



การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดความแปรปรวนในการวัดค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง  
ของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไตร์ฟ

โดย  
นายพัศพงศ์ นิลธำรงกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดความแปรปรวนในการวัดค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง  
ของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**ANALYSIS OF THE SOURCES OF VARIATION IN LPC MEASUREMENT ON  
HARD-DISK DRIVE SUSPENSIONS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**Master of Engineering Program in Engineering Management**

**Department of Industrial Engineering and Management**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2015**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การวิเคราะห์ แหล่งกำเนิดความแปรปรวนในการวัดค่าอนุภาคบนแป้นตักข้างของแขนจับหัวอ่านเขียน ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ” เสนอโดย นายพัศพงศ์ นิลธำรงกุล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม)

...../...../.....

กรรมการ

(ดร.อิสราวิทย์ เชาว์พานิช)

...../...../.....

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์)

...../...../.....



56405312 : สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

คำสำคัญ : ความแปรปรวน , แขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ , อนุภาคปนเปื้อนตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงาน

พศพงษ์ นิลธำรงกุล : การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดความแปรปรวนในการวัดค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้างของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์. 103 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาแหล่งกำเนิดความแปรปรวนของกระบวนการวัดค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Particle Counter; LPC) บนแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และเพื่อค้นหาสภาวะที่เหมาะสมของการชักสุ่มตัวอย่างจากกระบวนการล้างและปัจจัยของกระบวนการวัดค่า LPC ที่ทำให้ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation; %RSD) ของค่า LPC มีค่าต่ำที่สุด(ค่า %RSD เฉลี่ยในปัจจุบันเท่ากับ 28.49%) โดยการทดสอบทางสถิติแบบ One-Way ANOVA ของปัจจัยในกระบวนการชักสุ่ม ได้แก่ ช่วงเวลาและตำแหน่งของชิ้นงานจากเครื่องล้าง และการทดสอบแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบของปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC ประกอบด้วย ปริมาตรร้อยละของออกซิเจนในน้ำที่ใช้สกัด กำล้างวัด และเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญในกระบวนการล้าง คือตำแหน่งของชิ้นงานในเครื่องล้าง โดยที่ตำแหน่งกลางตะกร้าล้างงานจะให้ค่า %RSD ต่ำที่สุดที่ 21.07% และปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญในกระบวนการวัดค่า LPC คือ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ 50% และเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนที่ 60 วินาที และทำให้สามารถควบคุมค่า %RSD ได้ต่ำที่สุดที่ 7.81% ซึ่งต่ำกว่าระดับ 20% ที่เป็นค่าเป้าหมายในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

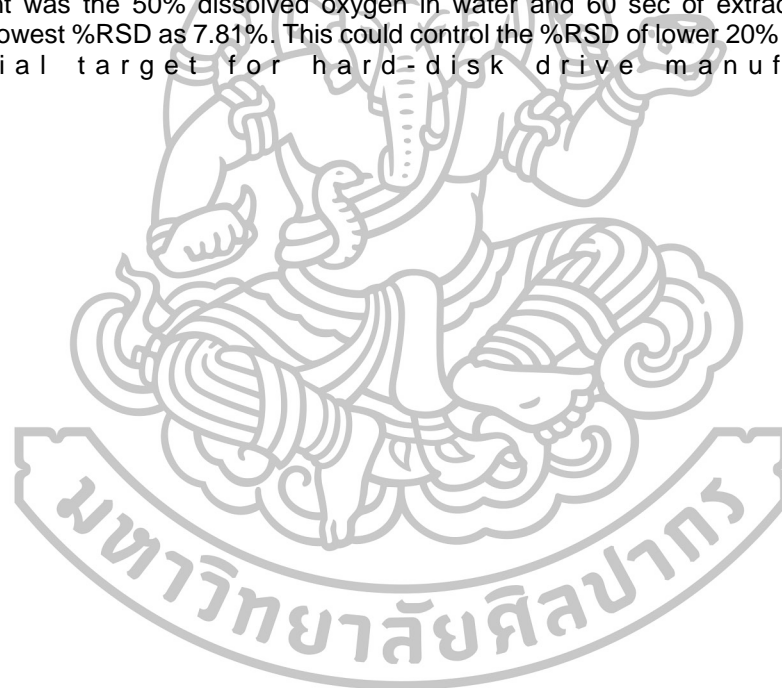
56405312 : MAJOR : ENGINEERING MANAGEMENT

KEY WORD : VARIATION , HARD-DISK DRIVE SUSPENSIONS , LPC

PUSSAPONG NINTOMRONGKUN : ANALYSIS OF THE SOURCES OF VARIATION

IN LPC MEASUREMENT ON HARD-DISK DRIVE SUSPENSIONS. THESIS ADVISOR :  
SUJIN WOOTTICHAIWAT,Ph.D.. 103 pp.

The objective of this research were to to study the sources of variation in Liquid Particle Counts (LPC) measurement of contamination residue on the surface of hard-disk drive suspensions and to find the optimal condition of sampling plan from cleaning process and parameters from the LPC measurement resulting in the lowest Relative Standard Deviation (%RSD)(current %RSD value is 29.49%) through the statistical One-Way ANOVA test on sampling period and sample location in cleaning machine as well as the full factorial test on Oxygen percentage in DI water, ultrasonic power, and extraction time. The finding showed that significant factor in cleaning process was the sample location by the middle of cleaning basket showed the lowest %RSD as 21.07% and the significant effective parameter in LPC measurement was the 50% dissolved oxygen in water and 60 sec of extraction time that showed the lowest %RSD as 7.81%. This could control the %RSD of lower 20% which was the industrial target for hard-disk drive manufacturer.



---

Department of Industrial Engineering and Management

Student's signature.....

Thesis Advisor's signature .....

Graduate School, Silpakorn University Academic

Year 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากอาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนท่านประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการมหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้คำปรึกษา ให้ข้อชี้แนะ และให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำของคุณพงศกร เสือประเสริฐ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางจนวิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณจิราพร ชัยประภา ผู้จัดการส่วนงานห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทางเคมีของบริษัทที่ผู้วิจัยทำงานอยู่ ที่ได้ ให้ความสนับสนุนด้านต่างๆ ทั้งด้านกำลังใจ ด้านข้อคิดเห็น เสนอแนะ และด้านการสนับสนุนเครื่องมือห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ จนมีส่วนทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด รวมทั้งขอขอบคุณผู้เขียนหนังสือ และบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณการสนับสนุนด้านกำลังใจและการช่วยเหลือจากสมาชิกครอบครัวนิลธำรงกุลและวรรณ โภकिनทุกคนที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา จนทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ซึ่งท่านได้วางรากฐานชีวิต พื้นฐานทางความคิดให้ผู้เขียนมีความเชื่อมั่นในสิ่งที่ถูกต้อง และอันเป็นแนวทางไปสู่ความสำเร็จในภายภาคหน้า

## สารบัญ

หน้า

|   |    |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....   | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                                      | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ  |
| สารบัญตาราง .....   | ญ  |
| สารบัญภาพ .....   | ฎ  |
| บทที่   |    |
| 1 บทนำ.....   |    |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                           | 1  |
| วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                  | 5  |
| ขอบเขตของงานวิจัย.....  | 5  |
| ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน.....                              | 5  |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....                     | 6  |
| แผนการดำเนินงานวิจัย.....                                     | 7  |
| 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                    |    |
| แนวคิดทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิก.....                              | 8  |
| นิยามและความหมายของคลื่นอัลตราโซนิก.....                      | 8  |
| หลักการทำงานของกระบวนการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิก.....       | 9  |
| ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก..... | 11 |
| ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง.....                                   | 15 |
| การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....                          | 18 |
| การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบบางส่วน.....                | 22 |
| การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบบางส่วน $2^{k-1}$ .....     | 23 |
| แบบจำลองการถดถอย.....   | 28 |
| แนวคิดทฤษฎีแผนการชักสุ่มตัวอย่าง .....                        | 28 |
| การวิเคราะห์ระบบการวัด.....                                   | 33 |
| ศึกษาและสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                     | 38 |



| บทที่ | หน้า  |
|-------|---|
| 3     | วิธีดำเนินงานวิจัย.....   |
|       | การศึกษาและสำรวจสภาพปัญหา.....41  |
|       | กระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ.....41                     |
|       | การวิเคราะห์ค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้างผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว.....43       |
|       | การสำรวจสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นของบริษัทกรณีศึกษา.....44                     |
|       | การออกแบบการทดลองและการวางแผนการทดลอง.....45                              |
|       | การออกแบบการชักกลุ่มตัวอย่าง.....45                                       |
|       | การกำหนดรูปแบบการชักกลุ่มตัวอย่างเพื่อเข้าสู่กระบวนการทดสอบค่า LPC.....46 |
|       | การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ.....47                              |
|       | รูปแบบการทดลอง.....48   |
|       | ตัวแปรควบคุม.....50   |
|       | ตัวแปรตอบสนอง.....50  |
|       | การวิเคราะห์ผลทางสถิติและการสรุปผล.....50                                 |
| 4     | ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....   |
|       | ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการทดสอบค่า LPC.....52                   |
|       | ผลการทดลองการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่างจากเครื่องล้างจาน.....55          |
|       | การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น.....56                                    |
|       | การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง.....57                             |
|       | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %RSD.....59                                 |
|       | การทดสอบความแตกต่างของค่า %RSD.....60                                     |
|       | ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบของกระบวนการวัดค่า LPC.....62            |
|       | การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น.....62                                    |
|       | การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง.....64                             |
|       | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %RSD.....66                                 |
|       | การหาเปอร์เซ็นต์คอนทามิเนชัน.....69                                       |
|       | การวิเคราะห์การถดถอย.....69   |
|       | การยืนยันผลการทดลอง.....73  |

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....  |      |
| การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย .....                               | 75   |
| 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....                                |      |
| สรุปผลการวิจัย .....  | 78   |
| ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการทดสอบค่า LPC .....              | 78   |
| ผลการกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่างจากเครื่องล้างงาน .....               | 78   |
| ผลการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบของกระบวนการวัดค่า LPC ..... | 79   |
| แหล่งที่มาของความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC .....                 | 79   |
| ปัจจัยที่เหมาะสมในการวัดค่า LPC ที่ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุด ..... | 80   |
| อภิปรายผลการวิจัย .....   | 81   |
| ปัจจัยที่มีผลในกระบวนการชักสุมตัวอย่างจากเครื่องล้างงาน .....       | 81   |
| ปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC .....                | 81   |
| สมการถดถอย .....  | 82   |
| ข้อเสนอแนะ .....  | 85   |
| รายการอ้างอิง .....   | 86   |
| ภาคผนวก .....   | 88   |
| ภาคผนวก ก การเก็บข้อมูลค่า %RSD แบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ .....       | 89   |
| ภาคผนวก ก การพัฒนาตนเอง .....                                       | 100  |
| ประวัติผู้วิจัย .....   | 103  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า   |
|----------|--|
| 1.1      | ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย.....7  |
| 2.1      | อัตราส่วนผลกระทบของปัจจัยหลักต่อจำนวนปัจจัยรวมทั้งหมดในการทดลอง.....23       |
| 2.2      | วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับ 4 ปัจจัย .....24          |
| 2.3      | อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัย .....25                                |
| 2.4      | การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบบางส่วนของ 4 ปัจจัย.....25                     |
| 2.5      | โครงสร้างคู่แฝดแฝงของ 4 ปัจจัย.....26  |
| 2.6      | ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธี Nested ANOVA .....37               |
| 2.7      | ความคาดหมายของค่ามัชฌิมกำลังสอง .....38                                      |
| 3.1      | ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองรูปแบบการชักกลุ่มตัวอย่าง ..... 46              |
| 3.2      | ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง .....48                              |
| 3.3      | ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง ..... 49                                       |
| 3.4      | ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง ..... 51               |
| 4.1      | ข้อมูลค่า %RSD ที่ใช้วิเคราะห์ GR&R..... 52                                  |
| 4.2      | ข้อมูลค่า %RSD จากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์..... 54                             |
| 4.3      | ค่า %RSD ที่ได้จากการบวกรวดค่า LPC จากการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่าง .....55 |
| 4.4      | ค่า %RSD ที่ได้จากการบวกรวดค่า LPC ในปัจจุบัน ..... 56                       |
| 4.5      | เปอร์เซ็นต์คอนทิวชัน ..... 69  |
| 4.6      | สมการถดถอย ..... 72  |
| 4.7      | ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง ..... 73              |
| 4.8      | ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง ..... 73                                  |
| 4.9      | ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ..... 75                 |
| 4.10     | แสดงผลลัพธ์การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย A..... 75                         |
| 4.11     | แสดงผลลัพธ์การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย B-4..... 76                       |
| 5.1      | ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ..... 79                 |
| 5.2      | ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุด..... 80                   |
| 5.3      | ระดับปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอย..... 83                            |

## สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|------|
| 1.1    | 1    |
| 1.2    | 3    |
| 1.3    | 4    |
| 2.1    | 8    |
| 2.2    | 10   |
| 2.3    | 11   |
| 2.4    | 14   |
| 2.5    | 15   |
| 2.6    | 19   |
| 2.7    | 31   |
| 2.8    | 34   |
| 3.1    | 42   |
| 3.2    | 43   |
| 3.3    | 43   |
| 3.4    | 45   |
| 4.1    | 53   |
| 4.2    | 55   |
| 4.3    | 56   |
| 4.4    | 57   |
| 4.5    | 58   |
| 4.6    | 58   |
| 4.7    | 59   |
| 4.8    | 59   |
| 4.9    | 60   |

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.10 การวิเคราะห์ 2-Sample T-Test ระหว่างค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองกับค่า<br>%RSD ในปัจจุบัน .....                               | 61   |
| 4.11 การวิเคราะห์ 2-Sample T-Test ระหว่างค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองตำแหน่งที่ 1<br>(ริมตะกร้า) กับตำแหน่งที่ 2 (กลางตะกร้า)..... | 61   |
| 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อน<br>กับค่า %RSD .....                                   | 62   |
| 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอุลตราโซนิกกับค่า %RSD .....  | 63   |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนกับค่า %RSD.....  | 63   |
| 4.15 การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้างของค่า %RSD.....   | 64   |
| 4.16 การกระจายตัวเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง .....   | 65   |
| 4.17 ความเสถียรของความแปรปรวนค่า %RSD.....   | 65   |
| 4.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %RSD.....   | 66   |
| 4.19 ส่วนตกค้างของค่า %RSD.....  | 67   |
| 4.20 ผลของปัจจัยหลักต่อค่า %RSD .....  | 67   |
| 4.21 อันตรกิริยาของปริมาณของออกซิเจนกับเวลาในการสกัดที่มีผลต่อค่า %RSD .....   | 68   |
| 4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Response Surface (A) .....   | 70   |
| 4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 1 (B-1).....  | 70   |
| 4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 2 (B-2)<br>(ตัดปัจจัยหลักด้านกำลังวัตต์).....               | 71   |
| 4.25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 3 (B-3)<br>(ตัดปัจจัยหลักด้านเวลา).....                     | 71   |
| 4.26 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 4 (B-4)<br>(ตัดปัจจัยร่วมระหว่างกำลังวัตต์กับเวลา) .....    | 71   |
| 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนกับค่า %RSD.....  | 74   |
| 4.28 การวิเคราะห์ 2-Sample t ระหว่างค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำที่เวลาในการ<br>สกัด 60 วินาทีกับ 90 วินาที.....                | 74   |
| 4.29 การกระจายตัวแบบปกติของค่าร้อยละส่วนต่างของสมการถดถอย B-4 .....  | 77   |
| 5.1 ร้อยละของผลกระทบของกระบวนการที่มีต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC .....   | 80   |

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.2 ร้อยละส่วนต่างของค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง<br>เทียบกับค่า %RSD ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการถดถอย ..... | 83   |
| 5.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอย .....  | 84   |
| 5.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอย (ตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ) .....  | 84   |
| 5.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimization ของปัจจัย 3 ปัจจัยต่อค่า %RSD....  | 85   |

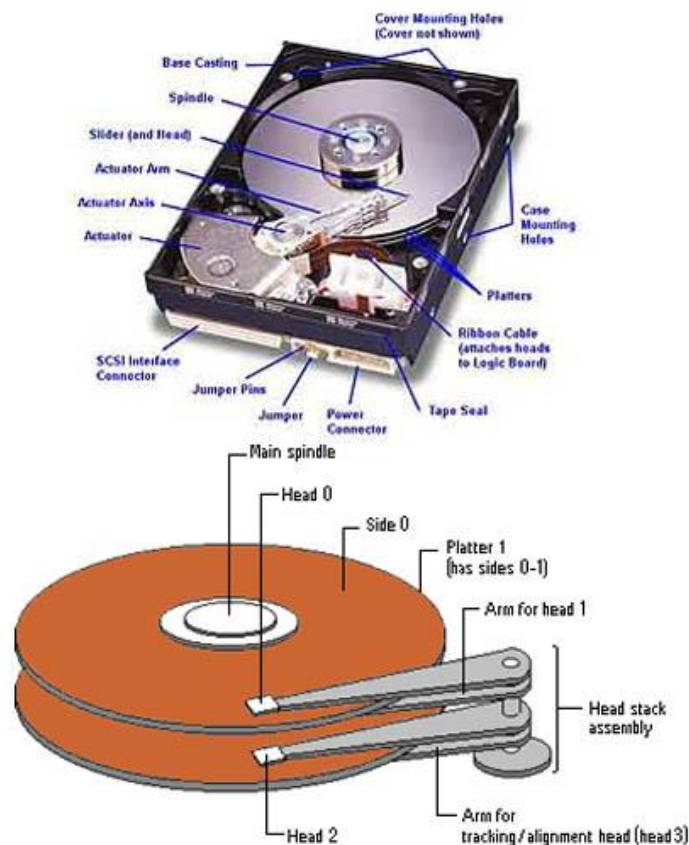


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้หลักการแม่เหล็กบันทึกข้อมูล มีการเปลี่ยนค่าของสนามแม่เหล็กให้เป็นไปตามค่าของข้อมูลที่บันทึก ซึ่งฮาร์ดดิสก์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแผ่นจานแม่เหล็ก(platters) สองแผ่นหรือมากกว่ามาจัดเรียงอยู่บนแกนเดียวกันเรียกแกนหมุน(Spindle) ดังภาพที่ 1.1 ทำให้แผ่นแม่เหล็กหมุนไปพร้อมๆกัน จากการขับเคลื่อนของมอเตอร์ด้วยความเร็ว 3,600 รอบต่อนาที แต่ละหน้าของแผ่นจานแม่เหล็กจะมีหัวอ่านเขียนประจำเฉพาะเพื่อทำการบันทึกหรืออ่านข้อมูล โดยหัวอ่านเขียนทุกหัวจะเชื่อมติดกันคล้ายหัวที่สามารถเคลื่อนเข้าออกระหว่างแทร็คต่างๆได้อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 1.1 ชิ้นส่วนที่พบในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ที่มา : จีราวุธ วารินทร์,สุทธิพันธุ์ แสนละเอียด. ความรู้พื้นฐานของฮาร์ดดิสก์. เข้าถึงเมื่อ 5 ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.rangforever.com/news.php?id=15>

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก ส่งผลให้ปริมาณข้อมูลที่ต้องการบันทึกเพิ่มขึ้น ขณะที่ขนาดของอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลมีขนาดเล็กลง ด้วยเหตุนี้ทางผู้พัฒนาจำเป็นต้อง

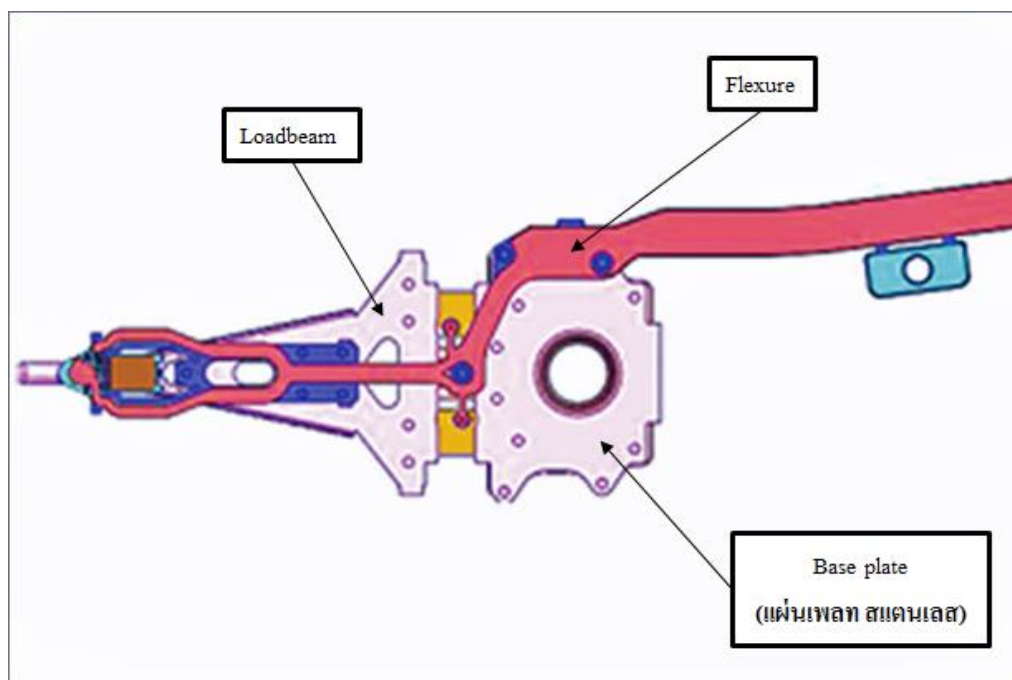
วางหัวอ่านให้ใกล้กับแผ่นจานแม่เหล็กมากขึ้น เพื่อลดการสูญเสียสัญญาณ จากเดิมในปี 1973 ที่หัวอ่านเขียนบิตอยู่ห่างแผ่นจานแม่เหล็กประมาณ 17 ไมโครเมตร ในปัจจุบันนี้หัวอ่านเขียนบิตอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็กเพียง 3 ไมโครเมตรเท่านั้น ซึ่งการทำงานของฮาร์ดดิสก์นั้น หัวอ่านเขียนจะไม่สัมผัสกับแผ่นจานแม่เหล็กที่กำลังหมุนอยู่เลย และหากแผ่นจานแม่เหล็กเกิดความเสียหาย อาทิ เช่น รอยขีดข่วน จะส่งผลให้ข้อมูลที่มีการบันทึกอยู่เกิดความเสียหายด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกปิด ฮาร์ดดิสก์จะหยุดหมุนแล้วหัวอ่านเขียนจะเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ปลอดภัย ซึ่งแยกอยู่ต่างหากจากพื้นที่เก็บข้อมูลและหยุดอยู่ตรงนั้น

