงการใช้งานระหว่าง  $-0.1$  ถึง  $0$  MPa โดยเปิดใช้งานประมาณ 24 ชั่วโมงหลังจากปล่อยให้เตาเย็นตัวลง
- อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ถังบรรจุน้ำ เครื่องชั่งน้ำหนัก



Figure 8 Control cabinet connected to thermocouple



Figure 9 Thermocouple and heater

## 2.2. วิธีการวิจัย

การไล่น้ำเป็นกระบวนการที่ต้องกระทำอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงการอบแห้ง [6] สอดคล้องกับตารางการปฏิบัติงานของบริษัท ที่ต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง 7 วันต่อสัปดาห์ ดังนั้นการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการจึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด [8] ในการปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงานด้วยการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

### 2.2.1. จัดตั้งทีมงาน

ทีมงานการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ ได้แก่ พนักงานและผู้จัดการฝ่ายผลิต ช่างเทคนิค วิศวกรควบคุมคุณภาพ ให้ความสำคัญต่อความสำเร็จคือการแสดงความคิดเห็นโดยไม่กำหนดสถานะหัวหน้าทีม [8] เพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกในการอบแห้งเตาหลอม โดยมีเป้าหมายเพื่อลดเวลาในการอบแห้งและต้องไม่ทำให้เตาหลอมแตกกร้าว โดยนำวิธีการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการมาเป็นกลยุทธ์ในการทดลอง

### 2.2.2. สร้างแผนการทดลอง

หลังจากแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับการอบแห้งเตาหลอมแล้ว สรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งเตาหลอมมากที่สุดมี 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ (Temperature, Te) กับระยะเวลาในการอบแห้ง (Time, Ti) โดยมีผลตอบคือ มวลน้ำที่จางจากเตาหลอม (Mass of Drain Water: กิโลกรัม) กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Table 1 แสดงช่วงของปัจจัยที่ใช้ในการอบแห้ง การกำหนดค่าเซตตั้งของแต่ละปัจจัย และช่วงของปัจจัยในการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการที่กำหนดโดยทีมงาน EVOP

Table 1 Process factors

Factor	Range	Baseline setting	EVOP Range
Te (°C)	700-820	760	750-770
Ti (h)	24-72	48	44-52

จาก Table 1 จะเห็นได้ว่าแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ โดยกำหนดให้ค่าเซตตั้งอยู่ที่จุดกึ่งกลางของช่วงปัจจัยที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้น จึงได้มีการทดลองแพททอเรียลสมบูร์น 2 ระดับ 2 ปัจจัยรวมจุดกึ่งกลางมาสร้างแผนการทดลอง โดยจำนวนรอบการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการดำเนินงานอย่างมีนัยสำคัญ สามารถประมาณได้ด้วยแผนการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ (EVOP Worksheet) มี 5 ส่วนคือ 1) การคำนวณค่าเฉลี่ย (Average Calculation) 2) การคำนวณผลกระทบ (Effects Calculation) 3) การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation Calculation) 4) การคำนวณขีดจำกัดความผิดพลาด (Error Limit Calculation) 5) การตัดสินใจ (Decision Making Procedure) [10]

### 2.2.3. เก็บข้อมูล

ในทางปฏิบัติ การดำเนินการอย่างวิวัฒนาการซึ่งทราบแนวโน้มของปัจจัยที่สนใจศึกษา อาจยกเว้นไม่ต้องทำการสุ่ม โดยสามารถกำหนดให้มีรูปแบบการทดลองที่แน่นอนตายตัว ดังนั้นเพื่อลดความสับสนในการบันทึกข้อมูลของพนักงานหน้างาน จึงได้นำการทดลองแบบแพททอเรียลสมบูร์น 2 ระดับ 2 ปัจจัยรวมจุดกึ่งกลาง มากำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานและกำหนดลำดับการทดลองที่แน่นอน [11]

เริ่มจากการบันทึกค่าผลตอบมวลน้ำที่จางจากเตาหลอมก่อนแล้วค่อยบันทึกค่าผลตอบความชื้นสัมพัทธ์ภายใน

เตาหลอมตามลำดับหมายเลข 1, 2, 3, 4, 5 (Figure 10) โดยกำหนดให้จุดกึ่งกลางอยู่ที่หมายเลข 1 ที่อุณหภูมิ (Te) 760 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการอบแช่ (Ti) เท่ากับ 48 ชั่วโมงมาเป็นจุดเริ่มต้นของเงื่อนไขในการดำเนินงาน

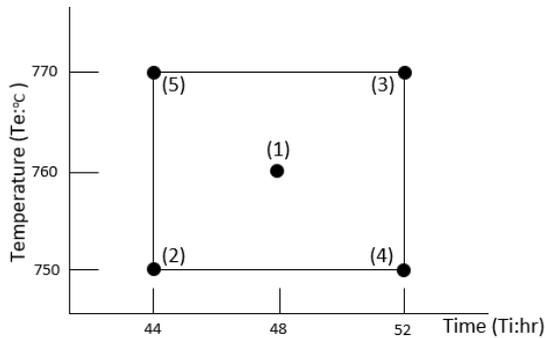


Figure 10 Experimental order given by Box [11]

สำหรับตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขการดำเนินการ เช่น การกำหนดอุณหภูมิอบแห้งที่ 760 องศาเซลเซียส และตัวอย่างของผลการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ เช่น 4.6% ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสได้แสดงไว้ใน Figure 11

เนื่องด้วยบริษัทฯ ได้กำหนดมาตรฐานการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ 60 และ 100 องศาเซลเซียส (Figure 5) ซึ่งสอดคล้องกับ Innocentini et al. [12] ที่ได้กล่าวไว้ว่า ความชื้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการอบแห้งนั้น สามารถที่จะทดลองวัดค่าได้ ณ อุณหภูมิคงที่ (Plateau Experiment) ที่ 60 และ 100 องศาเซลเซียส โดยมีกระแสความชื้นภายในเตาคงที่ ดังนั้นพนักงานจึงต้องปิดเตาให้สนิทและดูอากาศออก (vacuum) รอจนอุณหภูมิในเตาลดเหลือ 100 องศาเซลเซียส (งานวิจัยนี้เลือกที่ 100 องศาเซลเซียส) แล้วปิดระบบดูดอากาศ จึงจะสามารถบันทึกค่าความชื้นได้ ซึ่งสภาวะที่มีกระแสความชื้นคงที่นี้ จะทำให้เราสามารถนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ไปใช้ในการประเมินได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่กำหนด [12]



Figure 11 Temperature and relative humidity

เมื่อทดลองไปตามจุดต่าง ๆ ตามลำดับหมายเลข (1, 2, 3, 4, 5) จนครบ 1 รอบการทดลอง (Cycle) ค่าผลตอบจากแต่ละจุดในรอบแรกจะถูกนำไปบันทึกลงในแผ่นการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ (EVOP Worksheet)

#### 2.2.4. วิเคราะห์ข้อมูล

ผลตอบที่ป้อนลงไปบนแผ่นการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการจากรอบแรก ที่ปลายรอบจะไม่มีค่าประมาณค่าผิดพลาดของการทดลอง ส่วนผลกระทบและอันตรกิริยาสำหรับอุณหภูมิและเวลาในการอบแช่คำนวณได้เหมือนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ 2 ปัจจัย จากนั้นทดลองรอบถัดไปและผลตอบจะถูกป้อนเข้า EVOP Worksheet อีกครั้งหนึ่ง แต่ที่ปลายรอบนี้จะประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลองและประมาณผลกระทบเปรียบเทียบกับขีดจำกัดความผิดพลาด 95% (2 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยและอันตรกิริยา [13] สำหรับการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลองและการประมาณผลกระทบเปรียบเทียบกับขีดจำกัดความผิดพลาด 95% ใน EVOP worksheet สามารถกระทำได้ง่ายเพียงป้อนข้อมูลลงใน MS Excel worksheet จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณค่าให้อย่างถูกต้องรวดเร็ว

#### 2.2.5. ตัดสินใจ

การตัดสินใจเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการดำเนินงาน อาจเกิดขึ้นได้ใน 3 กรณีคือ 1) ถ้าไม่มีผลกระทบใดเลยในแผ่นการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการเกินกว่าขีดจำกัดความผิดพลาด ดังนั้นผลจริงน่าจะมีค่าเป็นศูนย์ [13] เงื่อนไขการดำเนินงานไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลง 2) ถ้ามีผลกระทบใดในแผ่นการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการเกินกว่าขีดจำกัดความผิดพลาด ดังนั้นผลจริงน่าจะไม่เป็นศูนย์ เงื่อนไขการดำเนินงานสมควรที่จะเปลี่ยนแปลงได้แล้ว การทดลองในเฟสนั้นก็จะจบลงและให้พิจารณาจุดกึ่งกลางใหม่ เพื่อเริ่มการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการในเฟสถัดไป 3) ถ้าผลกระทบจากอันตรกิริยาและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยมีค่ามากกว่าผลกระทบหลัก แสดงว่าการทดลองกำลังใกล้ถึงจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดแล้ว ทั้งนี้ตำแหน่งที่แน่นอนและเทคนิควิธีการที่สมบูรณ์ที่ค้นพบได้จากที่ใดที่หนึ่งนั้นสามารถที่จะนำไปใช้ดำเนินการได้ [11]

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เนื่องจากฝ่ายผลิตได้ปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงาน อบรมอย่างมากและทันทีทันใด (โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 ขึ้นเป็น 820 องศาเซลเซียสและลดระยะเวลาในการอบแห้งจาก 3 วันเหลือเพียง 1 วัน) ซึ่งการเผาที่รวดเร็วเช่นนี้จะทำให้การแตกสลายตัวของน้ำโมเลกุลออกเร็วเฉพาะผิวหน้า ส่วนผิวภายในระเหยออกทีหลังจึงเกิดการหดตัวที่ผิวหน้ามาก ส่วนผิวภายในหดตัวน้อยกว่าจึงทำให้แตกร้าวได้