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความสะอาดของชิ้นส่วนต่างๆ ที่จะนำมาประกอบกันเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงมีความสำคัญอย่างมาก หากมีฝุ่นหรืออนุภาคใดๆ ปนเปื้อนอยู่ภายในฮาร์ดดิสก์และอนุภาคนั้นๆ มีขนาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3 ไมโครเมตรอนุภาคนั้นๆ ก็อาจจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายขึ้นบนแผ่นจานแม่เหล็กได้ โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดจากการที่แผ่นจานแม่เหล็กที่กำลังหมุนอยู่นั้น จะมีหัวอ่านเขียนข้อมูลบิตอยู่ด้านบนด้วยระยะห่างเท่ากับ 3 ไมโครเมตร ซึ่งหากมีอนุภาคที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าหรือเท่ากับระยะห่างดังกล่าว จะทำให้เกิดการขีดข่วนบนแผ่นจานแม่เหล็กได้ ดังนั้นการมีสิ่งปนเปื้อน (Contamination) จากชิ้นส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นสาเหตุหลักประการหนึ่งส่งผลต่อคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพราะสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ทำให้มีโอกาสเกิดความเสียหายต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆ จึงจำเป็นต้องควบคุมสถานะของความสะอาดของพื้นที่ที่ทำการผลิต โดยพื้นที่ที่ถูกควบคุมสถานะของความสะอาดดังกล่าว เรียกว่า ห้องสะอาด (Clean Room) และมีการควบคุมสถานะต่างๆ เช่น อนุภาคแขวนลอยในอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน แสงสว่าง และลักษณะการไหลของอากาศ เป็นต้น

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันนี้จะมีการตรวจวัดปริมาณของสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่บนชิ้นส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีการนับปริมาณอนุภาคโดยใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Particle Counter) หรือ LPC ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดของชิ้นส่วนประกอบ

บริษัท ทรินิตี้ เป็นบริษัทผู้นำในการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังกล่าวที่ 1.2 ดังนั้นความสะอาดของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และส่วนประกอบต่างๆ ของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น แผ่นเพลทสเตนเลส จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการตรวจวัดค่า LPC ทั้งบนผลิตภัณฑ์แขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และส่วนประกอบต่างๆ ของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

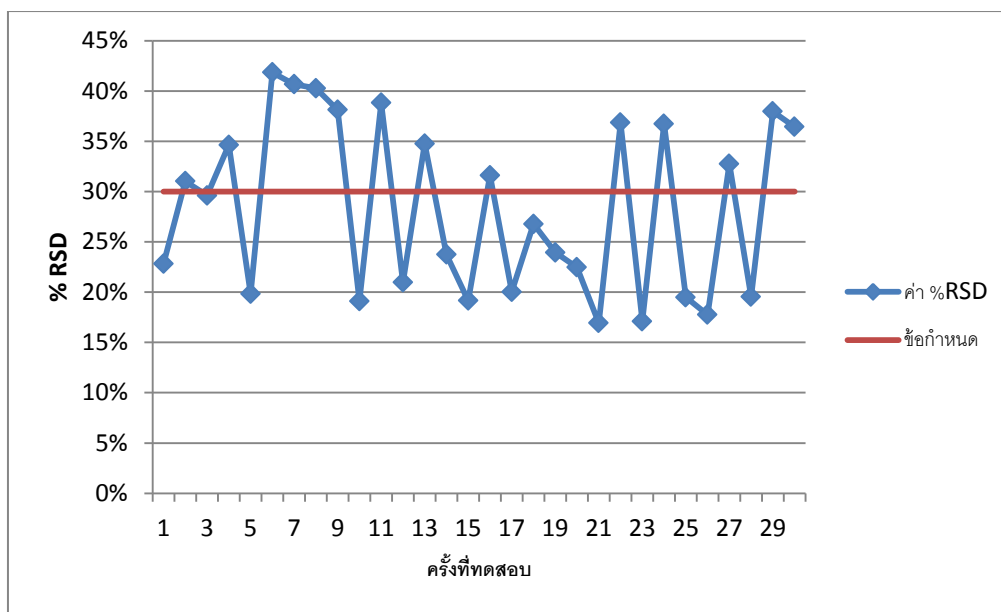




ภาพที่ 1.2 แขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และองค์ประกอบ

ที่มา : S. Pojprapai , Z. Luo , R. Yimmirun. **Frequency effect on electrical fatigue behaviour of lead zirconate titanate ceramics.** เข้าถึงเมื่อ 26 ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.theiet.org/resources/journals/eletters/4817/sharp-memory.cfm>

จากการศึกษากระบวนการวัดค่า LPC ในบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นบริษัทผู้นำในการผลิต แขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สำหรับอุตสาหกรรมการจัดเก็บข้อมูลและอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation ) หรือ %RSD เป็นค่าที่บอกถึงความแม่นยำของกระบวนการวัด หากค่า %RSD ยิ่งมีค่าน้อยเท่าไร จะแสดงให้เห็นว่ากระบวนการวัดมีความแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น



ภาพที่ 1.3 ค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC บนแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นตัวอย่าง

จากการเก็บข้อมูลค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC ของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง มีค่าดังแสดงตามภาพที่ 1.3 พบว่าค่า %RSD เฉลี่ยของกระบวนการวัดค่า LPC ของแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีค่าเท่ากับ 28% ซึ่งถือว่าเป็นตัวเลขที่ใกล้เคียงกับข้อกำหนดของลูกค้า (%RSD = 30%) ทางบริษัทกรณีศึกษาจึงมีเป้าหมายที่จะควบคุมค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC ให้มีค่าต่ำกว่า 30 %

จากการสำรวจสามารถสรุปสมมติฐานที่มาของความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC ในงานวิจัยมาจาก 2 ส่วนดังนี้

1. กระบวนการชักสุ่มตัวอย่างแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจากกระบวนการผลิตเข้าสู่กระบวนการวัดค่า LPC ในปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษายังไม่ได้มีการกำหนดแผนการชักสุ่มตัวอย่างที่ชัดเจน จะใช้การชักสุ่มตัวอย่างจากความสะดวก (convenience sampling) เป็นหลัก ซึ่งจัดเป็นการชักสุ่มตัวอย่างแบบไม่ใช้ความน่าจะเป็น (Non-probability sampling) ที่ไม่มีหลักเกณฑ์ใดๆ ในการสุ่มเลือกตัวอย่างที่อาจเป็นสาเหตุของความแปรปรวนได้

2. กระบวนการวัดค่า LPC มีปัจจัยที่อาจจะส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD) ของกระบวนการวัดค่า LPC ได้แก่ (1) ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (%DO) (2) กำลังอุลตราโซนิกที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (Power) (3) เวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (Time) โดยจะทำการศึกษากระบวนการวัดค่า

LPC บนชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ได้จากกระบวนการชักสุมตัวอย่างที่ทำการกำหนดไว้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC และรูปแบบการชักสุมตัวอย่างที่เหมาะสม เพื่อให้ค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC มีค่าน้อยที่สุด โดยศึกษาปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC ประกอบด้วย (1) ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (%DO) (2) กำลังอุลตราโซนิกที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (Power) และ (3) เวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (Time) ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาแหล่งกำเนิดความแปรปรวนของกระบวนการวัดค่า LPC
- 1.2.2 ศึกษาเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC ที่ทำให้ค่า %RSD มีค่าต่ำที่สุด

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีขอบเขตในการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ในกระบวนการวัดค่า LPC จะใช้คลื่นอุลตราโซนิกสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานทดสอบโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสกัด
- 1.3.2 ในการศึกษากระบวนการชักสุมตัวอย่างและปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC ที่ส่งผลต่อค่า %RSD จะทำการทดสอบบนแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

## 1.4 ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษากระบวนการชักสุมตัวอย่างและกระบวนการวัดค่า LPC ในปัจจุบันและปัญหาที่เกิดขึ้น
- 1.4.2 ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.3 วิเคราะห์กระบวนการชักสุมตัวอย่างและกระบวนการวัดค่า LPC เพื่อกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่นำไปใช้ในการทดลอง
- 1.4.4 ออกแบบการทดลองและกระบวนการชักสุมตัวอย่างที่เหมาะสม
- 1.4.5 ดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้

1.4.6 วิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหารูปแบบการชักสุมตัวอย่างและค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลกระทบต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC

1.4.7 ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง

1.4.8 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการวัดค่า LPC ที่ส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC ได้

1.5.2 ลดระยะเวลาในการตรวจสอบค่า LPC ลง ในกรณีที่ต้องทำการตรวจสอบซ้ำเมื่อค่า %RSD เกินข้อกำหนดของลูกค้า

1.5.3 ลดปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบค่า LPC ลง ในกรณีที่ต้องทำการตรวจสอบซ้ำเมื่อค่า %RSD เกินข้อกำหนดของลูกค้า

1.5.4 เพิ่มความน่าเชื่อถือในกระบวนการวัดค่า LPC



## 1.6 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

กำหนดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย ดังตารางที่ 1.1  
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

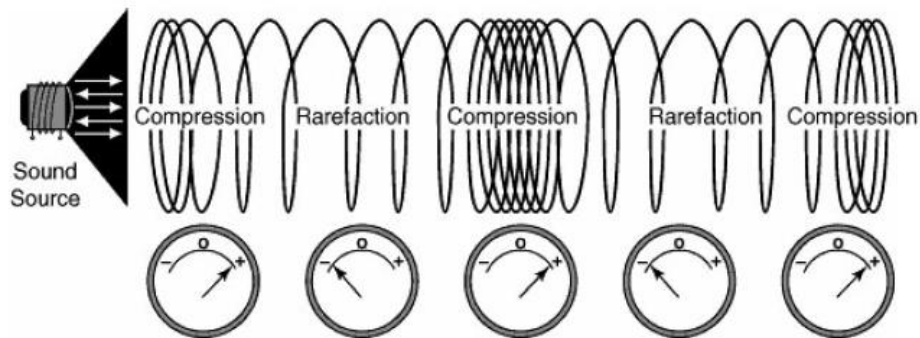
| ขั้นตอนการดำเนินงาน   | พ.ศ. 2558 |      |      |      | พ.ศ. 2559 |      |       |       |      |       |      |  |
|---|-----------|------|------|------|-----------|------|-------|-------|------|-------|------|--|
|   | ก.ย.      | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค.      | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. | ก.ค. |  |
| 1. ศึกษากระบวนการชักส้อมตัวอย่างและกระบวนการวัดค่า LPC ในปัจจุบันและปัญหาที่เกิดขึ้น                                      |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 2. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง   |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 3. วิเคราะห์กระบวนการชักส้อมตัวอย่างและกระบวนการวัดค่า LPC เพื่อกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่นำไปใช้ในการทดลอง             |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 4. ออกแบบการทดลองและกระบวนการชักส้อมตัวอย่างที่เหมาะสม  |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 5. ดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้   |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 6. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหารูปแบบการชักส้อมตัวอย่างและค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลกระทบต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 7. ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง   |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |
| 8. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย  |           |      |      |      |           |      |       |       |      |       |      |  |

## บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิก [3],[4]

คลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นเหนือเสียง (ultrasonic waves) เป็นคลื่นเสียงความถี่สูงมากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์จนถึง 106 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูของคนปกติไม่สามารถได้ยิน เพราะหูของคนปกติได้ยินเสียงในช่วงความถี่ 16 เฮิร์ตซ์ ถึง 16,000 เฮิร์ตซ์ ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการทำมาสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaning) อยู่ในช่วง 20-100 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยความถี่ของการล้างที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ในช่วง 20-50 กิโลเฮิร์ตซ์ ความถี่ที่มากกว่า 50 กิโลเฮิร์ตซ์ใช้ในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกขนาดเล็กที่ใช้ในร้านอัญมณีและคลินิกทันตกรรม เป็นต้น

คลื่นเสียงเกิดขึ้นจากการสั่นของแหล่งกำเนิดแล้วมีการถ่ายทอดพลังงานผ่านตัวกลาง โดยการสั่นสะเทือนของวัตถุ (การเปลี่ยนแปลงความดันภายในตัวกลาง) ทำให้โมเลกุลของตัวกลางมีการบีบเข้าหากัน (ความดันมีค่ามาก) เรียกว่า ช่วงอัดหรือส่วนอัด (compression) และบริเวณที่โมเลกุลของตัวกลางคลายหรือแยกตัวห่างจากกัน (ความดันมีค่าน้อย) เรียกว่า ช่วงขยายหรือส่วนขยาย (rarefaction) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การสั่นของคลื่นเสียง

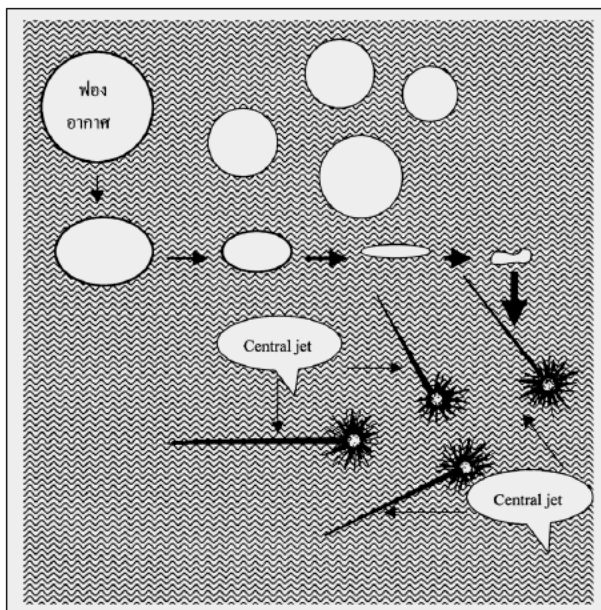
ที่มา : ชีวันันท์ อมรศรีสัจจะ. “การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดแขนจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ใช้เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.

เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ใช้ในการทำความสะอาดซึ่งในที่นี้คือน้ำ จะทำให้เกิดเป็นคลื่นน้ำและฟองอากาศขึ้น เนื่องจากคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเกิดการถ่ายเทพลังงานให้โมเลกุลของน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการเกิดและแตกของฟองอากาศขนาดเล็ก จำนวนมากอย่างรวดเร็ว โดยเรียกระบวนการนี้ว่าคาวิเทชัน(cavitation) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะมีขนาดแตกต่างกัน โดยมีทั้งชนิดที่เกิดขึ้นแล้วแตกทันที (temporary bubble) และชนิดที่เป็นฟองอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงแตกออก (stable bubble) ซึ่งการแตกของฟองอากาศจะเกิดแรงดันต่อพื้นผิวของชิ้นงานที่สัมผัสทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยการเกิดคาวิเทชันแบ่งได้เป็น 3 ระยะดังนี้

**2.1.1 ระยะเริ่มต้น (initial phase) หรือ bubble phase** เป็นระยะสร้างฟองอากาศขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เกิดความดัน 2 ทิศทาง (dielectric pressure) ที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดฟองสุญญากาศ (vacuum bubble) เนื่องจากมีนิวเคลียสซึ่งอาจเป็นไอน้ำที่เกิดจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำถูกทำลาย หรือเป็นแก๊สที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน หรือเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ( $5 \times 10^{-5} - 10^3$  เซนติเมตร) ที่อยู่ในน้ำ

**2.1.2 ระยะทำลายฟองขนาดใหญ่ (catastrophic phase)** โดยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน จำนวนนับล้านฟอง

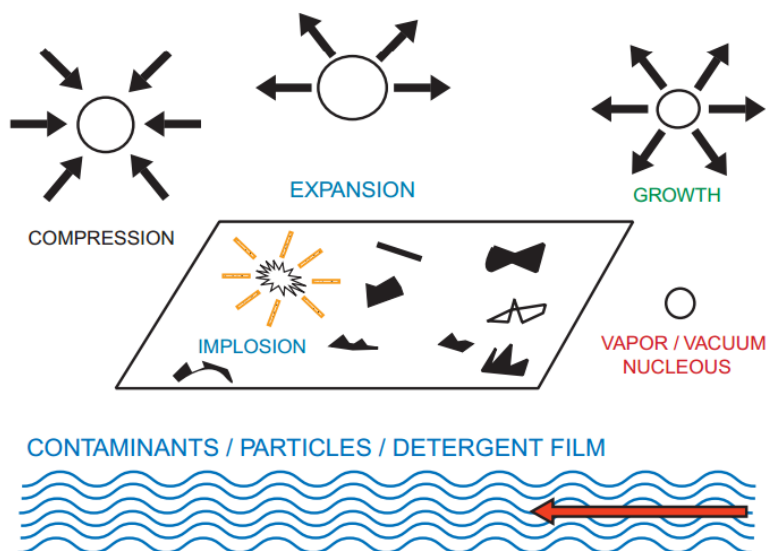
**2.1.3 ระยะสุดท้าย (final phase)** เป็นระยะสร้างความดันสูง เกิดขึ้นเนื่องจากฟองอากาศยุบตัวและแตกออก (collapse) ของฟองอากาศ ทำให้เกิดแรงดันของของเหลว (hydrostatic pressure) ฟุ้งออกมาเป็นลำจากฟองอากาศแต่ละฟองที่เรียกว่าเซนทรัลเจต (central jet) ดังภาพที่ 2.2 ดังนั้นถ้าใช้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีแรงดันกระทำต่อผิวของชิ้นงาน ถึง 40,000 ครั้ง/วินาที ซึ่งจำนวนฟองอากาศ และแรงระเบิดของฟองอากาศ นอกจากจะขึ้นอยู่กับความถี่และความแรงของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางในการทำความสะอาดอีกด้วย โดยที่อุณหภูมิของตัวกลางที่สูงกว่า จะส่งผลให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากขึ้นแต่แรงดันของของเหลวจะน้อยลง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความดันและปริมาณแก๊สในตัวกลางซึ่งถ้ามีแก๊สในตัวกลางมากจะทำให้เกิดฟองอากาศได้น้อยลง



ภาพที่ 2.2 การเกิดควิเทชั่นในตัวกลางที่เป็นของเหลว  
ที่มา : ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. เครื่องมือวิทยาศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานา  
วิทยา, 2544.

ฟองอากาศก่อนแตกตัวนั้นมีอุณหภูมิสูงถึง 9,900 องศาฟาเรนไฮต์ และความดันที่สูงถึง 500 atm (Atmosphere) ซึ่งฟองอากาศจะแตกในลักษณะที่พุ่งออกมาเป็นลำแคบที่มีขนาดหนึ่งในสิบของขนาดฟองอากาศที่เรียกว่าเซนทรัลด้วยความเร็วถึง 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผ่านพื้นผิวชิ้นงานด้วยความดัน อุณหภูมิ และความเร็วที่สูง ทำให้สามารถดึงสิ่งปนเปื้อนที่ยึดติดกับผิวชิ้นงานออกมาได้ ซึ่งการเกิดคลื่นน้ำและฟองอากาศขนาดเล็กมากซ้ำแล้วซ้ำอีกดังแสดงในภาพที่ 2.3 จะทำให้เกิดพลังงานมหาศาลที่สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 10,000 องศาฟาเรนไฮต์ และทำให้ความดันเพิ่มมากกว่า 10,000 psi (Pounds per Square Inch: lb/in<sup>2</sup>) ซึ่งจะสร้างพลังการชะล้างสิ่งปนเปื้อนออกจากพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างหมดจดและเข้าถึงทุกซอกทุกมุม





ภาพที่ 2.3 การเกิดและหายไปของฟองอากาศในกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค  
ที่มา : พงศกร เสือประเสริฐ. “การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาด  
แผ่นเพลทสแตนเลสของชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีผลต่อค่าอนุภาคปนเปื้อน  
ตกค้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2557.

การล้างงานด้วยเครื่องอุลตราโซนิคนี้จะมีทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับสร้างคลื่นอุลตราโซนิค  
นิกซ์อยู่ในบ่อของสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อทรานสดิวเซอร์เกิดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่  
ประมาณ 20-80 กิโลเฮิร์ตซ์ จะทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆจำนวนมากหลังจากนั้นฟองอากาศเหล่านี้  
จะเกิดการแตกตัว ดังนั้นในบ่อที่บรรจุทรานสดิวเซอร์จะมีฟองอากาศเล็กๆก่อตัวเป็นฟองและเกิด  
การแตกตัวในเวลาเดียวกันซ้ำไปมาเป็นจำนวนมาก การก่อตัวและการแตกตัวของฟองอากาศนี้ทำ  
ให้เกิดการทำความสะอาดบริเวณผิวของชิ้นงานที่แช่อยู่ในบ่อ ซึ่งคลื่นอุลตราโซนิคจะไม่ทำให้เกิด  
รอยขีดข่วน หลุม หรือทำลายตัวชิ้นงานเหมือนกับวิธีทำความสะอาดแบบอื่นๆ

## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค [5]

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทำความสะอาดมีหลายปัจจัยด้วยกันมี  
ทั้งปัจจัยที่เกิดผลดี ผลเสีย และบางปัจจัยเกิดจากผลการกระทำระหว่างกัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลกับ

ความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศในของเหลว (cavitation intensity) มีรายละเอียด ดังนี้

### 2.2.1 อุณหภูมิ

เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการพิจารณาถึงการเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศในของเหลวเนื่องจากสมบัติของของเหลวส่วนมากมีผลกระทบต่อความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศในของเหลวที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (viscosity) ค่าการละลาย(solubility) ของแก๊สในของเหลว อัตราการแพร่ (diffusion rate) ของแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวและความดันไอ (vapor pressure) ซึ่งทั้งหมดนี้มีผลต่อความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศในของเหลว ในน้ำบริสุทธิ์จะมีการเกิดและหายไปของฟองอากาศมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาฟาเรนไฮต์ ความหนืดของของเหลวต้องมีค่าน้อยที่สุดจึงจะมีการเกิดและหายไปของฟองอากาศมากที่สุด เนื่องจากของเหลวที่มีความหนืดมากจะเคลื่อนที่ช้าและไม่สามารถตอบสนองการเกิดฟองอย่างรวดเร็วได้ ความหนืดของของเหลวส่วนใหญ่จะลดลงเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับการเกิดและหายไปของฟองอากาศที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นของเหลวที่ใช้ในการล้างต้องมีปริมาณก๊าซเล็กๆ ละลายอยู่ เนื่องจากก๊าซที่ละลายอยู่จะถูกปล่อยระหว่างที่ฟองอากาศโตขึ้นและป้องกันการเกิดการยุบตัวอย่างรุนแรงขึ้น ดังนั้นปริมาณก๊าซเล็กน้อยที่ละลายอยู่ในของเหลวจึงลดลงทำให้ อุณหภูมิของของเหลวลดลงด้วย อัตราการแพร่ของก๊าซที่ละลายในของเหลวจะเพิ่มขึ้นในอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงจะมีก๊าซที่ละลายอยู่มากกว่าของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าของเหลวที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปานกลางจะทำให้ความดันไอใกล้เคียงกับความดันไอของของเหลว นั้นทำให้เกิดการเกิดและหายไปของฟองอากาศที่เป็นไอ (vaporous cavitation) โดยฟองอากาศแบบนี้จะเต็มไปด้วยไอของการเกิดและหายไปของฟองอากาศที่จุดเดือดของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดและหายไปของฟองอากาศ ดังนั้นความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศจะลดลงเมื่อของเหลวเริ่มเดือดซึ่งค่าความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic power) พลังงานที่เพิ่มขึ้นเกินขอบขีดจุดที่เริ่มเกิดการเกิดและหายไปของฟองอากาศ (cavitation threshold) จะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศไม่สามารถตั้งค่าเพิ่มได้อีก ค่าความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศเกี่ยวข้องกับทางกลับกันกับความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic frequency) ที่ความถี่เพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นของการเกิดและหายไปของฟองอากาศจะลดลง เพราะขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าและมีผลทำให้พลังงานที่ได้จากการยุบของฟองอากาศน้อยกว่า

### 2.2.2 การเลือกสารเคมี หรือสารชะล้าง

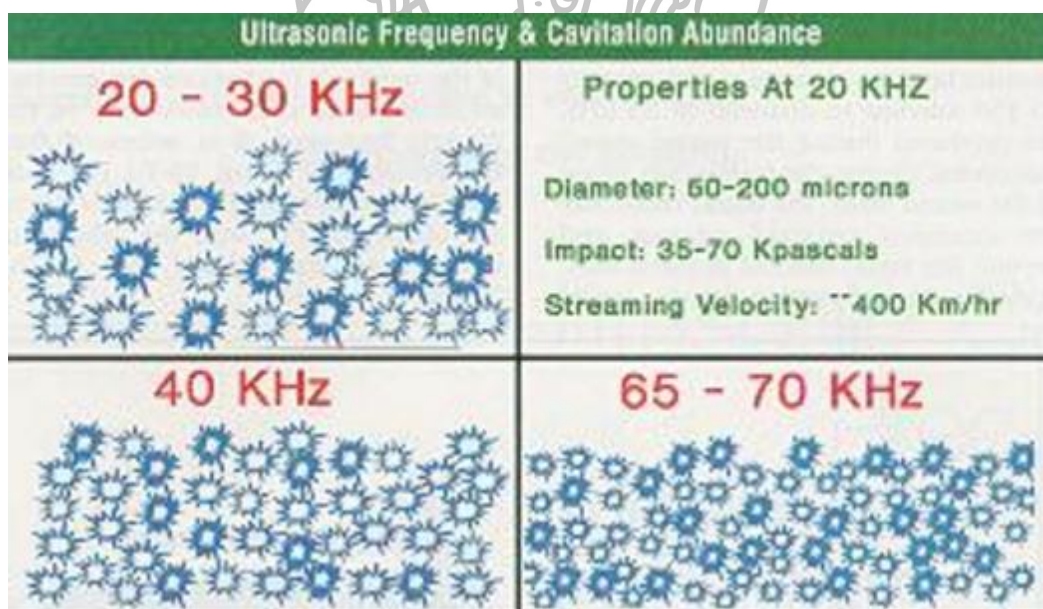
การเลือกสารเคมี หรือสารชะล้างมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะประสบความสำเร็จในกระบวนการทำความสะอาด สารเคมีที่เลือกต้องเข้ากันได้กับชิ้นงานที่นำมาทำความสะอาด และมีความสามารถในการชะล้างสารปนเปื้อนออกไปจากชิ้นงานได้ สารเคมีต้องสามารถเกิดฟองได้เป็นอย่างดี ซึ่งสารชะล้างส่วนใหญ่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกได้อย่างน่าพอใจ บางสารสามารถใช้ได้เฉพาะในระบบอุลตราโซนิก อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงการใช้สารที่ไม่มีฟองในระบบการล้างแบบหัวฉีดซึ่งสารแบบนี้เหมาะกับระบบการทำความสะอาดแบบแช่น้ำมากกว่าซึ่งสารชะล้างที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม เช่น ปิโตรเลียม(Petroleum) และเทอร์พีน (Terpene) เป็นสารกึ่งของเหลวและสามารถนำมาใช้กับระบบอุลตราโซนิกได้ซึ่งประสิทธิภาพของสารชะล้างขึ้นกับอุณหภูมิถึงแม้ว่าในน้ำบริสุทธิ์จะมีการเกิดและหายไปของฟองอากาศมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งสภาวะเหมาะสมที่สุดของกระบวนการทำความสะอาดสามารถเห็นได้จากอุณหภูมิที่สูงขึ้น หรือต่ำลง เนื่องจากผลของอุณหภูมิขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ด้วย ตามกฎทั่วไปสารเคมีแต่ละตัวจะมีความสามารถดีที่สุดที่อุณหภูมิเฉพาะของสารตัวนั้นโดยไม่ได้สนใจผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระบบอัลตราโซนิก ดังเช่น แม้ว่าความสามารถของกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาฟาเรนไฮต์ แต่ความสามารถในการทำความสะอาดของเครื่องล้างที่ดีที่สุดพบที่อุณหภูมิ 180-190 องศาฟาเรนไฮต์ เนื่องจากผลของสารเคมีจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เครื่องล้างแบบอื่นพบว่าเริ่มเสถียรและมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิเกินอุณหภูมิขั้นต่ำ (140 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับการทดลองที่ดีที่สุดในการใช้สารเคมีให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต้องใช้อุณหภูมิไม่เกิน 190 องศาฟาเรนไฮต์

### 2.2.3 กำลังอุลตราโซนิกที่ส่งไปถึงถังล้าง

กำลังอุลตราโซนิกต้องเพียงพอต่อการเกิดฟองอากาศในของเหลวที่มีชิ้นงานวัดต่อแกลลอน (watts per gallon) คือ หน่วยวัดที่ใช้วัดระดับกำลังอุลตราโซนิกที่อยู่ในถังล้าง เมื่อปริมาณถังล้างเพิ่มขึ้น ตัวเลขวัดต่อแกลลอนจะลดลง ชิ้นงานที่นำมาทำความสะอาดมีขนาดใหญ่ หรือมีอัตราส่วนของผิวต่อน้ำหนักชิ้นงาน (surface per mass) สูงจะต้องเพิ่มกำลังอุลตราโซนิกในการล้างพลังงานที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุของการเกิดและหายไปของฟองอากาศเข้าไปกักร้อน หรือทำให้เกิดการลุกไหม้ของชิ้นงานที่เปราะบางชิ้นงานมีขนาดหลากหลาย ดังนั้นเมื่อนำมาล้างควรควบคุมการปรับค่าพลังงานให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ล้าง

### 2.2.4 ความถี่

ความถี่เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการล้าง โดยทั่วไปความถี่ต่ำ (20-30 กิโลเฮิร์ตซ์) จะมีจำนวนการเกิดและหายไปของฟองอากาศน้อย ขนาดฟองใหญ่ (ประมาณ 170 ไมครอน) นิยมใช้ล้างชิ้นงานขนาดใหญ่ แข็งแรง ส่วนความถี่สูง (60-100 กิโลเฮิร์ตซ์) จะมีจำนวนการเกิดและหายไปของฟองอากาศมาก ขนาดฟองเล็ก นิยมใช้ในงานที่มีขนาดเล็กกว่างานที่มีความเปราะบาง มีความซับซ้อนสูง ที่ความถี่ 35-45 กิโลเฮิร์ตซ์ นิยมใช้ล้างส่วนประกอบชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่สำคัญประสิทธิภาพการชะล้างสิ่งปนเปื้อนจะมากขึ้นถ้าเพิ่มความถี่สูงขึ้น โดยสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกระบายได้ดีกว่าเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสิ่งปนเปื้อนกับชิ้นงานน้อยกว่า ความถี่ที่สูงกว่ายังมีประโยชน์ในการช่วยลดความหนืดของสารชะล้างทำให้สารชะล้างทำงานได้ดีขึ้นและความถี่ในกระบวนการล้างด้วยระบบอัลตราโซนิกยังมีประสิทธิภาพสูงที่อนุภาคนาขนาดตั้งแต่ 0.3 ไมครอน โดยภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกสูงขึ้น ขนาดของ cavitation จะมีขนาดเล็กลงในขณะที่จำนวน cavitation จะมีมากขึ้น



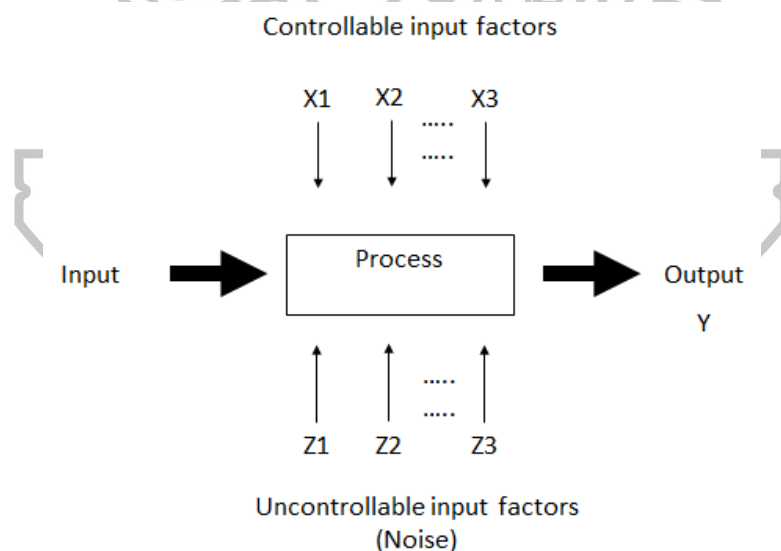
ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเกิด cavitation ที่ความถี่คลื่นอัลตราโซนิกต่างๆ

ที่มา : ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. เครื่องมือวิทยาศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, 2544.

## 2.3 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) [5]

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนปัจจัย (factor) นำเข้าของกระบวนการ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นของผลตอบ (response) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการพัฒนากระบวนการที่มีความเข้มแข็งโดยกระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักรวิธีการ หรือทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนปัจจัยขาเข้า เช่น วัตถุดิบ ไปสู่ผลลัพธ์ขาออกที่มีผลตอบออกมาหนึ่งผลตอบ หรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งปัจจัยบางชนิดเป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ในขณะที่ปัจจัยบางชนิดไม่สามารถควบคุมได้ โดยกำหนดให้ตัวแปร  $x_1, x_2, \dots, x_p$  เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (controllable) ขณะที่ แปร  $z_1, z_2, \dots, z_p$  เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable) และบางครั้งเรียกว่า ปัจจัยรบกวน (noise) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังนี้

1. การหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ  $y$
2. การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  ที่มีผลต่อค่าผลตอบ  $y$  เพื่อให้ได้ค่า  $y$  ตามต้องการ
3. การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  เพื่อที่จะให้เกิดความแปรปรวนในค่า  $y$  น้อยที่สุด
4. การหาวิธีการตั้งค่า  $x$  เพื่อที่จะให้ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้  $z$  มีค่าต่ำสุด



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ

ที่มา : พงศกร เสือประเสริฐ. “การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดแผ่นเพลทสแตนเลสของชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีผลต่อค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2557.

หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ เพลกชัน (replication), แรนดอมไมเซชัน (randomization) และ การบล็อกกลุ่ม (blocking)

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเพลกชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้ วัตถุประสงค์ของการสุ่มมีดังนี้

2.1 เพื่อขจัดอคติ หรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าทริทเมนต์ต่างๆ จะไม่ได้เปรียบและเสียเปรียบกันในเรื่องที่เกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นใน การทดลอง

2.2 การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ นั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้องเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ ทั้งนี้การสุ่มจะช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่าๆ กันการทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization)

3.การบล็อกกลุ่ม (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

ข้อดีของการออกแบบการทดลองคือ ให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่จะเก็บ

ข้อมูลได้อย่างไรและจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินงานอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา พัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลสำหรับป้อนเข้าจากบุคคลที่มีความรู้ความชำนาญในแต่ละด้าน นั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดลองเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินงานคือ การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ถ้าหากไม่มีในส่วน ของประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเข้ามาเกี่ยวข้อง การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไปแต่จะ ใช้เวลานานขึ้นเพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุกๆปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

3.2 เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขตผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลง ในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบโต้ได้อย่างไรดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์แลความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้อง ตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือการกรองปัจจัย(screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และ ควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็ มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้น ว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจ ว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่ง อาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือ ตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

3.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณา ขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บ ข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้แรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่

ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

3.5 ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

3.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

3.7 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของ นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (confirmation testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

### 2.3.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) [5]

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึงการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ การออกแบบแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบพื้นฐานในการสร้างบล็อกเพื่อการสร้างพื้นผิวผลตอบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มการออกแบบ 22 ด้วยแนวแกน (axial runs) แล้วจะให้ผลลัพธ์เป็นการออกแบบประสมส่วนกลาง(Central Composite Design) ซึ่งเป็นหนึ่งในการออกแบบที่สำคัญมากของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (Second-Order Response Surface Model) รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบได้แก่

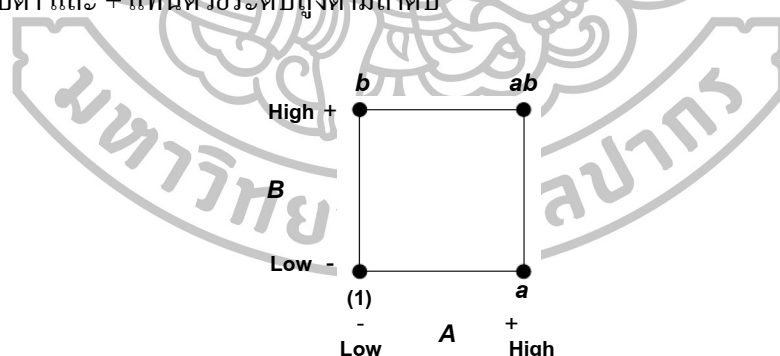
1. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับส่วน



ปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วยทำการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ  $a \times b$  การทดลองและโดยปกติจะมีจำนวนการทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง

2. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงานและใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่งๆ ในการทำซ้ำ 1 ครั้ง ที่ปริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2^k$  ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบ  $2^k$  จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

สำหรับการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^2$  ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” หรือ “สูง” การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2.5 ตามปกติแล้วเราจะแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A ใช้แทนผลของปัจจัย A, B ใช้แทนผลของปัจจัย B และ AB ใช้แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB สำหรับการออกแบบ  $2^2$  ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” บนแกน A และ B ตามลำดับ ดังนั้น เครื่องหมาย - บนแกน A จะแทนด้วยระดับต่ำ และ + แทนด้วยระดับสูงตามลำดับ



ภาพที่ 2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับของ 2 ปัจจัย

ที่มา : พงศกร เสือประเสริฐ. “การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดแผ่นเพลทสดเลนเสของชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีผลต่อค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2557.

การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ในการออกแบบดังกล่าวจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็ก ดังภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆ จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น และในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นสำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ดังนั้นสำหรับการออกแบบ  $2^k$  ในที่นี้  $a$  จะแทนการทดลองร่วมปัจจัย  $A$  ที่ระดับสูง และ  $B$  ที่ระดับต่ำ สำหรับ  $b$  แทน  $A$  ที่ระดับต่ำและ  $B$  ที่ระดับสูง ส่วน  $ab$  แทนทั้งปัจจัย  $A$  และ  $B$  อยู่ที่ระดับสูง และ  $(1)$  แทนทั้งปัจจัย  $A$  และ  $B$  อยู่ที่ระดับต่ำ

สมการของผลของ  $A$ ,  $B$  และ  $AB$  สามารถหาได้ด้วยการพิจารณาผลต่างระหว่างระดับสูงและระดับต่ำ เช่น ผลของ  $A$  สามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสอง ที่อยู่ทางด้านขวามือของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในภาพที่ 2.5 (เรียกว่า  $\bar{y}_{A^+}$  ซึ่ง  $\bar{y}_{A^+}$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของการทดลองร่วมปัจจัยที่  $A$  มีค่าสูง)กับการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ทางด้านซ้ายมือ (เรียกว่า  $\bar{y}_{A^-}$ ) นั่นคือ

$$A = \frac{\bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-}}{2n} = \frac{ab+a}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}[ab+a-b-(1)] \quad (2-1)$$

ผลของ  $B$  หาได้จากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสอง ที่อยู่ด้านบนของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในภาพที่ 2.5 (เรียกว่า  $\bar{y}_{B^+}$ ) กับค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง (เรียกว่า  $\bar{y}_{B^-}$ ) นั่นคือ

$$B = \frac{\bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-}}{2n} = \frac{ab+b}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}[ab+b-a-(1)] \quad (2-2)$$

ผลของอันตรกิริยา  $AB$  คำนวณได้จากผลต่างของค่าเฉลี่ยของผลการทดลองร่วมปัจจัยจากขวาไปซ้าย ตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในภาพที่ 2.6 ( $ab$  และ  $(1)$ ) กับค่าเฉลี่ยของผลการทดลองร่วมปัจจัยจากซ้ายไปขวาตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในภาพที่ 2.6 ( $a$  และ  $b$ )

$$AB = \frac{ab+(1)}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n}[ab+(1)-a-b] \quad (2-3)$$

ในการทดลองที่เกี่ยวกับการออกแบบ  $2^k$  จะต้องการตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยที่มีอิทธิพล เพื่อหาว่าตัวแปรตัวใดที่น่าจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ก่อให้เกิดผลขึ้น และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นตัวยืนยันข้อสรุปนั้น พิจารณาผลรวมของกำลังสองของ  $A$ ,  $B$  และ  $AB$  กำหนดให้คอนทราสต์ (Contrast) ที่จะใช้ในการประมาณผลของ  $A$  คือ

$$\text{Contrast}_A = ab + a - b - (1) \quad (2-4)$$

เราเรียกคอนทราสต์นี้ว่า ผลทั้งหมด (Total Effect) ของ  $A$  คอนทราสต์นี้ยังสามารถใช้ในการประมาณผลของ  $B$  และ  $AB$  ได้อีกด้วย ยิ่งกว่านั้นคอนทราสต์เหล่านี้ยังมีรูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) และผลรวมของกำลังสองของคอนทราสต์ใดๆ หาได้จากคอนทราสต์ยกกำลังสองหารด้วยจำนวนของข้อมูลทั้งหมด ดังนั้นผลรวมของกำลังสองของ  $A$ ,  $B$  และ  $AB$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n2^k} \quad (2-5)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{n2^k} \quad (2-6)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{n2^k} \quad (2-7)$$

และผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถหาได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{4n} \quad (2-8)$$

ปกติแล้ว  $SS_T$  จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $4n - 1$  และค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสองซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $4(n - 1)$  สามารถคำนวณได้จาก

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2-9)$$

3. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล  $3^k$  หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลางและระดับสูง ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะใช้ตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้เราสามารถ

ที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้

### 2.3.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบางส่วน (Fractional Factorial Designs) [6]

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบางส่วนหมายถึง วิธีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากจะมีจำนวนการทดลองมากเกินไปจนเกินไปจนไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการ แน่นอนว่าความแม่นยำของผลก็ไม่เท่ากับ แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติถึงเราจะสามารถดำเนินการทดลองด้วยวิธี แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบแต่อาจจะได้ผลที่แย่กว่าแฟกทอเรียลแบบบางส่วนก็ได้ เนื่องจากยิ่งมากปัจจัย (Factor) ยิ่งมากการทดลอง เราก็ยิ่งควบคุมการทดลองได้ยาก ความผิดพลาดก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่เราจะคงยืนยันใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเมื่อเรามีปัจจัยหลายตัว

นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่าในความเป็นจริงเมื่อเราดำเนินการทดลองจะมีเพียงปัจจัยหลัก(Main effects)บางปัจจัยและบางปัจจัยร่วม(Interaction) เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของปัจจัยร่วมสูงขึ้นก็ยิ่งมีโอกาสจะมีนัยสำคัญน้อยลง จึงได้นำเอาหลักการนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดขนาดของการทดลองลง



ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนผลกระทบของปัจจัยหลักต่อจำนวนปัจจัยรวมทั้งหมดในการทดลอง  
ที่มา : สันติ พุ่มกระจ่าง. “การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติด  
หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการบัณฑิต  
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552.

| จำนวน<br>ปัจจัยหลัก | จำนวน<br>ปัจจัยร่วม | จำนวน<br>ปัจจัยรวม | อัตราร้อยละของ<br>ปัจจัยหลัก |
|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|
| 1                   | 0                   | 1                  | 100.0%                       |
| 2                   | 1                   | 3                  | 66.7%                        |
| 3                   | 4                   | 7                  | 42.9%                        |
| 4                   | 11                  | 15                 | 26.7%                        |
| 5                   | 26                  | 31                 | 16.1%                        |
| 6                   | 57                  | 63                 | 9.5%                         |
| 7                   | 120                 | 127                | 5.5%                         |
| 8                   | 247                 | 255                | 3.1%                         |
| 9                   | 502                 | 511                | 1.8%                         |
| 10                  | 1013                | 1023               | 1.0%                         |