การอบแห้งคอนกรีตที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวประสานหลักกับน้ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 1300 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ภายในมีโครงสร้างผลึกของน้ำจากรูปทรงหนึ่งไปเป็นอีกรูปทรงหนึ่ง จนกระทั่งโครงสร้างผลึกของน้ำเกิดการสลายตัวออกไปทั้งหมด

การเปลี่ยนเฟสเป็นจำนวนมากนี้ก่อให้เกิดปัญหา 2 ประการคือ 1) การแตกร้าวหรือหลุดร่อนของคอนกรีตในระหว่างการอบแห้ง 2) ผลจากการแตกร้าวหรือหลุดร่อนจะทำให้เกิดช่องว่างรอบผลึกทรงลูกบาศก์และทำให้สูญเสียความแข็งแรง [14] ทั้งนี้ น้ำที่เติมลงไปซีเมนต์จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงทางความร้อน (Hot Strength) ลดลง โดยในระหว่างที่ทำการอบแห้งจะเกิดการเปลี่ยนเฟสขึ้นระหว่างช่วงอุณหภูมิ 538–982 องศาเซลเซียส จนทำให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง [15] ดังนั้นในระหว่างช่วงอุณหภูมิดังกล่าว จึงควรเพิ่มความระมัดระวังในการอบแห้ง โดยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างค่อยเป็นค่อยไป

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิอย่างมากและทันทีทันใด ทีมงานดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ จึงได้กำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานขึ้นใหม่ โดยลดอุณหภูมิในการอบแห้งจาก 820 ลงไปอยู่ที่ 760 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางระหว่างอุณหภูมิก่อนปรับปรุงที่ 700 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิที่ทำให้เตาหลอมแตกร้าวคือที่ 820 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาอบแห้ง 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางระหว่างระยะเวลาอบแห้งก่อนปรับปรุงที่ 72 ชั่วโมงกับระยะเวลาที่ทำให้เตาหลอมแตกร้าวที่ 24 ชั่วโมง (Table 1) โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยไปทีละน้อย

ดังนั้นการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการรอบที่ 1 เฟสที่ 1 จึงกำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานที่อุณหภูมิ (Te) 760 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการอบแห้ง (Ti) 48 ชั่วโมงให้อยู่ที่หมายเลข 1 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบรูณ์ 2 ระดับ 2 ปัจจัย โดยรอบการทดลองจะสิ้นสุดเมื่อทำการทดลองไปตามหมายเลข 1, 2, 3, 4, 5

ตามลำดับ บันทึกค่าผลตอบมวลน้ำที่จากเตาหลอม (Mass of Drain Water: กิโลกรัม) ในขั้นตอนอบแห้งให้เสร็จก่อนแล้วค่อยบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสหลังขั้นตอนดูอากาศในลำดับถัดไป

เริ่มจากการบันทึกผลตอบมวลน้ำที่จากเตาหลอมลงในแผนการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการรอบแรกเฟสที่ 1 ก่อน (Figure 12) โดยที่ปลายรอบแรกจะไม่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์มาตรฐาน [13] ส่วนผลกระทบและอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาการอบแห้งคำนวณเหมือนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบรูณ์ 2 ระดับ 2 ปัจจัย

เนื่องจากที่ปลายรอบแรกนี้ยังไม่มีค่าการประมาณผลกระทบเปรียบเทียบกับขีดจำกัดความผิดพลาด 95% ดังนั้นจึงยังไม่สามารถตัดสินใจดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งกับเงื่อนไขการดำเนินงานได้ จึงต้องทดลองต่อไปในรอบที่ 2

เมื่อทำการทดลองในรอบที่ 2 เฟสที่ 1 ผลจะถูกบันทึกลงในแผนการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการอีกครั้งหนึ่ง (Figure 13) ที่ปลายรอบนี้เราสามารถที่จะประมาณค่าความผิดพลาดของผลการทดลองและประมาณผลกระทบเปรียบเทียบกับขีดจำกัดของความผิดพลาด 95% ได้แล้ว

เนื่องจากผลกระทบจากอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลา กับอุณหภูมิในการอบแห้ง (Ti x Te Interaction Effect) มีค่าเป็นบวก (0.77) ดังนั้นการเพิ่มของเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งพร้อมกัน จึงมีผลทำให้มวลน้ำที่จากเตาหลอมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้หากนำมวลน้ำที่จากเตาหลอมที่บันทึกได้ตามหมายเลข 1, 2, 3, 4, 5 ได้แก่ 70.9, 70.6, 71.8, 69.5 และ 70.0 (Figure 13) ไปเปรียบเทียบกับค่า 52 กิโลกรัม (Figure 5) จะเห็นว่ามีความมากกว่ามวลน้ำที่จากเตาหลอมตามเงื่อนไขการดำเนินงานของฝ่ายผลิต