จากตารางที่ 2.1 จะพบว่าสัดส่วนผลกระทบของปัจจัยหลักต่อปัจจัยทั้งหมดจะยิ่งลดลง  
เรื่อยๆ เมื่อการทดลองนั้นมีปัจจัยมากขึ้น เช่น หากการทดลองนั้นมี 6 ปัจจัยสัดส่วนผลที่มาจาก  
ปัจจัยหลักจะมีเพียงแค่ 9.5% ของจำนวนปัจจัยรวม ที่เหลืออีก 90.5% เป็นปัจจัยร่วม ซึ่งส่วนใหญ่  
ไม่มีนัยสำคัญเชิงสถิติต่อการทดลองนั้นด้วย

### 2.3.3 วิธีการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วนแบบ $2^{k-1}$ [6]

ความหมายคือ เมื่อออกแบบเสร็จจะได้จำนวนการทดลองเท่ากับวิธีการออกแบบการ  
ทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เมื่อจำนวนปัจจัยน้อยกว่าอยู่ 1 ตัว ( $k-1$ ) หรือจำนวนการ  
ทดลองจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบนั่นเอง เราเอา  
หลักการที่ว่าอันดับของปัจจัยร่วมสูงเท่าใดก็จะมีค่าน้อยเท่านั้น และจะปัจจัยหลักบาง  
ตัวเข้าแทนที่ปัจจัยร่วมดังกล่าว ตัวอย่างที่ 1 มีปัจจัย 4 ตัวคือ A, B, C, D ถ้าออกแบบโดยใช้วิธี  $2^k$   
แบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบจะมีจำนวนรอบการทดลองทั้งหมด 16 การทดลองดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับ 4 ปัจจัย

ที่มา : สันติ พุ่มกระจ่าง. “การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการบัณฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552.

| การทดลอง | A  | B  | C  | D  |
|----------|----|----|----|----|
| 1        | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2        | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 3        | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 4        | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 5        | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 6        | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 7        | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 8        | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 9        | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 10       | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 11       | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 12       | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 13       | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 14       | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 15       | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 16       | +1 | +1 | +1 | +1 |

เมื่อต้องการทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยให้เหลือจำนวน 8 การทดลอง เท่ากับจำนวนการทดลองของ 3 ปัจจัย เราเริ่มด้วยการเขียน 3 ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมทั้งหมดดัง ตารางที่ 2.3 เราจะเรียก 3 ปัจจัยหลักนี้ว่า ตัวให้กำเนิด (Generator) ของปัจจัย D

ตารางที่ 2.3 อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัย

ที่มา : สันติ พุ่มกระจ่าง. “การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการบัณฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552.

| A  | B  | C  | AB | AC | BC | ABC |
|----|----|----|----|----|----|-----|
| -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1  |
| +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1  |
| -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1  |
| +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1  |
| -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1  |
| +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1  |
| -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1  |
| +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1  |

จากนั้นให้ใช้ค่าของปัจจัยร่วมที่มีอันดับสูงสุด เป็นค่าของปัจจัยหลักตัวที่เหลือจากตารางที่ 2.3 ปัจจัยร่วมที่มีอันดับสูงสุดคือ ABC เราจะใช้เป็นค่าของ D จึงได้ตารางการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบบางส่วนของ 4 ปัจจัย ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบบางส่วนของ 4 ปัจจัย

ที่มา : สันติ พุ่มกระจ่าง. “การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการบัณฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552.

| A  | B  | C  | D  |
|----|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 | -1 |
| +1 | -1 | -1 | +1 |
| -1 | +1 | -1 | +1 |
| +1 | +1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | +1 | +1 |
| +1 | -1 | +1 | -1 |
| -1 | +1 | +1 | -1 |
| +1 | +1 | +1 | +1 |





ถ้านำรหัสของแต่ละคอลัมน์(Column) คูณตัวเอง (ยกกำลังสอง) จะได้รหัสที่เท่ากับ (+1) ทุกตัวเสมอ และจะเรียกคอลัมน์ที่ได้ใหม่นี้ว่า I (Identity)

จากตารางที่ 2.4 เมื่อ

$$D = ABC$$

ดังนั้น ถ้าเอา D คูณทั้งสองฝั่ง จะได้เป็น

$$DD = ABCD$$

หรือ

$$I = ABCD$$

และจะเรียก  $I=ABCD$  นี้ว่า การกำหนดความสัมพันธ์ (Defining relation) ซึ่งเราสามารถนำไปใช้ในการหาคู่แฝดแฝงได้โดยนำปัจจัยที่เราอยากทราบคู่แฝดแฝงคูณทั้งสองฝั่งของสมการการกำหนดความสัมพันธ์ เช่น ถ้าอยากทราบว่า AB จากตารางที่ 2.4 เป็นคู่แฝดแฝงอยู่กับปัจจัยใดสามารถหาได้จาก

$$I(AB) = ABCD(AB)$$

$$AB = A^2B^2CD$$

$$AB = IICD = CD$$

นั่นคือ AB เป็นคู่แฝดแฝงอยู่กับ CD นั่นเอง

### 2.3.4 ความสมดุลในแนวตั้ง (Vertical Balance) [6]

ความสมดุลในแนวตั้ง (Vertical Balance) หมายถึง การทดสอบความเท่ากันของจำนวนรหัส (+1) และ (-1) ของแต่ละคอลัมน์ทั้งของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมในตารางหลังจากการออกแบบการทดลอง โดยเงื่อนไขคือผลรวมของแต่ละคอลัมน์จะต้องเท่ากับ 0 นั่นหมายความว่าเรามีการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัย นั้นให้เป็นสูงและต่ำในจำนวนครั้งที่เท่ากัน ผู้ออกแบบจะต้องทำการทดสอบทุกครั้ง

### 2.3.5 ออโทโกนอล (Orthogonal) [6]

ออโทโกนอล (Orthogonal) คือเมื่อนำรหัส (+1) หรือ (-1) ของ 2 คอลัมน์ที่อยู่ติดกัน และอยู่แถว เดียวกันคูณกันทุกๆแถว ของ 2 คอลัมน์ดังกล่าวแล้วนำผลลัพธ์ดังกล่าวรวมกันจะต้องได้เท่ากับ 0 เสมอ นั่นหมายความว่าเมื่อเราทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแล้วจะไม่ปรากฏเหตุการณ์ที่ปัจจัยหนึ่งแปรเปลี่ยนตามอีกปัจจัยหนึ่ง (Dependency test) ถ้าสมมติว่า ไม่เป็นออโทโกนอลแล้วเป็นไปได้อาจจะต้องเปลี่ยนค่าของปัจจัยมากกว่า 1 ตัวเป็นสูงหรือต่ำ พร้อมกันอาจจะส่งผลให้เราตีความผิดพลาดแยกแยะไม่ออกกว่าค่าตอบสนองแปรค่าตามปัจจัยใด การออกแบบที่ดีจะต้องได้

ตารางเป็นอโทโกนอนลผู้ออกแบบจะต้องทำการทดสอบทุกครั้งเช่นเดียวกับความสมดุลในแนวตั้ง (Vertical Balance)และทำให้ครบทุกคอลัมน์แต่ครั้งละ 1 คู่เท่านั้น

### 2.3.6 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) [5]

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบ ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Y) เพื่อทำให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด ( $\epsilon^2$ ) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเราเรียก  $\epsilon^2$  เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด โดยการพีดผลตอบ
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบ

แบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางมีการทำการทดลองไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ (ปารเมศ ชูติมา, 2545) ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยจึงมีทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

1. Linear Model
2. Two - factor interaction Model
3. Quadratic Model

## 2.4 แนวคิดทฤษฎีแผนการชักสุ่มตัวอย่าง [7]

ทฤษฎีการสำรวจตัวอย่างเป็นวิธีการเกี่ยวกับการอนุมานซึ่งจะใช้ข้อมูลจากตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากร เพื่อสรุปคุณลักษณะของประชากรที่ได้จากข้อมูลของทุกหน่วยของประชากรเรียกว่า พารามิเตอร์ (Parameter) โดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะของประชากรที่นิยมศึกษากันได้แก่ ค่าเฉลี่ยประชากร (Population Mean) ยอดรวมประชากร (Population Total) สัดส่วนของประชากร (Population Proportion) อัตราส่วนของประชากร (Population Ratio) และความแปรปรวนประชากร (Population Variance) เป็นต้น โดยที่วิธีการประมาณค่าจะขึ้นอยู่กับแผนแบบการชักสุ่มตัวอย่าง (Sampling Design) ซึ่งการได้ข้อมูลของแต่ละหน่วยตัวอย่างนั้นจะต้องเป็นอิสระแก่กัน และมีรูปแบบการแจกแจงแบบเดียวกัน อีกทั้งโอกาสของการตกเป็นหน่วยตัวอย่างมีความน่าจะเป็น

เท่า ๆ กัน ทฤษฎีการอนุมานเชิงสถิติ โดยส่วนใหญ่แล้วประกอบด้วย การประมาณค่า(Estimation) การทดสอบสมมติฐาน (Testing of Hypothesis) รวมถึงการพยากรณ์ (Forecasting or Prediction) และการสร้างตัวแบบ (Model Building) โดยการชักสุ่มตัวอย่างแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

**2.4.1 การชักสุ่มตัวอย่างโดยใช้ความน่าจะเป็น (Probability Sampling)** เป็นวิธีการสุ่มตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่างแต่ละหน่วยของประชากรมีโอกาสถูกเลือกเข้าไปรวมอยู่ในตัวอย่าง และมีความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ และทราบค่าของความน่าจะเป็นนี้ด้วย และวิธีการสุ่มได้ตัวอย่างเป็นไปตามความน่าจะเป็นที่กำหนด เช่น

1. การชักสุ่มตัวอย่างแบบสุ่มเชิงเดียว (Simple Random Sampling) หน่วยตัวอย่างทุกหน่วยมีโอกาสถูกเลือกมาเป็นตัวอย่างเท่า ๆ กัน วิธีการเลือกหน่วยตัวอย่าง โดยส่วนมากใช้การจับสลาก หรือใช้เลขสุ่ม (Random Number) ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้ตารางเลขสุ่ม ซึ่งมีวิธีการดังนี้ทำการกำหนดหมายเลขให้กับแต่ละหน่วยของประชากร หมายเลข 1 จนถึงหมายเลข N โดยหมายเลขที่ใช้ในการเปิดตารางจะพิจารณาจากจำนวนหลักของ N เช่น ถ้าประชากรที่ศึกษามีจำนวนเท่ากับ 250 ในการเปิดตารางจะพิจารณาจากเลข 3 หลัก นั่นคือ 001 หมายถึง หมายเลข 1, 023 หมายถึง หมายเลข 23 เป็นต้น จากนั้นกำหนดค่าเริ่มต้นที่พิจารณา โดยกำหนดให้มีความยาวเท่ากับจำนวนหลักที่กำหนดให้กับแต่ละหน่วยในประชากร และการอ่านค่าว่าจะอ่านตามแถว (Row) จากซ้ายไปขวา หรือพิจารณาตามแนวสดมภ์ (Column) จากบนลงล่าง จนกระทั่ง ได้หน่วยตัวอย่างครบตามจำนวนที่ต้องการ ซึ่งหมายเลขที่ได้นี้อาจจะมีเลขซ้ำกันหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการชักตัวอย่างแบบคืนที่ (Sampling with Replacement) หรือการชักตัวอย่างแบบไม่คืนที่ (Sampling without Replacement) ส่วนกรณีที่ได้หมายเลขนอกเหนือจากที่กำหนดก็จะไม่นำมาพิจารณา

2. การชักสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบ (Systematic Sampling) เป็นวิธีการสุ่ม โดยทุก ๆ k หน่วยตัวอย่างของประชากรจะมีตัวอย่างสุ่มได้ 1 ตัวอย่าง เป็นวิธีการสุ่มที่ทำได้ง่าย และสะดวก โดยเฉพาะกรณีที่ไม่มีการรอบตัวอย่าง เช่น ต้องการประมาณค่าใช้จ่ายของนักท่องเที่ยวในการซื้อสินค้าของร้านค้าแห่งหนึ่ง ไม่ทราบจำนวนนักท่องเที่ยวที่มาซื้อสินค้าทั้งหมด จึงกำหนดวิธีการสุ่ม โดยกำหนดว่าจะสำรวจค่าใช้จ่ายในการซื้อสินค้าของนักท่องเที่ยวทุก ๆ 10 คน จนกระทั่ง ได้ นักท่องเที่ยวครบ 50 คน

ถ้าต้องการสุ่มตัวอย่างขนาด n จากประชากร N จะทำโดยให้หมายเลขแก่ประชากรจากนั้นทำการหาช่วง (Interval : I) โดย  $I = \frac{N}{n} \approx k$  แล้วทำการสุ่มหมายเลข 1 ถึง k มาหนึ่งหมายเลขอย่างง่ายด้วยความน่าจะเป็นที่เท่า ๆ กัน มีรูปแบบการชักตัวอย่าง 2 แบบ คือ การชักตัวอย่างแบบมีระบบเชิงเส้น (Linear Systematic Sampling) ในกรณีที่ I เป็นจำนวนเต็ม และการชักตัวอย่างแบบมีระบบวงกลม (Circular Systematic Sampling) ในกรณีที่ I ไม่เป็นจำนวนเต็ม

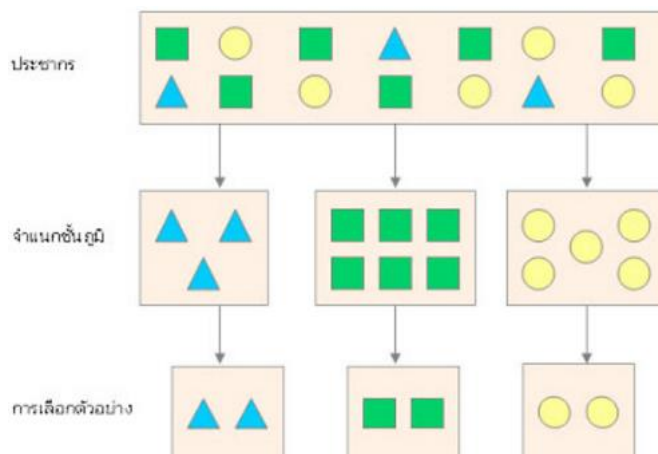
การชักตัวอย่างแบบมีระบบจะประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับประชากร 3 ลักษณะ คือ

2.1 หน่วยตัวอย่างในประชากรมีลักษณะสุ่ม (Random) ตัวอย่างที่ได้จากการชักตัวอย่างแบบมีระบบ จะมีลักษณะคล้ายกับการชักตัวอย่างแบบสุ่มเชิงเดียว

2.2 การชักสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบจะเหมาะสมในกรณีที่หน่วยตัวอย่างในประชากรมีลักษณะเรียงอันดับ (Order) คือ หน่วยต่าง ๆ ของประชากรมีการเรียงลำดับตามตัวแปรที่คาดว่าจะส่งผลกับเรื่องที่ศึกษา เช่น การประมาณคะแนนเฉลี่ยของนักเรียน การประมาณจำนวนชั่วโมงเฉลี่ยการอ่านหนังสือของนักเรียน

2.3 หน่วยตัวอย่างในประชากรมีลักษณะเป็นคาบ (Periodic) คือ ประชากรประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นคาบหรือระบบ เช่น ค่าของข้อมูลมีลักษณะเป็น 100, 200, 300 เมื่อได้ค่า  $k$  เท่ากับจำนวนคาบของข้อมูล ก็จะทำให้ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนได้ อาจจะมีค่ามากขึ้นไป หรือน้อยเกินความเป็นจริง โดยจะขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นที่สุ่มได้ ดังนั้นการชักตัวอย่างแบบมีระบบกรณีนี้จะไม่เหมาะสม

3. การชักสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งเป็นชั้น (Stratified Sampling) กรณีที่หน่วยต่าง ๆ ของประชากรมีลักษณะที่แตกต่างกันที่สามารถจัดเป็นหมวดหมู่ได้ ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ทำการแบ่งหน่วยต่าง ๆ ของประชากรออกเป็นชั้น ๆ เรียกว่า ชั้นภูมิ (Stratum) โดยที่หน่วยตัวอย่างในชั้นภูมิเดียวกันมีลักษณะเอกพันธ์ (Homogeneous) หรือมีลักษณะคล้ายคลึงกันมากที่สุด และระหว่างชั้นภูมิมีลักษณะวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) หรือมีลักษณะแตกต่างกันมากที่สุดภายใต้คุณลักษณะที่ศึกษา แล้วจึงชักตัวอย่างจากแต่ละชั้นภูมิ โดยชักตัวอย่างแบบสุ่มเชิงเดียวหรือแบบมีระบบ โดยส่วนมากจะกำหนดขนาดตัวอย่างแต่ละชั้น ภูมิโดยใช้ความน่าจะเป็นในการชักตัวอย่างเป็นส่วนกับขนาดของชั้นภูมิ (Probability Proportional to Size Sampling) ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.7 การชักกลุ่มตัวอย่างแบบแบ่งเป็นชั้น (Stratified Sampling)

ที่มา : ณัฐพล บัวอุไร. เทคนิคการชักกลุ่มตัวอย่าง. เข้าถึงเมื่อ 24 ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.nattapon.com/2011/05/random-sampling/>

4. การชักกลุ่มตัวอย่างแบบเกาะกลุ่ม (Cluster Sampling) ในกรณีที่มีลักษณะที่สนใจของประชากรมีหลายลักษณะ และประชากรมีขนาดใหญ่ การกำหนดกรอบตัวอย่างอาจทำได้ไม่ครบถ้วน ดังนั้น กรณีเช่นนี้จะใช้วิธีแบ่งประชากรออกเป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า คลัสเตอร์ (Cluster) โดยที่ประชากรที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันมีลักษณะที่แตกต่างกันอยู่ปะปนกัน และประชากรที่อยู่ระหว่างกลุ่มมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แล้วทำการสุ่มคลัสเตอร์ มาเป็นตัวแทนของประชากร โดยการชักตัวอย่างอย่างง่าย หรือแบบมีระบบก็ได้ แล้วทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่าง จากทุกหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในคลัสเตอร์ที่ตกเป็นตัวอย่างทั้งหมด วิธีการนี้เป็นการชักตัวอย่างแบบแบ่งกลุ่มขั้นตอนเดียว วิธีการชักตัวอย่างแบบแบ่งกลุ่มสองขั้นตอน คือ หลังจากแบ่งประชากรออกเป็นกลุ่มๆ(คลัสเตอร์) แล้ว ขั้นที่ 1 ทำการสุ่มคลัสเตอร์มา ขั้นที่ 2 สุ่มตัวอย่างจากคลัสเตอร์ที่สุ่มมาจากขั้นตอนที่ 1 ซึ่งตัวอย่างจากขั้นที่ 2 นี้ เป็นตัวอย่างขั้นสุดท้าย

**2.4.2 การชักกลุ่มตัวอย่างโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็น (Non-Probability Sampling)** เป็นการชักตัวอย่างโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็น (เป็นการชักตัวอย่างโดยไม่สุ่ม) และไม่ทราบค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือก การเลือกโดยวิธีนี้จะทำให้มีความเอนเอียง (Biased) และไม่สามารถวัดความเชื่อถือได้ (Reliability) อีกทั้ง ทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น

1. การชักกลุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ (Accidental Sampling) หมายถึง เป็นวิธีการชักตัวอย่างโดยไม่มีกฎเกณฑ์ โดยจะเก็บข้อมูลจากหน่วยตัวอย่างใดก็ได้ที่เก็บได้ง่าย จนกว่าจะครบกำหนด

ตามที่ต้องการ ซึ่งถือความสะดวกสบายของผู้วิจัยเป็นหลัก บางครั้งเรียกว่า การชักตัวอย่างแบบสะดวก (Convenience Sampling) เช่น เลือกเก็บข้อมูลของครวเรือนที่อยู่ใกล้ถนนหรือทางเดิน

2. การชักสุ่มตัวอย่างแบบโควตา (Quota Sampling) เป็นการชักตัวอย่างโดยจำแนกประชากรออกเป็นกลุ่ม ๆ ที่มีลักษณะที่สนใจที่เหมือนกัน แล้วชักตัวอย่างจากแต่ละกลุ่มตามขนาดตัวอย่างที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (ตามจำนวนสัดส่วนของประชากร หรือเรียกว่าระบบโควตา) เพื่อให้กลุ่มตัวอย่างที่ได้กระจายอยู่ในแต่ละกลุ่ม

3. การชักสุ่มตัวอย่างโดยวิธีใช้การตัดสินใจของผู้ทำ (Judgment Sampling) หรือ การชักตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เป็นการชักตัวอย่างที่ต้องการรายละเอียดมากที่สุดผู้วิจัยเป็นคนตัดสินใจเลือกหน่วยตัวอย่างเอง ซึ่งวิธีนี้จะใช้ประสบการณ์ และความชำนาญของผู้วิจัย เช่น การสัมภาษณ์เชิงลึก การศึกษาในเรื่องที่มีลักษณะเฉพาะกลุ่ม เช่น เลือกคนหรือลูกค้าที่คิดว่ามีลักษณะเดียวกับคนหรือลูกค้าส่วนใหญ่ การวิเคราะห์สภาพเศรษฐกิจ เป็นต้น

4. การชักสุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะหน่วยที่เลือกได้สะดวก (Accessible Sampling) เป็นการชักตัวอย่างโดยยึดหลักความง่าย ความสะดวกในการเลือก เช่น การเลือกผลไม้จากภาชนะที่บรรจุ การเก็บข้อมูลของผลไม้จากสวน เป็นต้น

5. การชักสุ่มตัวอย่างแบบลูกโซ่ เป็นการชักตัวอย่างที่ผู้วิจัยทำการชักตัวอย่างที่มีลักษณะที่สนใจมาจำนวนหนึ่งแล้วเก็บรวบรวมข้อมูล จากนั้นทำการชักกลุ่มตัวอย่างนี้ แนะนำตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์กันบางลักษณะต่อไปอีกจำนวนหนึ่ง ผู้วิจัยก็ทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่ถูกแนะนำ ทำต่อไปจนได้ตัวอย่างครบตามที่ต้องการ การชักตัวอย่างแบบลูกโซ่ จะมีการเพิ่มขนาดตัวอย่างทุกครั้งซึ่งเหมือนกับการกลิ้งหิมะไปรอบ ๆ จนลูกหิมะมีขนาดใหญ่ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการชักตัวอย่างแบบก้อนหิมะ (Snowball Sampling)

6. การชักสุ่มตัวอย่างจากประชากรที่มีการเคลื่อนไหว (Sampling of Mobile Population) เป็นการชักตัวอย่างจากประชากรที่มีการเคลื่อนไหว และเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเพื่อประมาณจำนวนประชากร เช่น ปลาบึกในแม่น้ำ สัตว์ป่า วิธีการคือ ทำการชักตัวอย่างมาจำนวนหนึ่ง แล้วทำสัญลักษณ์ หรือเครื่องหมายแล้วปล่อยตัวอย่างคืนไปในประชากร หลังจากหน่วยตัวอย่างต่าง ๆ ที่ปล่อยไปปะปนกันดีแล้วระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการชักตัวอย่างมาจำนวนหนึ่ง และสังเกตดูว่ามีหน่วยตัวอย่างใดบ้างที่มีสัญลักษณ์ที่กำหนด วิธีการนี้เรียกอีกอย่างว่า การชักตัวอย่างแบบจับและจับซ้ำ (Capture-Recapture Sampling) ตัวอย่างเช่น ต้องการประมาณจำนวนปลาทั้งหมดในบ่อ ดังนั้น จะได้ค่าประมาณปลาในบ่อดังนี้

$$N = \frac{nr}{k} \quad (2-10)$$

$N$  = ค่าประมาณจำนวนปลาในบ่อ

$n$  = จำนวนปลาที่จับได้ในครั้งที่ 1

$r$  = จำนวนปลาที่จับได้ในครั้งที่ 2

$k$  = จำนวนปลาที่มีสัญลักษณ์ในการจับครั้งที่ 2

## 2.5 การวิเคราะห์ระบบการวัด [8]

การวัดตามมาตรฐาน ISO 10012-1 ได้นิยามความหมายของการวัดว่าหมายถึงชุดของปฏิบัติการที่มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาค่าของปริมาณอันหนึ่ง และจะเรียกปริมาณใดๆที่ได้รับการนำมาวัดนี้ว่าสิ่งที่รับการวัด

จากนิยามพบว่ามีค่าสำคัญในการวัดคือค่าคงที่ของสิ่งที่ได้รับการวัด ซึ่งถือว่าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าและมีจุดประสงค์ที่จะกำหนดค่าให้ ในทางทฤษฎีจะเรียกค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่านี้ว่า “ค่าจริง (True Value)” โดยนักมาตรวิทยาอาจเรียกค่าดังกล่าวว่า ค่ามาสเตอร์ (Master Value) นอกจากนี้ยังมีค่าสำคัญอีกค่าหนึ่ง คือ ชุดปฏิบัติการในการมอบหมายค่าตัวเลข หมายถึงกระบวนการวัด หรือระบบการวัด โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ เครื่องมือวัด พนักงานวัด วิธีการวัด สิ่งที่ได้รับการวัด และสิ่งแวดล้อมในการวัด เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้จะมีความไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้เกิดความผันแปรในระบบการวัด

### 2.5.1 ความคลาดเคลื่อนของการวัด

จากสาเหตุด้านความผันแปรของระบบการวัด ทำให้ค่าที่วัดได้เบี่ยงเบนจากค่าจริงเสมอ

$$X_i = \mu + \varepsilon_i \quad (2-11)$$

โดยที่  $X_i$  หมายถึง ค่าที่วัดได้

$\mu$  หมายถึง ค่าจริงของสิ่งที่ได้รับการวัด

$\varepsilon_i$  หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด

ความคลาดเคลื่อนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1. ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องมือวัด โดยอาจจะมาจากการเลือกใช้เครื่องมือวัดผิดพลาด หรือมาจากการอ่านที่ผิดพลาด โดยความคลาดเคลื่อนลักษณะเช่นนี้ไม่สามารถคาดการณ์ได้ แต่สามารถกำจัดได้ โดยการฝึกอบรมพนักงาน กำหนดขั้นตอนการวัดที่แน่นอน และการบำรุงรักษาเครื่องมือวัดอย่างถูกต้อง

2. ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ คือ ค่าวัดที่ได้มาจากการเฉลี่ยออกความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มซึ่งเบี่ยงเบนไปจากค่าจริง หรือค่าไปอัส โดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนมักมาจากโครงสร้างของเครื่องมือวัดเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังอาจเกิดมาจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการวัด เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ} = X_i - \text{ค่าจริง} \quad (2-12)$$

3. ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม หมายถึง ความเบี่ยงเบนของค่าวัดจากค่าที่ควรจะเป็นของค่าวัด เป็นลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม (ค่าที่เกิดโดยธรรมชาติ) และไม่สามารถกำจัดทิ้งได้แต่สามารถปรับค่าให้ลดลงได้ด้วยการปรับวิธีการวัดใหม่ ใช้อุปกรณ์พวกจิกและฟิกเจอร์ในการจับงานที่จะวัด

### 2.5.2 ค่าความผันแปรจาก ระบบการวัด

ความผันแปร โดยรวม = ความผันแปรของกระบวนการ + ความผันแปรจากการวัด



ถูกต้องและแม่นยำ    ไม่ถูกต้องแต่แม่นยำ    ถูกต้องแต่ไม่แม่นยำ    ไม่ถูกต้องและไม่แม่นยำ

ภาพที่ 2.8 ภาพความถูกต้องและความแม่นยำในการวัด

ที่มา : บริษัทพีเคอาร์บิสซิเนสจำกัด. การวิเคราะห์ระบบการวัด(Measurement System Analysis : MSA). เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก <http://topofquality.com/smsa1/indexmsa1.html>

ตัวระบบการวัดมีส่วนสำคัญต่อค่าที่วัดได้ซึ่งใช้วัดความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่สังเกตโดยมีการเลื่อนของค่ากลาง

$$\mu (\text{สังเกต}) = \mu (\text{จริง}) + \mu (\text{ระบบวัด}) \quad (2-13)$$

และการเพิ่มของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\sigma^2 (\text{สังเกต}) = \sigma^2 (\text{จริง}) + \sigma^2 (\text{ระบบวัด}) \quad (2-14)$$

การศึกษาระบบวัดจะแสดงความสัมพันธ์ของความผันแปรของความคลาดเคลื่อนจากการวัดเทียบกับของจากข้อมูลทั้งหมดและถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดตั้งแต่ 2 เครื่องหรือพนักงานตั้งแต่ 2 คนขึ้นไป



### 2.5.3 การวิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับข้อมูลเชิงแปรผัน (Variable Data)

1. การวิเคราะห์ความถูกต้องของระบบการวัด (Accuracy) ประเมินผ่านการวิเคราะห์ค่าไบอัส ซึ่งเป็นการประเมินค่าความโน้มเอียง โดยพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของค่าวัดเทียบกับค่าอ้างอิง

$$\text{ค่าความโน้มเอียง (Bias)} = \text{ค่าที่วัดได้} - \text{ค่าอ้างอิง} \quad (2-15)$$

ขั้นตอนการประเมินค่า ความโน้มเอียง (Bias)

1. เลือกชิ้นงานมาตรฐาน (Master) มา 1 ชิ้น ที่ทราบค่าอ้างอิงที่สามารถสอบกลับไปยังมาตรฐานที่สูงกว่าได้
2. ให้พนักงานที่มีความสามารถในการใช้เครื่องมือวัด มาทำการวัดชิ้นงานมาตรฐานอย่างน้อย 10 ครั้ง ภายใต้สภาวะที่ต้องการประเมิน
3. คำนวณค่าเฉลี่ยของการวัด (Observed Value)
4. ประเมินค่าความโน้มเอียง (Bias)
5. คำนวณ เปอร์เซ็นต์ค่าความโน้มเอียง (% Bias) จากสูตร เปอร์เซ็นต์ค่าความโน้มเอียง ต่อ พิกัดความเผื่อ (Tolerance) x 100
6. วิเคราะห์ผลการประเมินค่า เปอร์เซ็นต์ค่าความโน้มเอียง

#### เกณฑ์การยอมรับ

เปอร์เซ็นต์ค่าความโน้มเอียง < 5% คือ ดี

5% < เปอร์เซ็นต์ค่าความโน้มเอียง < 10% คือ ยอมรับได้

เปอร์เซ็นต์ค่าความโน้มเอียง > 10% คือ ไม่ยอมรับ (ควรทำการตรวจสอบเครื่องมือและปรับเทียบใหม่)

2. การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด (Precision) หรือความผันแปรของการวัดซ้ำที่เกิดจากเครื่องมือวัด (Repeatability) คือ ความผันแปรของระบบการวัด เมื่อทำการวัดคุณลักษณะหนึ่งหลายๆ ครั้งบนชิ้นงานเดียวกัน โดยมีเครื่องมือวัดเดียวกันและคนวัดเดียวกันซึ่งความผันแปรนี้จะมาจากภายในระบบ เช่น มาจากภายในเครื่องมือวัด คนวัด สิ่งแวดล้อม หรือวิธีการวัด เป็นต้น

3. ความผันแปรของการวัดซ้ำที่เกิดจากคนวัด (Reproducibility) คือ ความผันแปรของระบบการวัดเมื่อทำการวัดคุณลักษณะหนึ่งบนชิ้นงานเดียวกันแต่ต่างคนวัด

4. การศึกษารีพิทเทบิลิตีและรีโพรดิวซิเบิลิตีของระบบการวัด (Gage Repeatability and Reproducibility, GR&R) หมายถึง การประเมินค่าความผันแปรจากการวัดซ้ำ ภายใต้เงื่อนไข

เดียวกัน แล้วมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขไป โดยทั่วไปเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงไปหมายถึง ความแตกต่างของพนักงานวัดขั้นตอนการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด โดยวิธี ANOVA

1. สุ่มพนักงานวัดมาประมาณ 2 ~ 4 คน
2. สุ่มชิ้นงาน 10 ชิ้น โดยเลือกให้ครอบคลุมช่วงการใช้งาน
3. ตรวจสอบเครื่องมือวัดและจะต้องผ่านการสอบเทียบก่อนการประเมิน GR&R
4. ทำการทดสอบหรือวัดชิ้นงาน โดยกำหนดแบบสุ่ม แล้วบันทึกผลในตารางการทดลอง
5. ทำการวิเคราะห์หาค่าความผันแปรของการวัดซ้ำที่เกิดจากเครื่องมือวัดและเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของระบบการวัด (%R&R)

#### เกณฑ์การยอมรับ

%R&R < 10% คือ ดี

10% < % R&R < 30% คือ ยอมรับได้

%R&R > 30% คือ ไม่ยอมรับ (หาสาเหตุของความผันแปรที่เกิดขึ้นและดำเนินการแก้ไข)

วิธีการประเมินผลรีพีทอะบิลิตีและรีโพรดูซิบิลิตี มีทั้งหมด 3 วิธี

4.1.1 วิธีอาศัยค่าพิสัย (Range Method) เหมาะสมกับกรณีการทดลองในช่วงสั้นๆ และไม่มี การวัดซ้ำ ดังนั้น ข้อจำกัด คือ ไม่สามารถแยกรีพีทอะบิลิตีออกจากรีโพรดูซิบิลิตีได้

4.1.2 วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and Range Method) เหมาะกับการทดลองซ้ำในแต่ละตัวอย่างของพนักงานวัดแต่ละคน วิธีการนี้สามารถแยกรีพีทอะบิลิตีออกจากรีโพรดูซิบิลิตีได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่ารีพีทอะบิลิตีได้

4.1.3 วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาว่าพนักงานและชิ้นงานเป็นสาเหตุความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่และวิธีการนี้จะสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากรีพีทอะบิลิตีได้

การใช้ ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดนั้น จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองแบบบล็อก (Randomized Block Design – RBD) โดยมีพนักงาน คือ ปัจจัยที่ทำการศึกษาและชิ้นงานคือบล็อก ซึ่งมีความจำเป็นต้องพยายามให้ความผันแปรภายในบล็อก มีความใกล้เคียงกันในขณะที่ความผันแปรระหว่างบล็อกมีค่าสูง

### การวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธี Nested ANOVA

ใช้ในกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการให้พนักงานทำการวัดซ้ำบนชิ้นงานเดียวกันได้ด้วยสาเหตุต่างๆ เช่น การตรวจสอบแบบทำลาย ในกรณีนี้จะต้องดำเนินการวิเคราะห์โดยอาศัยการวิเคราะห์แบบซ้อน (Nested) ในการทดสอบนี้ จะกำหนดสมการเชิงเส้นตรงของค่าวัดได้ ดังสมการด้านล่าง

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{(ij)k} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-16)$$

การทดสอบสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังสมการด้านล่าง

$$SS_T = \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^n y_{ijk}^2 - \frac{Y^2 \dots}{abn} \quad d.f. = abn - 1 \quad (2-17)$$

$$SS_O = \sum_{i=1}^a \frac{Y^2_{i..}}{bn} - \frac{Y^2 \dots}{abn} \quad d.f. = a - 1 \quad (2-18)$$

$$SS_{P(O)} = \sum_{i=1}^a \left( \sum_{j=1}^b \frac{Y^2_{ij.}}{n} - \frac{Y^2_{i..}}{bn} \right) \quad d.f. = a(b - 1) \quad (2-19)$$

$$SS_E = SS_T - SS_O - SS_{P(O)} \quad d.f. = ab(n - 1) \quad (2-20)$$

การวิเคราะห์ ANOVA สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธี Nested ANOVA

| Source                  | SS  | DF          | MS                                       |
|-------------------------|---|-------------|--|
| พนักงานวัด              | $SS_O = \sum_{i=1}^a \frac{Y^2_{i..}}{bn} - \frac{Y^2 \dots}{abn}$                                | $a - 1$     | $MS_O = \frac{SS_O}{(a - 1)}$            |
| ชิ้นงานภายใต้พนักงานวัด | $SS_{P(O)} = \sum_{i=1}^a \left( \sum_{j=1}^b \frac{Y^2_{ij.}}{n} - \frac{Y^2_{i..}}{bn} \right)$ | $a(b - 1)$  | $MS_{P(O)} = \frac{SS_{P(O)}}{a(b - 1)}$ |
| รีพีทอะบิลิตี           | $SS_E = SS_T - SS_O - SS_{P(O)}$  | $ab(n - 1)$ | $MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$          |
| ผลรวม                   | $SS_T = \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^n y_{ijk}^2 - \frac{Y^2 \dots}{abn}$                             | $abn - 1$   |  |

จากกฎความค่าคาดหวังของค่ามัธยฐานกำลังสองจะได้ค่าคาดหวังตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความคาดหมายของค่ามัธยฐานกำลังสอง

| ตัวแบบสุ่ม   | ตัวแบบผสม (พนักงานคงที่ ชี้นงานสุ่ม)                                   |
|--|--|
| $E(MS_O) = \sigma^2 + n\sigma^2\beta + bn\sigma^2\tau$ | $E(MS_O) = \sigma^2 + n\sigma^2\beta + \frac{bn \sum_i \tau_i^2}{a-1}$ |
| $E(MS_O) = \sigma^2 + n\sigma^2\beta$                  | $E(MS_O) = \sigma^2 + n\sigma^2\beta$                                  |
| $E(MS_O) = \sigma^2$                                   | $E(MS_O) = \sigma^2$   |

จากค่าคาดหมายของค่ามัธยฐานกำลังสองตามตารางที่ 2.7 สามารถประมาณองค์ประกอบความแปรปรวนได้คือ

$$\text{เครื่องมือวัด (รีพีทะบิลิตี้)} \quad \hat{\sigma}^2 = MS_E \quad (2-21)$$

$$\text{พนักงานวัด} \quad \hat{\sigma}^2_r = \frac{MS_O - MS_{P(O)}}{bn} \quad (2-22)$$

$$\text{ชี้นงานภายใต้พนักงานวัด} \quad \hat{\sigma}^2_\beta = \frac{MS_{P(O)} - MS_E}{n} \quad (2-23)$$

## 2.6 ศึกษาและสรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**พงศกร เสือประเสริฐ [5]** ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดแผ่นเพลทสแตนเลสของชี้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีผลต่อค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง (Liquid Particle Counting; LPC) โดยศึกษาปัจจัยด้านความถี่คลื่นอัลตราโซนิก กำลังวัตต์ เวลาในการทำความสะอาด อุณหภูมิของตัวกลาง และความเข้มข้นสารชะล้าง ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบสองระดับจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสะอาดของชี้นงาน คือ กำลังวัตต์คลื่นอัลตราโซนิก ความถี่คลื่นอัลตราโซนิก และเวลาในการทำความสะอาด จากการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังวัตต์คลื่นอัลตราโซนิก 1,000 วัตต์ ความถี่คลื่นอัลตราโซนิก 40 กิโลเฮิร์ตซ์ และเวลาในการทำความสะอาด 240 วินาที โดยให้ค่า LPC เท่ากับ 2,401 อนุภาคต่อตารางเซนติเมตร

**นฤมล รอดกำหนด [8]** ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแปรผันในการทดสอบการวัดปริมาณสิ่งปนเปื้อนในชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทำการกำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ กำลังวัตต์ของเครื่องอัลตราโซนิก ปริมาณฟองอากาศในน้ำที่ใช้สำหรับสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชี้นงาน อุณหภูมิของน้ำที่ใช้สำหรับสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชี้นงาน เวลาที่ใช้สกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชี้นงาน ระยะการจุ่มชี้นงานในเครื่องอัลตราโซนิก โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียลเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษากับค่าตอบสนอง(%RSD)

พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแปรผัน(%RSD)ในการทดสอบการวัดปริมาณสิ่งปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ปริมาณฟองอากาศในน้ำที่ใช้สำหรับสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงาน และเวลาที่ใช้สกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงาน โดยปริมาณฟองอากาศในน้ำที่ 70% และเวลาที่ใช้สกัดสิ่งปนเปื้อนที่ 2 นาทีส่งผลให้ %RSD ลดลง

**นันทชญาณ์ จารัตน์ [9]** ทำการศึกษาเพื่อลดปริมาณอนุภาคเป็อร์โซอิลเล็กทริกทรานซ์ดีวเซอร์ (PZT) ที่หลุดออกจากแขนจับหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้วิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา โดยดำเนินงานทั้ง 5 ขั้นตอน เริ่มจากการนิยามปัญหา หาสาเหตุของปัญหา วิเคราะห์สาเหตุปัญหา ปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และระยะสุดท้ายในกาควบคุมติดตามผล โดยหลังจากปรับตั้งค่าสภาวะของเครื่องล้างอัลตราโซนิกที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสมดังนี้ กำลังของเครื่องอัลตราโซนิกที่ 60% , เวลาการทำงานของเครื่องล้างอัลตราโซนิกที่ 60 วินาที และอุณหภูมิการล้างที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณอนุภาคเป็อร์โซอิลเล็กทริกทรานซ์ดีวเซอร์ ที่หลุดออกมาจากแขนจับหัวอ่านลดลง 35.7% ซึ่งสามารถลดมูลค่าความสูญเสียลง 48.99%

**พงส์ศักดิ์ โหลิมขยโชติกุล [10]** ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำความสะอาดแขนจับยึดหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยทำการศึกษปัจจัยต่างได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความถี่ และพลังงานในการล้างชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษากับค่าตอบสนอง จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์ อินเทลลิเจนซ์ และใช้เทคนิคการค้นหาแบบกริฟเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทำความสะอาด ซึ่งได้ค่าที่เหมาะสมดังนี้ อุณหภูมิที่ 36.9 องศาเซลเซียส เวลาที่ 379 วินาที ความถี่ที่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ และพลังงานที่ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้พบว่าสามารถลดจำนวนอนุภาคที่ปนเปื้อนตกค้างขนาด 0.3 ไมโครเมตร ลดลงจาก 131,171 เป็น 59,108 อนุภาคต่อตารางเซนติเมตร และขนาด 0.6 ไมโครเมตร ลดลงจาก 16,818 เป็น 11,025 อนุภาคต่อตารางเซนติเมตร

**วิภาสพล อ่อนสอาด [11]** ทำการศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในผลิตภัณฑ์ฐานรองรับชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งทำการศึกษปัจจัยต่างๆได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา ความถี่ ระดับพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก และความเข้มข้นของสารชะล้าง โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการล้างทำความสะอาดชิ้นงานคือที่ระยะเวลาล้าง 120 วินาที อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ระดับพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก 80% และความเข้มข้นของสารชะล้าง 0.5% โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าความสะอาดที่ขนาดไม่เกิน 0.3 ไมครอนอยู่ที่ 5,945 อนุภาคต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถลดค่าความสะอาดลงได้ถึง 70%

**R. Vertimurugan [12]** ทำการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการล้างชิ้นงานฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้ความถี่ในช่วง 40 – 132 kHz ค่าพลังงานอยู่ที่ 100 – 500 Watt สารชะล้างมี 3 ชนิดแบ่งแยกตามจุดเดือด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความถี่ 40 kHz และระยะเวลาการล้าง 5 นาทีจะให้ค่าความสะอาดที่ดีที่สุดและไม่ทำลายพื้นผิวชิ้นงานและยังพบว่าค่าความถี่แบบหลายย่านที่ทำการให้ในระยะเวลาที่สั้นให้ค่าความสะอาดที่ดีกว่าการใช้ย่านความถี่เพียงค่าเดียว และระดับความเสียหายของพื้นผิวชิ้นงานจะแปรผันตามค่าพลังงานที่ใช้ และในส่วนของสารชะล้างพบว่า สารชะล้างที่จุดเดือดอยู่ระดับปานกลางส่งผลต่อการเสียหายของพื้นผิวชิ้นงานต่ำกว่าระดับต่ำและระดับสูง

**R. Vertrimurugan [13]** ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กออกจากพื้นผิวชิ้นงานที่เป็นโลหะ โดยศึกษาที่ค่าความถี่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์, 40 กิโลเฮิร์ตซ์, 58 กิโลเฮิร์ตซ์, 58/172 กิโลเฮิร์ตซ์, 132 กิโลเฮิร์ตซ์, 360 กิโลเฮิร์ตซ์, 470 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียส แล้วทำการวัดผลด้วยค่าปนเปื้อนตกค้างผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว จากผลการศึกษาพบว่ากำจัดอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ระดับ 50 – 60 องศาเซลเซียสและจะเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส และค่าอัตราการกัดกร่อนจะต่ำเมื่ออุณหภูมิสูง แต่ค่าอัตราการกัดกร่อนจะมีระดับสูงที่ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์