นอกจากนี้ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ย (Change in Mean Effect) ที่มีค่าเป็นลบ (-0.23) ยังแสดงให้เห็นว่าส่วนโค้งของพื้นผิวผลตอบเป็นแบบคว่ำ (Convex Surface) แต่ด้วยขนาดที่ใหญ่กว่าของผลกระทบหลัก (0.38, 0.52) ได้ชี้ให้เห็นว่าค่าสูงสุดของมวลน้ำที่จากเตาหลอมยังคงอยู่ห่างจากเงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสม

เนื่องจากไม่มีผลกระทบใดเกินกว่าขีดจำกัดความผิดพลาดของมัน จึงเป็นไปได้ที่ผลจริงจะมีค่าเป็นศูนย์ [13] เพราะค่าศูนย์อยู่ภายในช่วง  $0.38 \pm 0.85$  และ  $0.52 \pm 0.85$  (Figure 13) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการดำเนินงานและให้ทำการทดลองต่อไปในรอบที่ 3

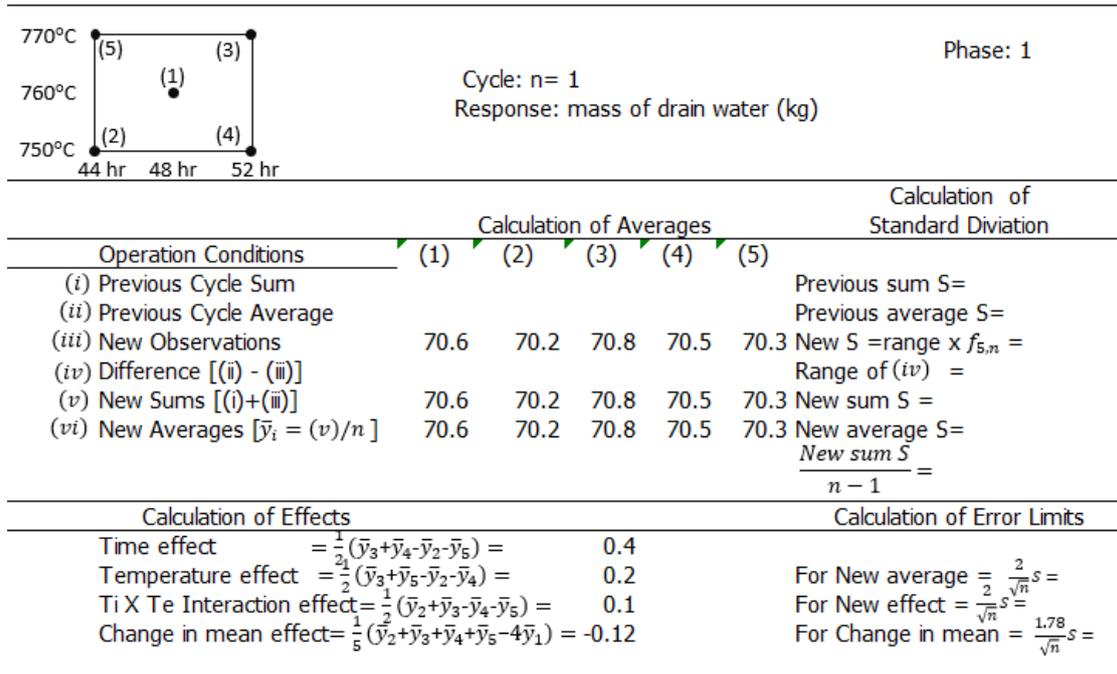


Figure 12 EVOP Worksheet Cycle 1 Phase 1 when the response was the mass of drain water from furnace