**Joost Rooze and Team [16]** ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของการเกิดกระบวนการควิวเทชั่นของฟองอากาศในของเหลวที่มีชนิดและปริมาณของแก๊สที่ละลายอยู่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อชนิดของแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวต่างกันจะส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของของเหลวแตกต่างกันทางด้าน อัตราส่วนฟองอากาศ การนำความร้อนและแรงตึงผิวของของเหลว และยังส่งผลให้เกิดจุดความร้อนภายในของเหลวขึ้น ทั้งนี้แก๊สยังสามารถมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดควิวเทชั่นได้ และยังพบว่าเมื่อปริมาณของแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงตึงผิวของของเหลวลดลงทำให้เกิดฟองอากาศได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากแรงตึงผิวของของเหลวลดลงมากเกินไปจะส่งผลให้ความหนาแน่นของการเกิดกระบวนการควิวเทชั่นลดลง

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 สามารถนำมาใช้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาแผนการชักลุ่มตัวอย่างที่ส่งผลให้ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) มีค่าต่ำลงและเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบค่า LPC ที่ทำให้ค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC มีค่าต่ำที่สุด สำหรับในบทที่ 3 นี้ ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการศึกษาระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา การวิเคราะห์ค่า LPC และการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การศึกษาและสำรวจสภาพปัญหา

บริษัทกรณีศึกษาได้ดำเนินกิจการการผลิตและจำหน่ายแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Suspension in Hard disk drive) ซึ่งเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของอุตสาหกรรมการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ สำหรับกระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

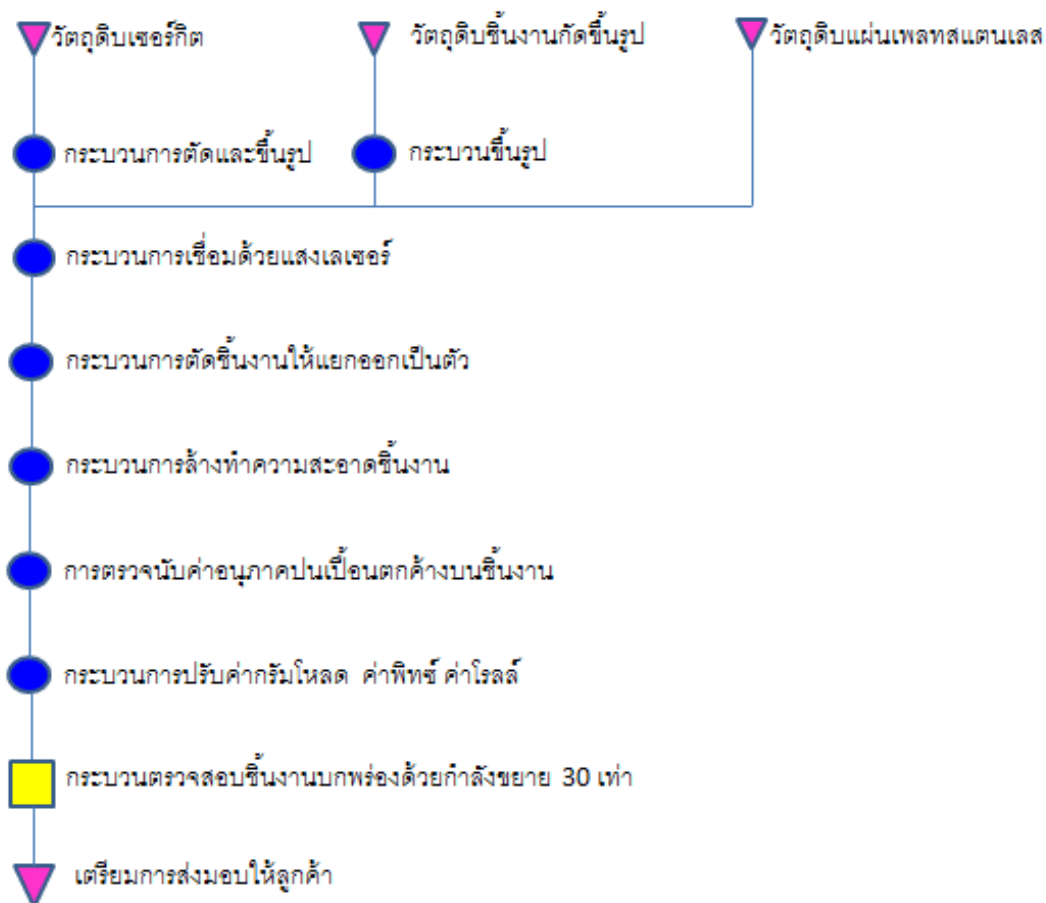
##### 3.1.1 กระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในกระบวนการผลิตจะประกอบด้วย 9 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. เตรียมวัตถุดิบชิ้นส่วนเซอร์กิต ชิ้นส่วนกัดขึ้นรูป และแผ่นเพลทสแตนเลส
2. นำชิ้นส่วนเซอร์กิตไปทำการตัดแยกชิ้นและขึ้นรูปตามข้อกำหนด
3. นำชิ้นส่วนกัดขึ้นรูปไปทำการขึ้นรูปตามข้อกำหนด
4. นำชิ้นส่วนเซอร์กิตที่ตัดเป็นชิ้นและขึ้นรูปแล้ว ชิ้นส่วนกัดขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป และแผ่นเพลทสแตนเลสเข้าสู่กระบวนการประกอบโดยใช้วิธีการเชื่อมโลหะด้วยแสงเลเซอร์
5. ทำการตัดชิ้นงานหลังจากการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ให้แยกออกเป็นตัว ซึ่งชิ้นงานที่ออกจากกระบวนการนี้จะเรียกว่าแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
6. นำชิ้นงานที่ได้เข้าสู่กระบวนการทำความสะอาด เพื่อล้างฝุ่นและสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน
7. สุ่มชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว เพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณอนุภาคปนเปื้อนที่ตกค้างอยู่บนชิ้นงาน ด้วยวิธีการตรวจนับอนุภาคในของเหลว (LPC) โดยจะทำการชักลุ่มตัวอย่างตามความสะดวกของผู้ปฏิบัติงาน

8. นำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการปรับค่าทางกล เพื่อให้ได้ค่าตามที่ลูกค้ากำหนด

9. นำงานที่ปรับค่าครั้งสุดท้ายมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องขนาดกำลังขยาย 30 เท่า เพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องของชิ้นงาน แล้วทำการเตรียมส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าต่อไปโดยสามารถสรุปกระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ข้างต้น ได้ดังภาพที่ 3.1

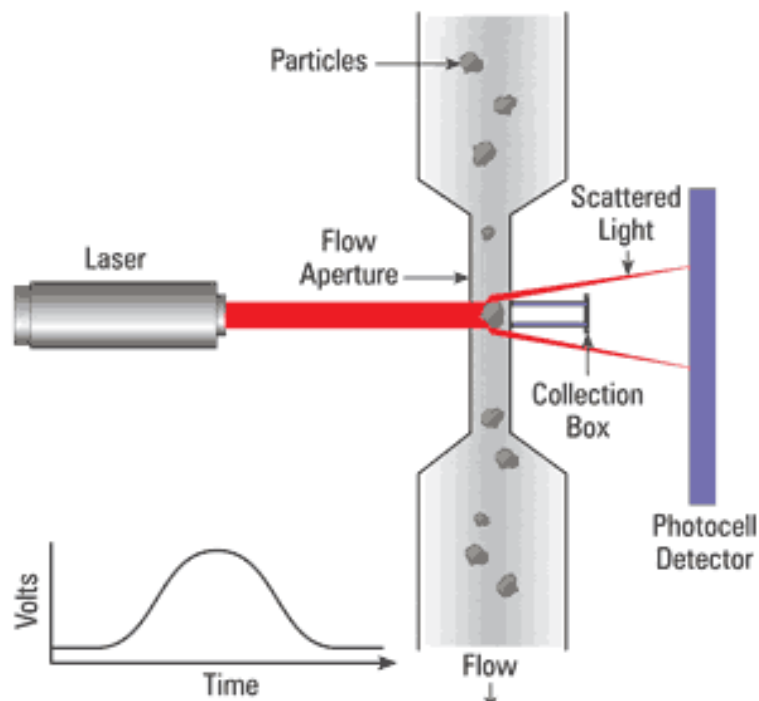


ภาพที่ 3.1 กระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไอร์แลนด์



### 3.1.2 การวิเคราะห์ค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้างผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว

ใช้เทคนิคของลำแสงเลเซอร์ส่องผ่านอนุภาคแล้วทำการตรวจวัดแสงที่มากกระทบ (scattering mode) หรือ ใช้การวัดแสงที่หายไป (extinction mode) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และ 3.3



ภาพที่ 3.2 หลักการวิเคราะห์ค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้างผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดชิ้นงานปนเปื้อนตกค้างผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว (LPC)

### ขั้นตอนการทดสอบค่า LPC

1. เติมน้ำใส่เครื่องอุตสาหกรรมโชนิกที่มีค่าความถี่ตามที่กำหนด ที่เป็นใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในการเขย่าสิ่งปนเปื้อนตกค้างออกจากตัวงาน
2. เติมน้ำที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนตามที่กำหนดใส่บีกเกอร์ที่เป็นภาชนะสำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ
3. นำบีกเกอร์วางในเครื่องอุตสาหกรรมโชนิก
4. เปิดเครื่องอุตสาหกรรมโชนิก ตามค่ากำลังวัตต์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ
5. นำชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น จุ่มลงในบีกเกอร์ที่อยู่ในเครื่องอุตสาหกรรมโชนิกและจับเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนตกค้างจากชิ้นงาน
6. นำชิ้นงานออกจากบีกเกอร์ที่อยู่ในเครื่องอุตสาหกรรมโชนิก เมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้
7. นำบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำหลังจากการสกัดชิ้นงานตามเวลาที่กำหนดไปทำการวัดค่า LPC
8. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 – 7 ให้ครบ 3 ครั้ง จากนั้นนำค่า LPC ที่ได้มาคำนวณค่า %RSD

#### 3.1.3 การสำรวจสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นของบริษัทกรณีศึกษา

จากการศึกษากระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟกระบวนการชักสุมตัวอย่างแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟรุ่นตัวอย่างของบริษัทกรณีศึกษา พบว่ามิใช่การชักสุมตัวอย่างจากความสะอาดเป็นไม่มีหลักเกณฑ์ใดๆ ในการสุ่มเลือกตัวอย่างที่อาจเป็นสาเหตุของความแปรปรวนได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยและบริษัทกรณีศึกษาจึงตั้งเป้าหมายที่จะลดค่า %RSD ที่อาจเกิดจากกระบวนการชักสุมตัวอย่างโดยจะทำการศึกษาและกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่างที่ส่งผลให้ค่า %RSD มีค่าต่ำลง

จากการศึกษากระบวนการทดสอบ LPC ผู้วิจัยได้และบริษัทกรณีศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการทดสอบค่า LPC โดยใช้การศึกษารีฟิทเทบิลิตีและรีโพรดิวซิบิลิตีของระบบการวัด (Gage Repeatability and Reproducibility, GR&R) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่สามารถจะเกิดขึ้นได้จากการบวนการทดสอบค่า LPC ซึ่งดำเนินการ โดยการเลือกพนักงาน 4 คน ให้มาทำการทดสอบค่า LPC บนชิ้นงานตัวอย่างกลุ่มเดียวกันและใช้เครื่องมือทดสอบชุดเดียวกัน จากนั้นนำค่า %RSD ที่ได้จากผู้ทดสอบที่แตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์ GR&R ของระบบการวัดโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความแปรปรวนในกระบวนการทดสอบค่า LPC

### 3.2 การออกแบบการทดลองและการวางแผนการทดลอง

#### 3.2.1 การออกแบบการการชักสุมตัวอย่าง

หลังจากวิเคราะห์การชักสุมตัวอย่างของบริษัทกรณีศึกษาพบว่าทำการชักสุมตัวอย่างตามความสะดวก ไม่มีรูปแบบการชักสุมตัวอย่างที่แน่นอน ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบรูปแบบการชักสุมตัวอย่างขึ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไทร์หลังจากผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิค โดยทำการกำหนดตำแหน่งการชักสุมตัวอย่างจากตะกร้าล้างงานทั้งหมด 2 ตำแหน่งดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ตำแหน่งการชักสุมตัวอย่างจากตะกร้าล้างงาน

จากภาพที่ 3.4 จะเห็นว่าตำแหน่งที่ทำการกำหนดเพื่อทำการชักสุมตัวอย่างจะแบ่งเป็น 2 ตำแหน่ง ได้แก่ตำแหน่งที่ 1 คือริมขอบของตะกร้าล้างงานและตำแหน่งที่ 2 คือกลางของตะกร้าล้างงาน สาเหตุที่ทำการกำหนดตำแหน่งดังกล่าวเนื่องมาจากคลื่นอุลตราโซนิคที่ส่งมาจากเครื่องล้างอุลตราโซนิคจะถูกส่งมาจากทางด้านล่างและด้านข้างของเครื่องล้าง ส่งผลให้ชิ้นงานที่ถูกวางในตะกร้าล้างงานในตำแหน่งที่ 1 จะถูกทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคที่มาจาก 2 ทิศทาง ในขณะที่ชิ้นงานที่ถูกวางในตะกร้าล้างงานในตำแหน่งที่ 2 จะถูกทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคที่มาจากเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

นอกจากการกำหนดตำแหน่งในการชักสุมตัวอย่างแล้วนั้นยังมีการกำหนดระยะเวลาในการชักสุมตัวอย่างเป็น 3 ช่วงเวลานั้นคือ ช่วงเวลาต้นกะ ช่วงเวลากลางกะ และช่วงเวลากลางกะ เนื่องจากในระยะเวลาที่แตกต่างกันดังกล่าว จะมีปริมาณของงานที่ถูกล้างสะสมแตกต่างกันคือ ช่วงเวลาต้นกะจะมีการล้างงานโดยเครื่องล้างในปริมาณไม่มาก ปริมาณอนุภาคที่ตกค้างอยู่ในเครื่องล้างจะยังมีปริมาณไม่มาก ในขณะที่ช่วงเวลากลางกะหรือช่วงเวลากลางกะจะมีการล้างงาน

ล้างงานโดยเครื่องล้างในปริมาณที่มากขึ้น อาจส่งผลให้มีปริมาณอนุภาคที่ตกค้างอยู่ในเครื่องล้างมากขึ้นซึ่งอาจส่งผลต่อค่า %RSD ได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบรูปแบบการชักสุมตัวอย่างโดยกำหนดตำแหน่งและช่วงเวลาในการชักสุมตัวอย่างดังตารางที่ 3.1 โดยตัวอย่างชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟจำนวนหนึ่งที่ได้จากแผนการชักสุมตัวอย่างข้างต้น จะนำไปผ่านกระบวนการตรวจวัดค่า LPC และจะทำการทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างแผนการชักสุมตัวอย่างแบบเดิมและแผนการชักสุมตัวอย่างที่ทำการกำหนดขึ้นใหม่ เพื่อที่จะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้หลักการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองรูปแบบการชักสุมตัวอย่าง

| การทดลอง | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD) |        |        |              |        |        |
|----------|--|--------|--------|--------------|--------|--------|
|          | ตำแหน่งที่ 1                                   |        |        | ตำแหน่งที่ 2 |        |        |
|          | ต้นกะ  | กลางกะ | ปลายกะ | ต้นกะ        | กลางกะ | ปลายกะ |
| 1        |  |        |        |              |        |        |
| 2        |  |        |        |              |        |        |
| 3        |  |        |        |              |        |        |
| 4        |  |        |        |              |        |        |
| 5        |  |        |        |              |        |        |
| 6        |  |        |        |              |        |        |
| 7        |  |        |        |              |        |        |
| 8        |  |        |        |              |        |        |
| 9        |  |        |        |              |        |        |
| 10       |  |        |        |              |        |        |

### 3.2.2 การกำหนดรูปแบบการชักสุมตัวอย่างเพื่อเข้าสู่กระบวนการทดสอบค่า LPC

หลังจากวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองการกำหนดรูปแบบการชักสุมตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิกแล้ว จะทำการเลือกรูปแบบของการชักสุมตัวอย่างที่ส่งผลให้ %RSD มีค่าต่ำที่สุด เพื่อกำหนดเป็นรูปแบบของการชักสุมตัวอย่างที่จะนำเข้าสู่กระบวนการตรวจวัดค่า LPC ที่จะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC ต่อไป

### 3.2.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

จากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC ได้แก่ (1)ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (%DO) (2)กำลังอุตราสวัตินิคที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน(Power) (3)เวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (Time) จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC ที่จะนำไปใช้การออกแบบการทดลองมีทั้งสิ้น 3 ปัจจัย

จากปัจจัยทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น ได้กำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้

1. ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ ที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน โดยจะเป็นน้ำปราศจากไอออนบรรจุอยู่ในบิกเกอร์ที่เป็นภาชนะสำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาผลของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนในปริมาณที่ต่ำและสูง โดยมีการแบ่งปัจจัยออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนที่ระดับ 30 %

ระดับที่ 2 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนที่ระดับ 40 %

ระดับที่ 3 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนที่ระดับ 50 %

ระดับที่ 4 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนที่ระดับ 60 %

ระดับที่ 5 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนที่ระดับ 70 %

โดยสาเหตุที่ทำการเลือกปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำต่ำสุดที่ 30 % เพราะการควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำให้มีระดับต่ำอย่างสม่ำเสมอทำได้ยาก เนื่องจากจะมีการละลายของออกซิเจนในอากาศลงไปได้อีก โดยที่ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปริมาณ 30 % เป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ทางบริษัทเคมีศึกษาสามารถควบคุมได้

2. ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน จากข้อกำหนดของลูกค้าหลายๆรายของบริษัทเคมีศึกษาพบว่าระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานที่ใช้ทดสอบค่า LPC ต่ำที่สุดที่ 30 วินาที และสูงสุดที่ 150 วินาที ผู้วิจัยจึงนำมาใช้ในการกำหนดระดับปัจจัย ดังนี้

ระดับที่ 1 ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานที่ 30 วินาที

ระดับที่ 2 ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานที่ 60 วินาที

ระดับที่ 3 ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานที่ 90 วินาที

ระดับที่ 4 ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานที่ 120 วินาที

ระดับที่ 5 ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานที่ 150 วินาที

3. กำลังวัตต์คลื่นอุลตราโซนิก จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่ากำลังวัตต์คลื่นอุลตราโซนิกก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุของการเกิดฟองอากาศ หากใช้พลังงานต่ำเกินไปจะทำให้ฟองอากาศไม่สามารถทำความสะอาดชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง หากใช้กำลังวัตต์สูงเกินไปจะทำให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานที่เปราะบางได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดระดับกำลังวัตต์คลื่นอุลตราโซนิกดังนี้

ระดับที่ 1 พลังงานคลื่นอุลตราโซนิกที่ระดับ 40 วัตต์ต่อแกลลอน

ระดับที่ 2 พลังงานคลื่นอุลตราโซนิกที่ระดับ 50 วัตต์ต่อแกลลอน

ระดับที่ 3 พลังงานคลื่นอุลตราโซนิกที่ระดับ 60 วัตต์ต่อแกลลอน

ระดับที่ 4 พลังงานคลื่นอุลตราโซนิกที่ระดับ 70 วัตต์ต่อแกลลอน

ระดับที่ 5 พลังงานคลื่นอุลตราโซนิกที่ระดับ 80 วัตต์ต่อแกลลอน

โดยสาเหตุที่ทำให้การเลือกใช้ค่าพลังงานคลื่นอุลตราโซนิกที่ระดับ 40 วัตต์ต่อแกลลอนเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นข้อจำกัดของเครื่องอุลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถปรับค่าพลังงานให้ต่ำสุดได้เพียง 40 วัตต์ต่อแกลลอนเท่านั้น

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่า LPC ทั้ง 3 ปัจจัย โดยกำหนดการออกแบบการทดลองด้วยระดับของปัจจัย 5 ระดับนั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

| รหัส | ปัจจัยที่ศึกษา                | ระดับปัจจัย |    |    |     |     | หน่วย          |
|------|-------------------------------|-------------|----|----|-----|-----|----------------|
|      |                               | 1           | 2  | 3  | 4   | 5   |                |
| A    | ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ        | 30          | 40 | 50 | 60  | 70  | เปอร์เซ็นต์    |
| B    | กำลังวัตต์คลื่นอุลตราโซนิก    | 40          | 50 | 60 | 70  | 80  | วัตต์ต่อแกลลอน |
| C    | ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน | 30          | 60 | 90 | 120 | 150 | วินาที         |

### 3.2.4 รูปแบบการทดลอง

ในส่วนของการออกแบบการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยมีปัจจัยทั้งสิ้น 3 ปัจจัย และมีการทำซ้ำ 2 การทดลอง จำนวนการทดลองรวมทั้งสิ้น 250 การทดลอง ซึ่งผู้วิจัยทำการออกแบบตารางบันทึกผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 ตัวอย่างดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 1            | 70          | 50 | 90  |  |
| 2            | 40          | 70 | 90  |  |
| 3            | 60          | 40 | 60  |  |
| 4            | 40          | 60 | 120 |  |
| 5            | 60          | 80 | 120 |  |
| 6            | 30          | 60 | 90  |  |
| 7            | 70          | 70 | 120 |  |
| 8            | 40          | 70 | 120 |  |
| 9            | 50          | 80 | 60  |  |
| 10           | 70          | 80 | 150 |  |
| 11           | 70          | 70 | 90  |  |
| 12           | 60          | 50 | 150 |  |
| 13           | 70          | 70 | 60  |  |
| 14           | 60          | 60 | 30  |  |
| 15           | 40          | 40 | 150 |  |
| 16           | 30          | 70 | 150 |  |
| 17           | 60          | 50 | 120 |  |
| 18           | 30          | 40 | 60  |  |
| 19           | 50          | 50 | 90  |  |
| 20           | 30          | 50 | 60  |  |
| 21           | 40          | 60 | 30  |  |
| 22           | 70          | 80 | 120 |  |
| 23           | 70          | 50 | 120 |  |
| 24           | 40          | 60 | 150 |  |
| ⋮            | ⋮           | ⋮  | ⋮   |  |
| 250          | 60          | 80 | 120 |  |

### 3.2.5 ตัวแปรควบคุม

1. พนักงานที่ทำการทดสอบค่า LPC จะต้องเป็นคนเดียวกันในทุกๆการทดลองและจะต้องมีความเชี่ยวชาญในการวัดค่า LPC เท่านั้น
2. ในกระบวนการทดสอบค่า LPC จะใช้อุณหภูมิห้องที่มีความถี่ 132 กิโลเฮิรตซ์เท่านั้น

### 3.2.6 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองที่เลือกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ได้กำหนดไว้ว่าค่า %RSD ของกระบวนการตรวจวัดค่า LPC ของปริมาณอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 0.3 ไมโครเมตร ต้องมีค่าไม่เกิน 30%

### 3.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติและการสรุปผล

1. ทำการออกแบบรูปแบบการชักสุมตัวอย่างชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และทำกาเก็บตัวอย่างตามแผนจำนวนหนึ่งเพื่อทำการทดสอบค่า LPC
2. ทำการทดสอบค่า LPC บนชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการชักสุมตามแผนการชักสุมตัวอย่างที่ทำการออกแบบไว้เทียบกับชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการชักสุมตัวอย่างแบบปัจจุบัน
3. ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าเฉลี่ย %RSD บนชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการชักสุมตามแผนการชักสุมตัวอย่างที่ทำการออกแบบไว้เทียบกับชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการชักสุมตัวอย่างแบบปัจจุบัน โดยใช้ฟังก์ชัน One way ANOVA และ 2-Sample t ของโปรแกรม MINITAB 16 ซึ่งเป็นไปตามหลักการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)
4. เลือกรูปแบบการชักสุมตัวอย่างที่ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อใช้เป็นรูปแบบการชักสุมตัวอย่างเพื่อเข้าสู่กระบวนการตรวจวัดค่า LPC ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ของกระบวนการตรวจวัดค่า LPC
5. เลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ของกระบวนการตรวจวัดค่า LPC จากผลการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
6. ทำการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ของกระบวนการตรวจวัดค่า LPC โดยการใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ



7. ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบและวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยหาค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC และค่า %RSD
8. ทำการทดลองซ้ำจากการวัดค่า LPC โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อยืนยันแบบจำลองการถดถอย มีตารางบันทึกผลดังตารางที่ 3.4 และทำการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการตรวจวัดค่า LPC

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง

| เวลา (วินาที) | ค่า %RSD   |            |            | ค่าเฉลี่ย |
|---------------|------------|------------|------------|-----------|
|               | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |
| 30            |            |            |            |           |
| 60            |            |            |            |           |
| 90            |            |            |            |           |
| 120           |            |            |            |           |
| 150           |            |            |            |           |



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ประกอบด้วยผลการทดลอง 3 ส่วน คือ (1)ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการวัดค่า LPC (2)ผลการทดลองจากการกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่างและ(3)ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ของปัจจัยที่มีผลต่อค่า LPC เพื่อค้นหาสถานะของปัจจัยที่ดีที่สุด ที่ส่งผลให้ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ต่ำที่สุด

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลสามารถแสดงผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการวัดค่า LPC

ในขั้นตอนการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการวัดค่า LPC ในปัจจุบัน โดยการเลือกพนักงาน 4 คน ประกอบด้วยพนักงาน A , B , C และ D ให้มาทำการทดสอบค่า LPC บนชิ้นงานตัวอย่างกลุ่มเดียวกันและใช้เครื่องมือทดสอบชุดเดียวกันซึ่งได้ผลการทดลองค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ตามตารางที่ 4.1 จากนั้นนำค่า %RSD ที่ได้จากพนักงานที่แตกต่างกันมาทำการวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำ(Repeatability) และความสามารถในการทำเหมือน(Reproducibility) ของระบบการวัด (Gage Repeatability and Reproducibility, GR&R) โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความแปรปรวนที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลค่า %RSD ที่ใช้วิเคราะห์ GR&R

| พนักงาน | ชิ้นงาน | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากการทดลอง |               |               |
|---------|---------|---|---------------|---------------|
|         |         | วัดครั้งที่ 1   | วัดครั้งที่ 2 | วัดครั้งที่ 3 |
| A       | 1       | 28.00   | 42.53         | 33.51         |
|         | 2       | 9.78  | 32.00         | 16.58         |
| B       | 1       | 25.14   | 25.14         | 42.53         |
|         | 2       | 16.58   | 8.48          | 16.00         |
| C       | 1       | 40.00   | 33.51         | 38.71         |
|         | 2       | 21.75   | 8.00          | 10.91         |
| D       | 1       | 44.49   | 48.67         | 8.00          |
|         | 2       | 38.71   | 37.35         | 28.76         |

| <b>Gage R&amp;R (Nested) for %RSD</b> |    |         |         |         |       |  |
|---------------------------------------|----|---------|---------|---------|-------|--|
| Source                                | DF | SS      | MS      | F       | P     |  |
| Operator                              | 3  | 466.00  | 155.332 | 0.37664 | 0.776 |  |
| Part No (Operator)                    | 4  | 1649.68 | 412.421 | 3.67169 | 0.026 |  |
| Repeatability                         | 16 | 1797.20 | 112.325 |         |       |  |
| Total                                 | 23 | 3912.88 |         |         |       |  |

| <b>Gage R&amp;R</b> |         |                 |                            |                 |
|---------------------|---------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| Source              | VarComp | 95% Upper Bound | %Contribution (of VarComp) | 95% Upper Bound |
| Total Gage R&R      | 112.325 | 333.101         | 52.89                      | 91.75           |
| Repeatability       | 112.325 | 225.732         | 52.89                      | 100.00          |
| Reproducibility     | 0.000   | 189.534         | 0.00                       | 42.03           |
| Part-To-Part        | 100.032 | 734.228         | 47.11                      | 100.00          |
| Total Variation     | 212.357 | 592.991         | 100.00                     |                 |

Upper process tolerance limit = 30

| Source          | StdDev (SD) | 95% Upper Bound | Study Var (6 * SD) | 95% Upper Bound | %Study Var (%SV) |
|-----------------|-------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|
| Total Gage R&R  | 10.5983     | 18.251          | 63.5900            | 109.506         | 72.73            |
| Repeatability   | 10.5983     | 15.024          | 63.5900            | 90.146          | 72.73            |
| Reproducibility | 0.0000      | 13.767          | 0.0000             | 82.603          | 0.00             |
| Part-To-Part    | 10.0016     | 27.097          | 60.0096            | 162.580         | 68.63            |
| Total Variation | 14.5725     | 24.351          | 87.4348            | 146.108         | 100.00           |

| Source          | 95% Upper Bound | %Tolerance (SV/Toler) | 95% Upper Bound |
|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Total Gage R&R  | 95.79           | 1176.26               | 2025.59         |
| Repeatability   | 100.00          | 1176.26               | 1667.48         |
| Reproducibility | 64.83           | 0.00                  | 1527.95         |
| Part-To-Part    | 100.00          | 1110.03               | 3007.32         |
| Total Variation |                 | 1617.33               | 2702.64         |

Number of Distinct Categories = 1  
95% Upper Bound = \*

ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ Gage R&R (Nested) ของค่า %RSD

จากภาพที่ 4.1 พบว่าพนักงานไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ ( $\alpha=0.05$ ) แสดงให้เห็นได้จากค่า P-Value ที่ 0.776 ( $> 0.05$ ) แต่ชิ้นงานที่สุ่มมาจากล็อตการผลิตที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นได้จากค่า P-Value ที่ 0.026 ( $< 0.05$ ) และจะเห็นว่าค่าร้อยละความแม่นยำของระบบการวัด (%R&R) มีค่าเท่ากับ 1,176.26% ( $> 30\%$ ) แสดงให้เห็นว่าต้องดำเนินการปรับปรุงแก้ไขระบบการวัดในปัจจุบัน

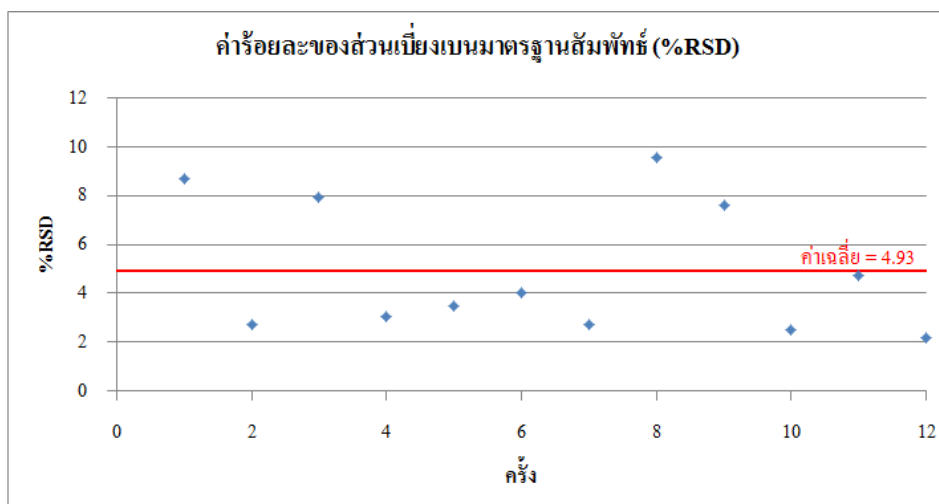
จากการวิเคราะห์ GR&R สามารถระบุได้ว่าสาเหตุของความผันแปรของกระบวนการวัดค่า LPC มาจาก 2 ส่วนดังนี้

1. ชิ้นงานจากกระบวนการผลิตก่อนหน้า คือ กระบวนการล้างทำความสะอาด โดยสามารถทำการศึกษาได้จากการทดลองออกแบบการชักสุมตัวอย่าง
2. กระบวนการวัดค่า LPC ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การสกัดสิ่งปนเปื้อนด้วยคลื่นอุลตราโซนิค และการใช้เซ็นเซอร์อ่านค่าอนุภาคในของเหลว

สามารถทำการศึกษาระบบการสกัดสิ่งปนเปื้อนได้จากการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และในส่วนของการใช้เซ็นเซอร์อ่านค่าอนุภาคในของเหลวไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากมีข้อจำกัดใการปรับตั้งค่าของตัวเซ็นเซอร์ แต่สามารถศึกษาค่าความแปรปรวนที่เกิดจากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์ได้จากการเก็บข้อมูลค่า %RSD จากการอ่านค่าซ้ำๆ ของเซ็นเซอร์ โดยใช้ของเหลวจากการสกัดชิ้นงานตัวอย่างเดียวกันในการอ่านค่าต่อค่า %RSD 1 ค่าจากการทำการทดลองอ่านค่าซ้ำจำนวน 12 การทดลองพบว่าค่า %RSD ที่เกิดจากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.93% ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลค่า %RSD จากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์

| การทดลอง         | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) |
|------------------|---|
| 1                | 8.67  |
| 2                | 2.73  |
| 3                | 7.93  |
| 4                | 3.05  |
| 5                | 3.46  |
| 6                | 4.03  |
| 7                | 2.73  |
| 8                | 9.56  |
| 9                | 7.59  |
| 10               | 2.50  |
| 11               | 4.75  |
| 12               | 2.16  |
| <b>ค่าเฉลี่ย</b> | <b>4.93</b>                                     |



ภาพที่ 4.2 ค่า %RSD จากการอ่านค่าของเซ็นเซอร์

#### 4.2 ผลการทดลองการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่างจากเครื่องล้างงานด้วยคลื่นอุลตราโซนิค

จากการทดลองกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่างจากเครื่องล้างงาน โดยทำการกำหนดตำแหน่งของงานในตระกร้าล้างและช่วงเวลาในการชักกลุ่มตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการวัดค่า LPC จำนวน 60 ตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 4.3 และค่า %RSD ที่ได้จากกระบวนการวัดค่า LPC ในปัจจุบันจำนวน 60 ตัวอย่าง พบว่าค่า %RSD เหลือเท่ากับ 28.49% ดังแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่า %RSD ที่ได้จากกระบวนการวัดค่า LPC จากการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่าง

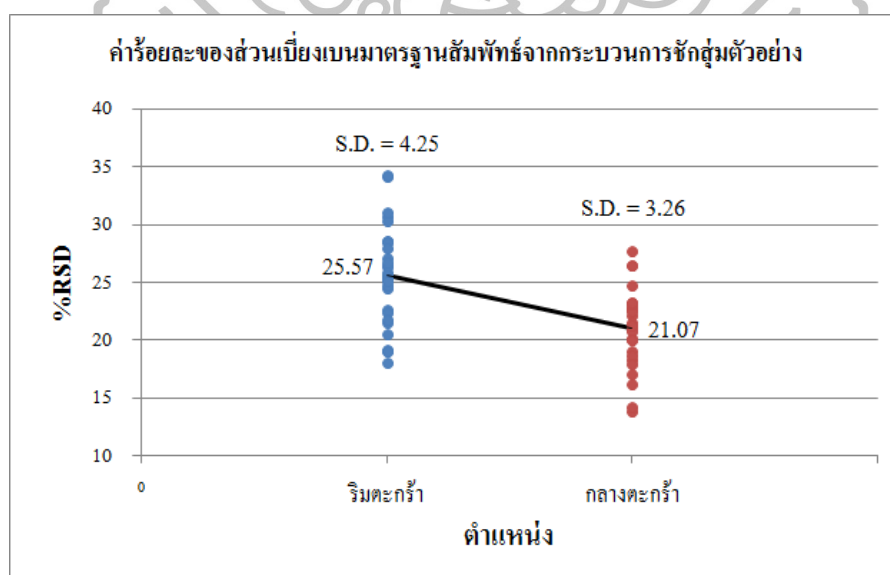
| การทดลอง | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) |        |        |              |        |        |
|----------|---|--------|--------|--------------|--------|--------|
|          | ตำแหน่งที่ 1                                    |        |        | ตำแหน่งที่ 2 |        |        |
|          | ต้นกะ   | กลางกะ | ปลายกะ | ต้นกะ        | กลางกะ | ปลายกะ |
| 1        | 22.60   | 24.75  | 25.27  | 23.27        | 22.16  | 22.59  |
| 2        | 25.35   | 27.07  | 19.11  | 21.18        | 16.28  | 22.53  |
| 3        | 30.73   | 30.38  | 21.80  | 24.74        | 19.10  | 21.23  |
| 4        | 28.57   | 25.92  | 25.38  | 26.44        | 18.65  | 21.26  |
| 5        | 22.39   | 31.03  | 25.08  | 21.17        | 13.92  | 18.00  |
| 6        | 26.35   | 19.05  | 28.50  | 22.95        | 27.73  | 20.07  |
| 7        | 28.56   | 34.12  | 34.33  | 18.31        | 20.98  | 23.12  |
| 8        | 24.57   | 19.22  | 20.56  | 17.09        | 20.78  | 20.08  |
| 9        | 21.54   | 26.44  | 26.74  | 26.48        | 22.84  | 23.24  |
| 10       | 18.03   | 25.66  | 27.95  | 20.18        | 21.58  | 14.24  |

ตารางที่ 4.4 ค่า %RSD ที่ได้จากการคำนวณการวัดค่า LPC ในปัจจุบัน

| ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ในปัจจุบัน |       |       |          |       |       |
|--|-------|-------|----------|-------|-------|
| 18.13  | 27.15 | 27.03 | 21.08    | 10.77 | 14.51 |
| 29.23  | 17.52 | 32.85 | 14.57    | 32.04 | 14.36 |
| 49.45  | 27.45 | 83.63 | 22.70    | 36.88 | 17.37 |
| 45.86  | 20.71 | 18.15 | 20.12    | 38.72 | 41.20 |
| 20.32  | 35.30 | 16.40 | 29.68    | 23.39 | 50.06 |
| 47.40  | 21.71 | 37.26 | 38.63    | 15.61 | 40.29 |
| 31.32  | 29.61 | 51.42 | 39.29    | 15.27 | 21.32 |
| 23.38  | 14.91 | 16.78 | 21.28    | 35.00 | 13.32 |
| 33.42  | 36.77 | 41.40 | 13.10    | 21.14 | 36.34 |
| 13.07  | 23.07 | 49.54 | 25.10    | 25.62 | 20.28 |
| ค่า %RSD เฉลี่ย  |       | 28.49 | ค่า S.D. |       | 13.23 |

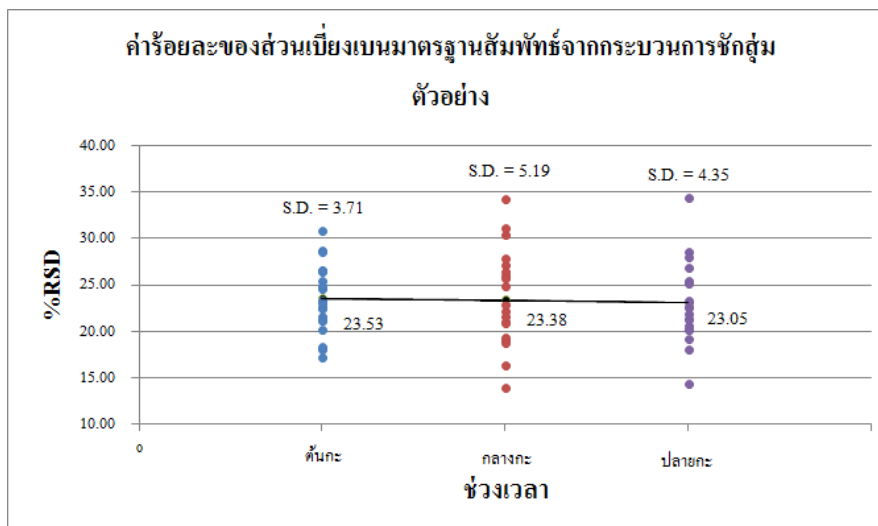
#### 4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

จากผลการทดลอง เมื่อนำค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า %RSD มาทำการสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยกับค่า %RSD ดังแสดงได้ตามภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งงานในตะกร้าล้ากับค่า %RSD

จากภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งงานในตะกร้าล้างกับค่า %RSD ซึ่งงานที่ทำการชักส้อมมาจากตรงกลางตะกร้าล้างงานให้ค่า %RSD และค่าการกระจายของข้อมูลที่ต่ำกว่างานที่ทำการชักส้อมมาจากริมตะกร้าล้าง



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาในการชักส้อมตัวอย่างกับค่า %RSD

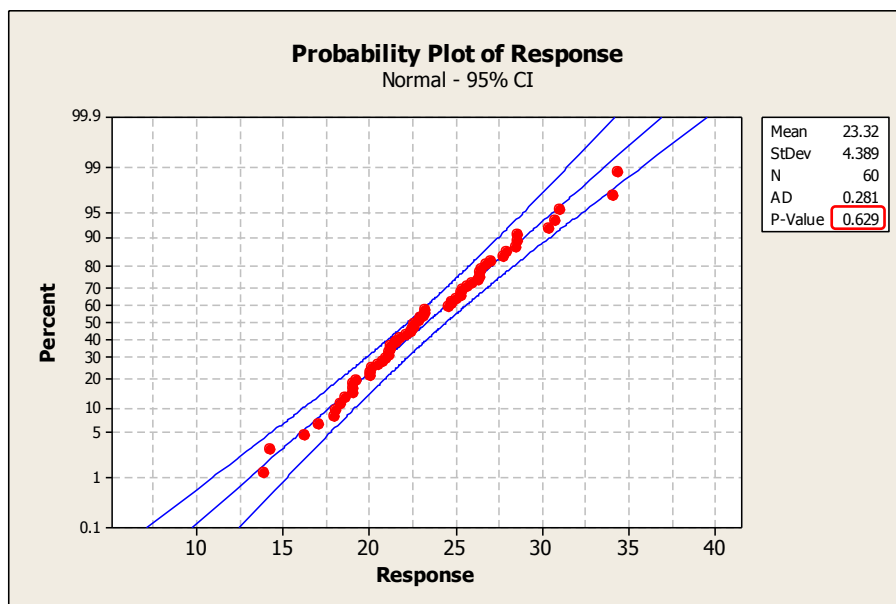
จากภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของช่วงเวลาในการชักส้อมตัวอย่างกับค่า %RSD ซึ่งงานที่ทำการชักส้อมมาจากช่วงเวลาที่แตกต่างกันให้ค่า %RSD เฉลี่ยที่ 23.53%, 23.38% และ 23.05% ซึ่งใกล้เคียงกันมาก แต่ให้ค่าการกระจายของข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยช่วงเวลากลางกะจะให้ค่ากระจายของข้อมูลที่มากที่สุด รองลงมาคือช่วงเวลากลางกะ และต้นกะตามลำดับ

#### 4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองคือ การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทำทดลอง โดยมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง (Residuals) ต้องเป็นไปตามหลักการ  $\mathcal{E}_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งการตรวจสอบ  $\mathcal{E}_{ij}$  มี 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

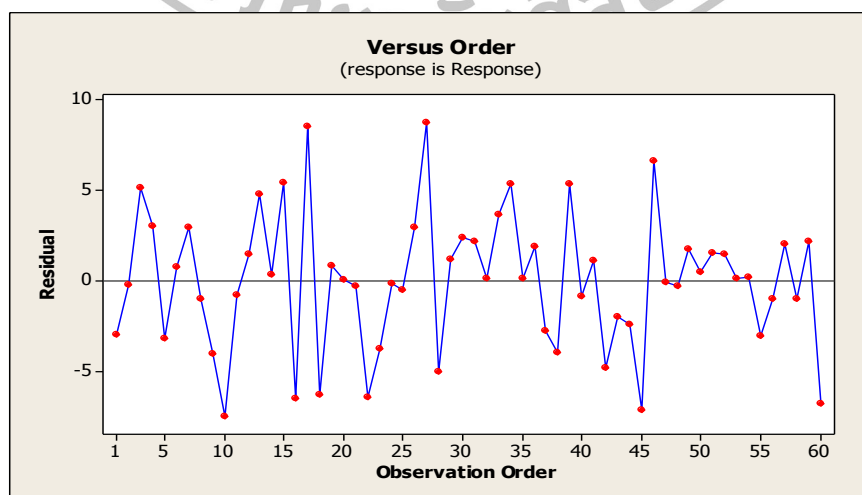
1. การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (The Normality Assumption) ของค่าส่วนตกค้าง จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