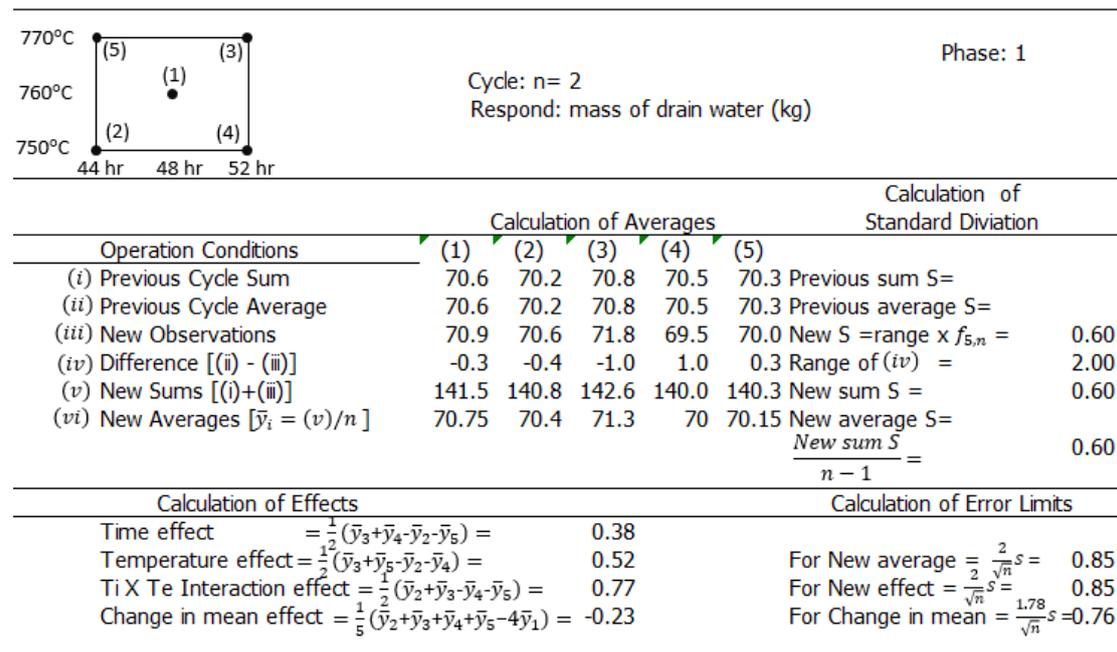


Figure 13 EVOP Worksheet Cycle 2 Phase 1 when the response was the mass of drain water from furnace

Figure 14 แสดงผลกระทบของรอบที่ 3 เฟสที่ 1 ซึ่งมีผลกระทบจากเวลาและอุณหภูมิในการอบแช่เกินขีดจำกัดความผิดพลาดของมันแล้ว จึงเป็นไปได้ที่ผลจริงจะไม่มีค่าเป็นศูนย์ เพราะค่าศูนย์ไม่อยู่ในช่วง  $0.50 \pm 0.48$  และ  $0.80 \pm 0.48$  ดังนั้นเงื่อนไขการดำเนินงานจึงควรเปลี่ยนแปลง

ได้แล้ว โดยมีเหตุผลที่จะเริ่มการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการ เฟสใหม่รอบจุดที่ 3 ดังนั้นจึงให้  $T_e = 770$  องศาเซลเซียส และ  $T_i = 52$  ชั่วโมงเป็นจุดกึ่งกลางของการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบูรณ 2 ระดับ 2 ปัจจัยในเฟสถัดไป (เฟส 2)

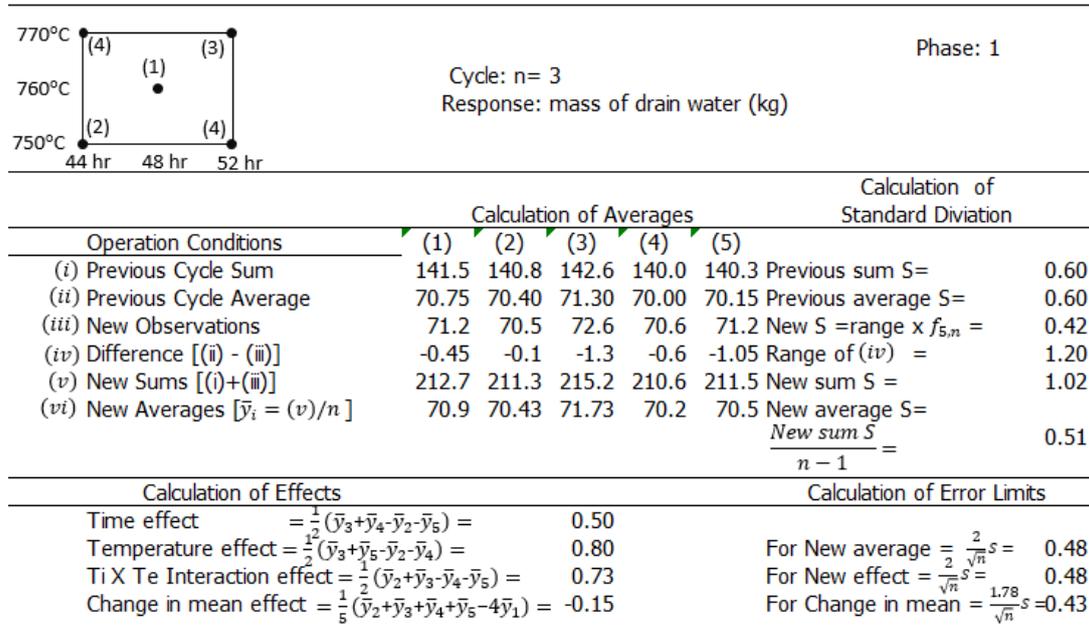


Figure 14 EVOP Worksheet Cycle 3 Phase 1 when the response was the mass of drain water from furnace

เมื่อทดลองมาถึงรอบที่ 3 เฟสที่ 2 พบว่าผลกระทบจากอันตรกิริยาระหว่างเวลากับอุณหภูมิในการอบแห้ง (1.45) และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ย (-0.89) มีค่ามากกว่าผลกระทบหลักแต่ละตัว (0.28, 0.75) และกำลังเข้าใกล้จุดสูงสุด เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยมีค่าเป็นลบ [11] (Figure 15) ซึ่งสามารถนำไประบุตำแหน่งเพื่อกำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสมได้คือที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 56 ชั่วโมง โดยมีค่าผลตอบมวน้ำทิ้งจากเตาหลอม 74.8 กิโลกรัม

ผลตอบที่ต้องการศึกษาถัดไปคือค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาผลตอบน้ำทิ้งจากเตาหลอมที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จะเริ่มจากการบันทึกค่าลงในแผนการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการในรอบที่ 1 เฟสที่ 1 ซึ่งกำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานเช่นเดียวกันกับการศึกษาผลตอบของมวน้ำทิ้งจากเตาหลอม โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ (Te) = 760 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการอบแห้ง (Ti) = 48 ชั่วโมง ที่หมายเลข 1 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบูรณ์ 2 ระดับ 2 ปัจจัย โดยรอบการทดลองจะสิ้นสุดเมื่อทดลองตามหมายเลข 1, 2, 3, 4, 5 ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณผลกระทบและอันตรกิริยาในเฟสแรกมิได้แสดงไว้ในที่นี้ เพราะเหมือนกับผลตอบน้ำทิ้งจากเตาหลอม

เมื่อทดลองมาถึงรอบที่ 3 เฟสที่ 2 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งจะทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลง และเนื่องจากผลกระทบจากอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลากับอุณหภูมิในการอบแห้ง (-0.38) และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ย (0.53) มีค่ามากกว่าผลกระทบหลักแต่ละตัว (0.05, 0.02) (Figure 16) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยที่มีค่าเป็นบวกจะได้ว่าส่วนโค้งของพื้นผิวผลตอบเป็นแบบหยาย (Concave Surface) และกำลังเข้าใกล้จุดต่ำสุด [11] ดังนั้นจึงสามารถนำผลการทดลองไปกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 56 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าผลตอบคือค่าความชื้นสัมพัทธ์ 4.20% สอดคล้องกับ Poblano-ojinaga et al. [16] ที่แสดงว่าผลกระทบจากอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไอน้ำกับเวลาในการบ่อน้ำ (-3.5) และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ย (3.0) มีค่ามากกว่าผลกระทบหลักแต่ละตัว (1.833, 2.833) โดยให้ค่าผลตอบความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง (Flexural Strength) ที่ 48 N ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดแต่เข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 47.5 N จึงทำให้สามารถนำผลการทดลองไปกำหนดเงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสมได้ และยังสอดคล้องกับ Ginting et al. [10] ที่สามารถนำผลการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการไปกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตยากันยุงแบบขดคือที่ระยะเวลาในการกวน 20 นาที อุณหภูมิอบแห้ง 65 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการอบแห้ง 130 นาที โดยมีปริมาณน้ำที่ 6.90% ซึ่งเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่ 7%

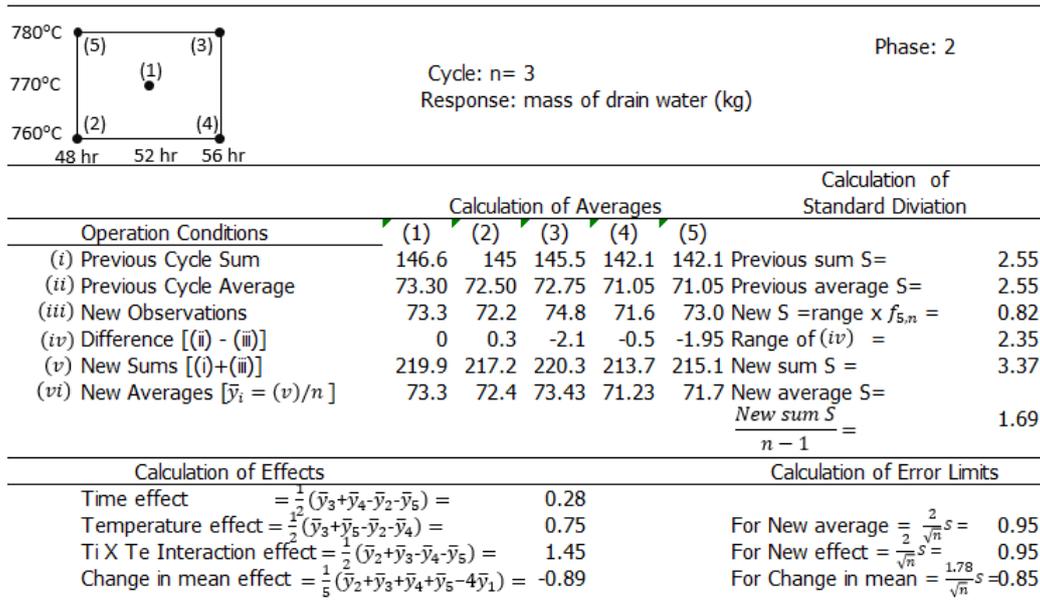


Figure 15 EVOP Worksheet Cycle 3 Phase 2 when the response was the mass of drain water from furnace

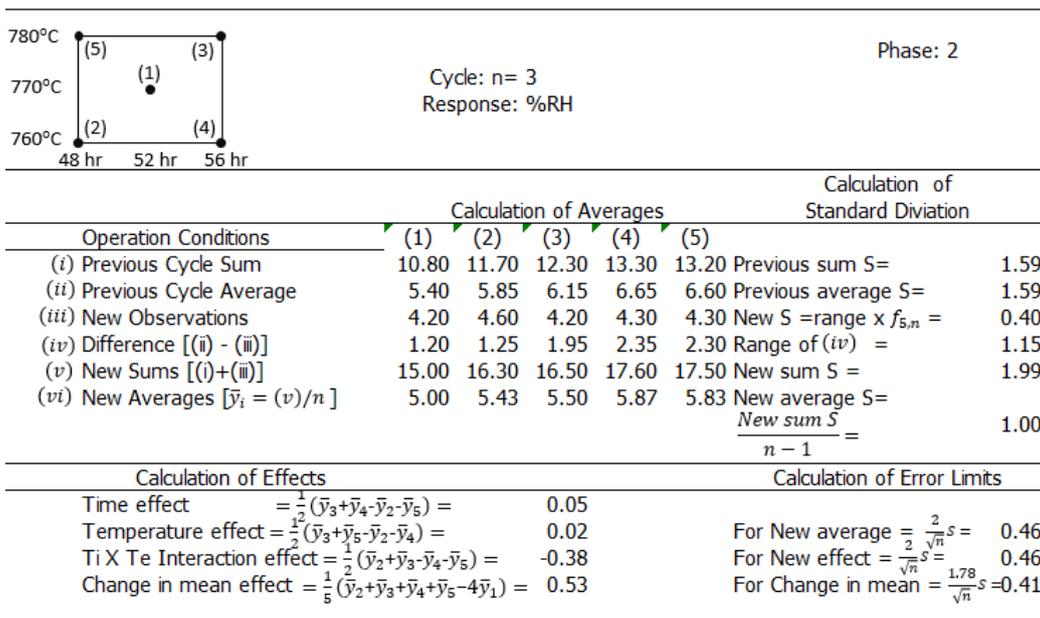


Figure 16 EVOP Worksheet Cycle 3 Phase 2 when the response was relative humidity from furnace

Table 2 Comparison of various operating conditions

Operating conditions	Te (°C)	Ti (h)	Mass of drain water (kg)	Relative humidity (%RH)	Crack
before improvement	700	72	76	≤ 7.0	not found
Improved by production department	820	24	52	10	found
Improved by EVOP team	780	56	74.8	4.20	not found

#### 4. บทสรุป

บทความนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการใช้การดำเนินการอย่างวิวัฒนาการเพื่อปรับปรุงเงื่อนไขการดำเนินงานให้เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเตาหลอมอลูมิเนียมโดยทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงและไม่ทำให้เตาหลอมแตกร้าว การดำเนินการอย่างวิวัฒนาการมีขั้นตอนดังนี้คือ 1) จัดตั้งทีมงาน EVOP 2) สร้างแผนการทดลอง 3) เก็บข้อมูล 4) วิเคราะห์ข้อมูล 5) ตัดสินใจ ผลการวิจัยพบว่า เงื่อนไขในการดำเนินงานที่เหมาะสมจากทีม EVOP คืออุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้ง 56 ชั่วโมง โดยหากเปรียบเทียบกับเงื่อนไขเดิมก่อนปรับปรุงและเงื่อนไขที่ปรับปรุงโดยฝ่ายผลิตจะได้ดังแสดงใน Table 2

จะเห็นว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมซึ่งพัฒนาขึ้นโดยทีมงาน EVOP จะใช้ระยะเวลาอบแห้ง 56 ชั่วโมงน้อยกว่าเงื่อนไขที่ปรับเปลี่ยนโดยฝ่ายผลิตที่ใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมงโดยไม่ทำให้เตาหลอมแตกร้าว สอดคล้องกับ Pongdet [15] ที่กล่าวว่า การอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานานจะช่วยหลีกเลี่ยงการแตกร้าวและการแตกระเบิดได้ แต่ถ้าหากนำระยะเวลาอบแห้ง (56 ชั่วโมง) จากเงื่อนไขการดำเนินงานของทีมงาน EVOP ไปเปรียบเทียบกับระยะเวลาอบแห้งจากเงื่อนไขการดำเนินงานเดิมก่อนปรับปรุง (72 ชั่วโมง) จะเห็นว่าเงื่อนไขการดำเนินงานจากทีมงาน EVOP ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่า โดยมีมวลน้ำที่ออกจากเตาหลอม (74.8 กิโลกรัม) ใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน (76 กิโลกรัม) และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ (4.20%) ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ 7% (Table 2) ซึ่งหลังจากนำเงื่อนไขการดำเนินงานจากทีมงาน EVOP ไปใช้งาน ผลปรากฏว่ายังไม่พบข้อร้องเรียนจากลูกค้ากลับมา

ข้อเสนอแนะคือ

1) ควรนำผลการวิจัยที่ได้เขียนลงในกระดานไวท์บอร์ด (Table 3) เสนอต่อประธานกรรมการผู้จัดการเพื่อขออนุมัติในการจัดทำเป็นคู่มือการปฏิบัติเพื่อให้พนักงานได้ใช้สำหรับอ้างอิงในการปฏิบัติงานต่อไป

2) ควรนำการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการไปทดลองใช้กับการอบแห้งเตาหลอมในช่วงอุณหภูมิ 950-1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวใช้อุณหภูมิในการอบแห้งใกล้เคียงกับเงื่อนไขเดิมก่อนปรับปรุง (950 องศาเซลเซียส) แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเงื่อนไขเดิมจาก 3 วัน เหลือ 1 วัน (Figure 5) ซึ่งน่าจะมีผลทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งน้อยลง ดังนั้น หากสามารถนำการดำเนินการอย่างวิวัฒนาการไปประยุกต์ได้จะช่วยบริษัทฯ ประหยัดพลังงาน

ไฟฟ้าในการอบแห้งได้ด้วย และควรศึกษาค่าใช้จ่ายที่ลดลงหลังจากดำเนินการแก้ไขปัญหาการแตกร้าวเพิ่มเติมเพื่อนำเสนอต่อประธานกรรมการผู้จัดการต่อไป

3) เพื่อให้การดำเนินการอย่างวิวัฒนาการเป็นวิธีที่ง่ายเหมาะสำหรับพนักงานหน้างาน จึงควรเปลี่ยนจากการคำนวณด้วยมือบน EVOP worksheet มากระทำอยู่ในส่วนของ MS Excel worksheet โดยพนักงานเพียงแต่ป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม MS Excel จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณต่าง ๆ ให้อย่างถูกต้องรวดเร็ว

Table 3 White board

Ph:2 Cy:3	Response: Drain Water (kg)			Response: (%RH) 100°C		
	Ti (h)			Ti (h)		
Te (°C)	48	52	56	48	52	56
780	73.0		74.8	4.3		4.2
770	73.3			4.2		
760	72.2	71.6		4.6	4.3	
Stdev.	0.82			0.40		
E.limit	0.95			0.46		
Effect						
Ti(hr):	0.28			0.05		
Te (°C)	0.75			0.02		
TixTe:	1.45			-0.38		

Stdev=Standard deviation, E.Limit = Error limit

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณศรารุจ ดวงแก้ว ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายผลิต ตลอดจนช่างเทคนิคและพนักงานฝ่ายผลิต บริษัท โทเนทสีไทย จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองและเก็บข้อมูล

#### 6. References

- [1] Thailand Automotive Institute (TAI). 2018. **Material Technology Study Project for Electric Vehicle Manufacturing**. Samut Prakan: TAI. (in Thai)
- [2] Collot, J. 2001. Review of new process technologies in the aluminum die-casting industry. **Materials and Manufacturing Processes**. 16(5): 595-617.

- [3] Pinrath, N. 2014. **Mechanical Properties Testing of A356 Aluminum Alloys Produced by Horizontal Indirect Squeeze Casting Process.** M.Eng. Thesis, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- [4] Jenkins, J., Piper, P. and Proctor, J. 2011. Important considerations for refractory dryouts, startups & shutdowns. In: **Proceedings of 2011 Sulfur Recovery Symposium**, 13-16 September 2011. Vail, Colorado, USA.
- [5] Zabolotskii, A.V. and et al. 2011. Mathematical modeling of the movement of moisture in refractory concrete and gunning bodies during drying. **Refractories and Industrial Ceramics.** 57(6): 578-584.
- [6] Nikiforov, A.S. and et al. 2020. Refractory material moisture metering when heating high-temperature units. **Refractories and Industrial Ceramics.** 61(2): 224-227.
- [7] Pietraszek, J., Radek, U. and Goroshko, A.V. 2020. Challenges for the DOE methodology related to the introduction of Industry 4.0. **Production Engineering Archives.** 26(4):190-194.
- [8] Wass, N. and Czupryna, S.W. 2015. **Overcoming Process Improvement Obstacles: A JMP/EVOP Case Study.** <https://community.jmp.com/t5/Discovery-Summit-2015/Overcoming-Process-Improvement-Obstacles-A-JMP-EVOP-Case-Study/tap/22209>. Accessed 14 October 2021.
- [9] Hahn, G.J. 1987. **Process Improvement Through Simplex EVOP.** <https://paperzz.com/doc/6814173/process-improvement-through-simplex-evop>. Accessed 14 October 2021.
- [10] Ginting, E., Tambunan, M.M. and Syahputri, K. 2018. Application study of evolutionary operation methods in optimization of process parameters for mosquito coils Industry. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.** 309: 012031.
- [11] Box, G.E.P. 1955. Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics).** 6(2): 81-101.
- [12] Innocentini, M.D.M. and et al. 2004. Dewatering refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin.** 83(7): 9101-9108.
- [13] Chutima, P. 2002. **Engineering Experiment Design.** Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- [14] Kazemi, N. 2019. Reasons for crack propagation and strength loss in refractory castables based on changes in their chemical compositions and micromorphologies with heating special focus on the large blocks. **Journal of Asian Ceramic Societies.** 7(2): 109-126.
- [15] Pongdet, J. 2018. **Development of Monolithic Refractories.** <https://blog.biokeram.com/development-of-monolithic-refractories>. Accessed 12 October 2021.
- [16] Poblano-ojinaga, E.R. and et al. 2019. Optimization of the resistance of Eps parts for packaging television through design of experiments. **Dyna Management.** 7(1): 1-11.