(Normal Probability Plot) ดังภาพที่ 4.5 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้างของค่า %RSD จากการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่าง

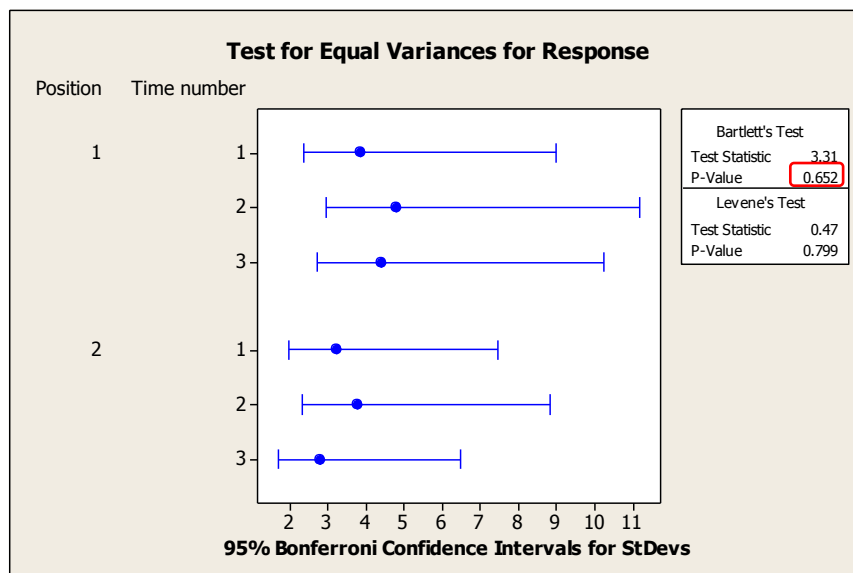
2. การตรวจสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ (Independence Assumption) ของค่าส่วนตกค้าง การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) ดังแสดงตามภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างจากการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่าง



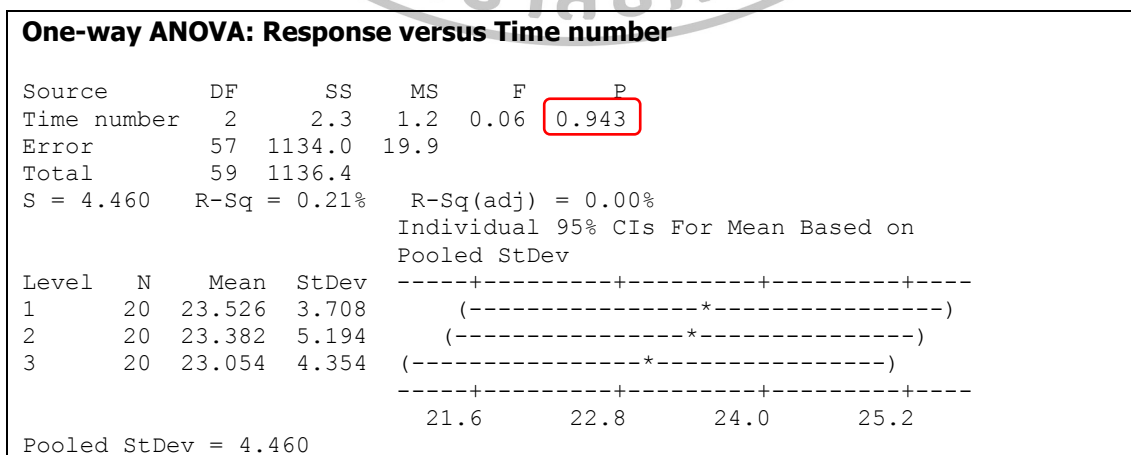
3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง เป็นการตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างเทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัยพบว่าค่าส่วนตกค้างในแต่ละระดับปัจจัยของอันตรกิริยามีความเสถียรของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4.7



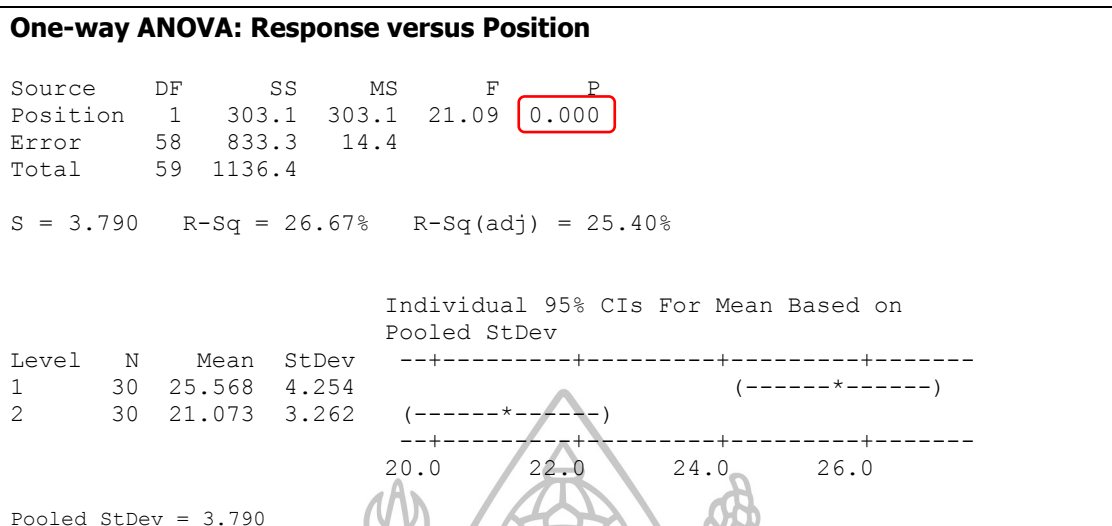
ภาพที่ 4.7 ความเสถียรของความแปรปรวนจากการกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่าง

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %RSD จากการทดลองกำหนดแผนการชักกลุ่มตัวอย่าง

เมื่อนำค่า %RSD จากตารางที่ 4.2 มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab 16 เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า %RSD โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ( $\alpha=0.05$ ) ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.8 การวิเคราะห์ One-way ANOVA ของช่วงเวลาในการชักกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อค่า %RSD



ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์ One-way ANOVA ของตำแหน่งในการชักสุมตัวอย่างที่มีต่อค่า %RSD

จากผลการวิเคราะห์ค่า %RSD ต่อปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยพบว่าช่วงเวลาในการชักสุมตัวอย่างไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จากค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4.8 โดยที่ตำแหน่งในการชักสุมตัวอย่างจากเครื่องล้างงานด้วยคลื่นอุลตราโซนิคมีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จากค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4.9

#### 4.2.4 การทดสอบความแตกต่างของค่า %RSD ของระดับปัจจัยในทดลองกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่าง (2-Sample t -Test)

เมื่อนำค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4.2 และค่า %RSD ในปัจจุบันดังตารางที่ 4.3 มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของค่า %RSD ที่ได้จากการกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่าง (2-Sample t -Test) ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab 16 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 เพื่อหาความแตกต่างกันของค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองกับค่า %RSD ในปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 4.10 และเพื่อหาความแตกต่างกันของค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองตำแหน่งที่ 1 (ริมตะกร้า) กับตำแหน่งที่ 2 (กลางตะกร้า) ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 4.11

### Two-Sample T-Test and CI: New, Current

Two-sample T for New vs Current

|         | N  | Mean  | StDev | SE Mean |
|---------|----|-------|-------|---------|
| New     | 60 | 23.32 | 4.39  | 0.57    |
| Current | 60 | 28.5  | 13.2  | 1.7     |

Difference = mu (New) - mu (Current)

Estimate for difference: -5.17

95% CI for difference: (-8.73, -1.60)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -2.87 P-Value = 0.005 DF = 118

Both use Pooled StDev = 9.8596

ภาพที่ 4.10 การวิเคราะห์ 2-Sample T-Test ระหว่างค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองกับค่า %RSD ในปัจจุบัน

จากภาพที่ 4.10 พบว่าค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่าง มีค่าน้อยกว่าค่า %RSD จากการชักสุมตัวอย่างในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ ( $\alpha=0.05$ ) จากค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.05

### Two-Sample T-Test and CI: ตำแหน่งที่ 1, ตำแหน่งที่ 2

Two-sample T for ตำแหน่งที่ 1 vs ตำแหน่งที่ 2

|              | N  | Mean  | StDev | SE Mean |
|--------------|----|-------|-------|---------|
| ตำแหน่งที่ 1 | 30 | 25.57 | 4.25  | 0.78    |
| ตำแหน่งที่ 2 | 30 | 21.07 | 3.26  | 0.60    |

Difference = mu (ตำแหน่งที่ 1) - mu (ตำแหน่งที่ 2)

Estimate for difference: 4.495

95% CI for difference: (2.536, 6.454)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4.59 P-Value = 0.000 DF = 58

Both use Pooled StDev = 3.7905

ภาพที่ 4.11 การวิเคราะห์ 2-Sample T-Test ระหว่างค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองตำแหน่งที่ 1 (ริมตะกร้า) กับตำแหน่งที่ 2 (กลางตะกร้า)

จากภาพที่ 4.11 พบว่าค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่าง จากตำแหน่งที่ 1 (ริมตะกร้า) มากกว่าค่า %RSD ที่ได้จากตำแหน่งที่ 2 (กลางตะกร้า) อย่างมีนัยสำคัญ ( $\alpha=0.05$ ) จากค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.05

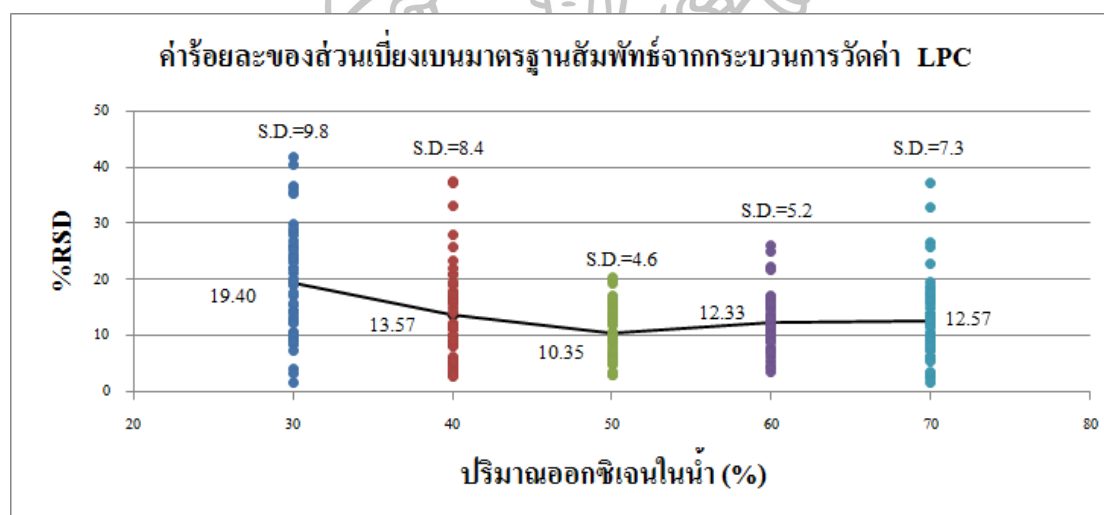
จากผลการทดลองพบว่าสภาวะในการชักสุมตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ ตำแหน่งที่ 2 (กลางตะกร้า) ที่ทำให้ค่า %RSD ต่ำที่สุดที่ 21.07% เปรียบเทียบกับค่า %RSD ในปัจจุบันที่ 28.49 %

#### 4.3 ผลการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบของกระบวนการวัดค่า LPC

ในขั้นตอนการทดลองนี้ ได้มีการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ที่จะนำมาทำการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน(A) กำลังอุลตราโซนิกที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน(B) และ เวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (C) โดยกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองเป็น 5 ระดับ และมีการทำซ้ำ 2 การทดลองรวมเป็นการทดลองทั้งหมด 250 การทดลอง และมีลำดับในการทดลองเป็นแบบสุ่ม และเนื่องจากข้อมูลส่วนนี้มีจำนวนมากจึงแสดงค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองไว้ดังตารางในภาคผนวก ก.

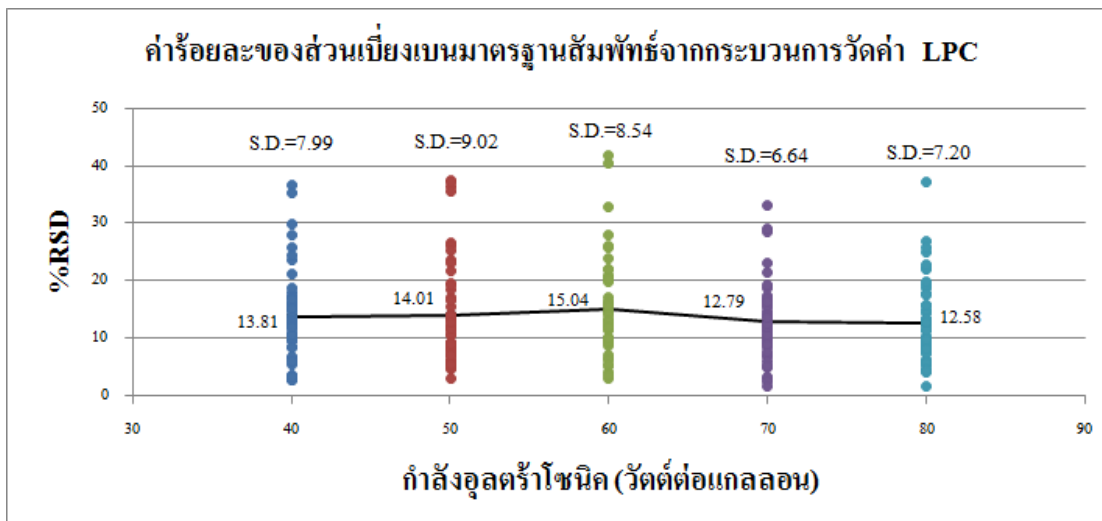
##### 4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

จากผลการทดลองซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า %RSD มาทำการสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยกับค่า %RSD ดังแสดงได้ตามภาพที่ 4.12 , 4.13 และภาพที่ 4.14



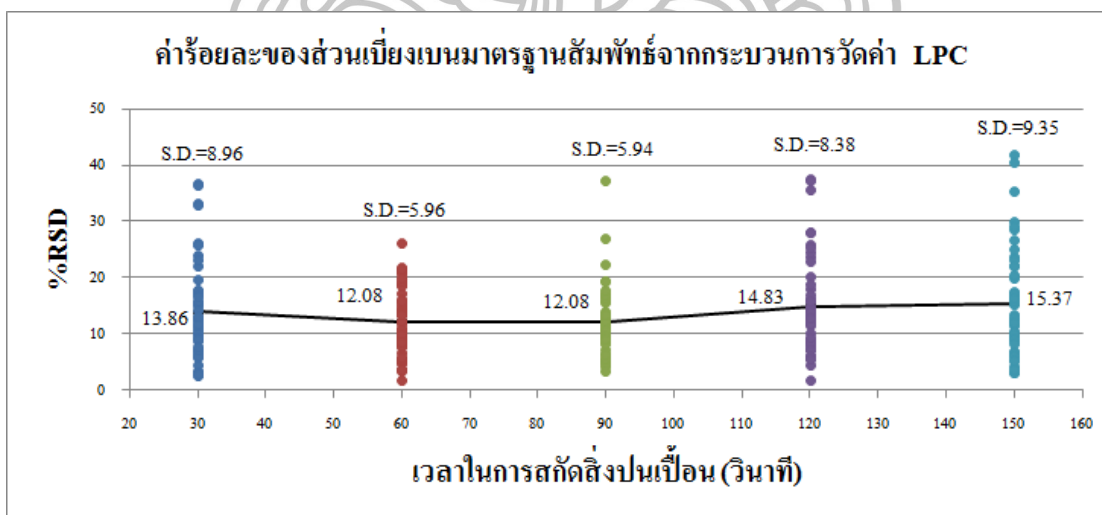
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนกับค่า %RSD

จากภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของระหว่างปริมาณของออกซิเจนกับค่า %RSD พบว่าที่ปริมาณของออกซิเจน 50% ให้ค่า %RSD และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอุตราโซนิกกับค่า %RSD

จากภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอุตราโซนิกกับค่า %RSD พบว่าเมื่อใช้กำลังอุตราโซนิกที่แตกต่างกันจะให้ค่า %RSD เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยกำลังอุตราโซนิกที่ 70 วัดต่อแกลลอนจะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ต่ำที่สุด



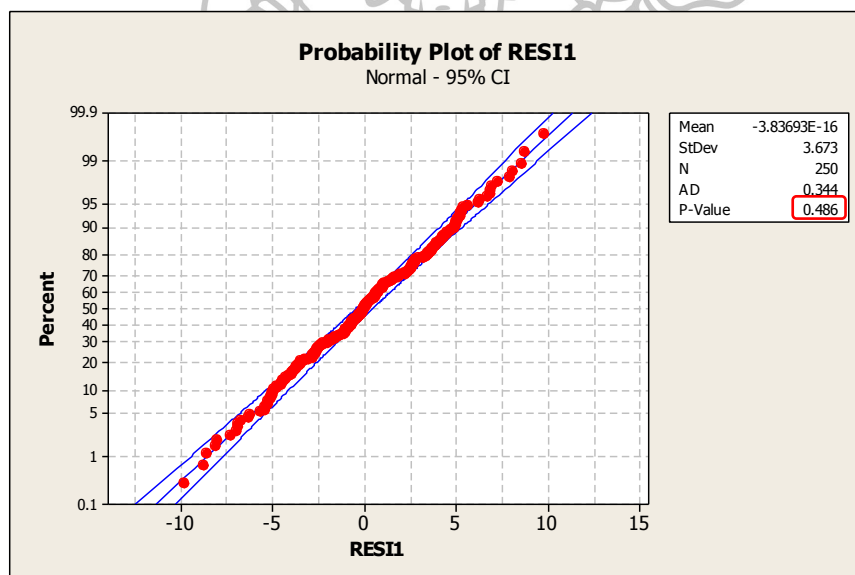
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนกับค่า %RSD

จากภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของระหว่างเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนกับค่า %RSD พบว่าเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนที่ 60 วินาที และ 90 วินาที ให้ค่า %RSD ที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ใกล้เคียงกันและมีค่าที่ต่ำที่สุดเช่นกัน

#### 4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

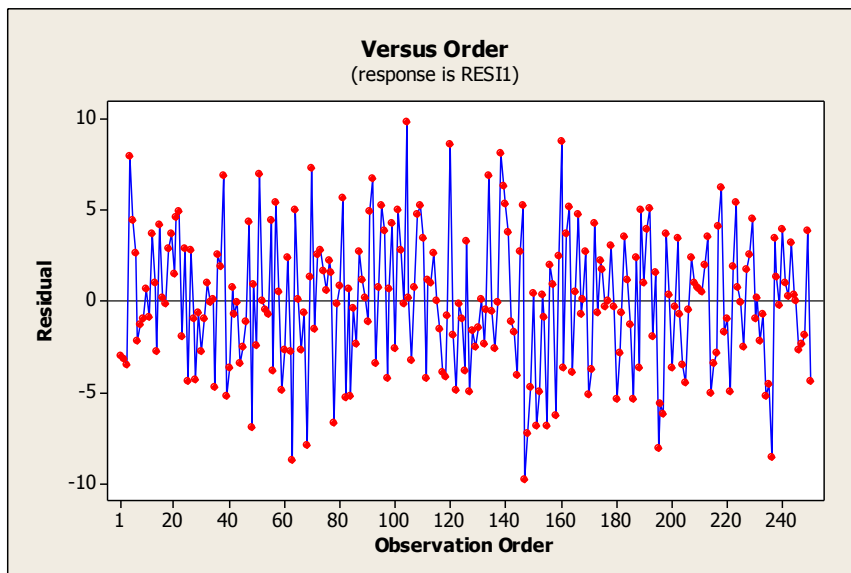
การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองคือ การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทำทดลอง โดยมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง (Residuals) ต้องเป็นไปตามหลักการ  $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ  $\sigma^2$  มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งการตรวจสอบ  $\varepsilon_{ij}$  มี 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (The Normality Assumption) ของค่าส่วนตกค้าง จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ดังภาพที่ 4.15 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



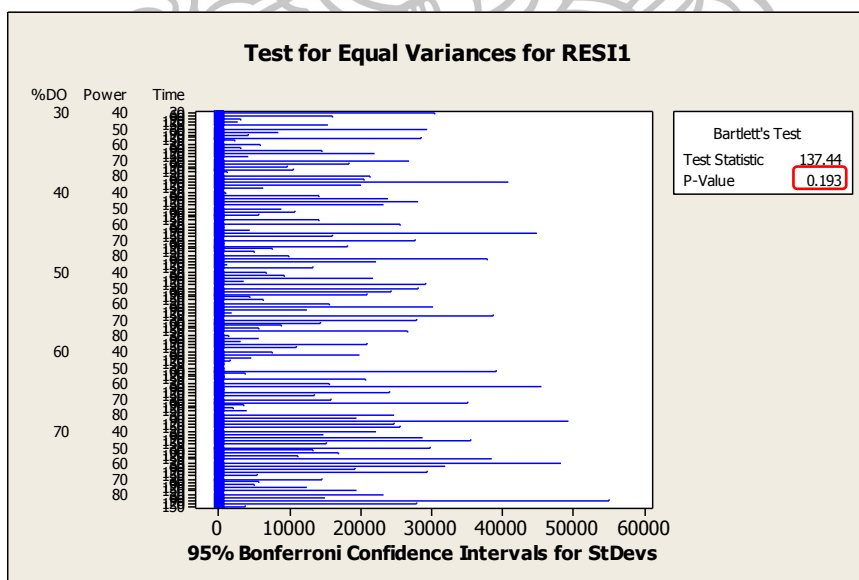
ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้างของค่า %RSD การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

2. การตรวจสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ (Independence Assumption) ของค่าส่วนตกค้าง พิจารณาจากแผนภูมิการกระจายดังภาพที่ 4.16 พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง เป็นการตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง เทียบกับระดับของปัจจัยทุกปัจจัย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง พบว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนเท่ากันเนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ความเสถียรของความแปรปรวนค่า %RSD การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

### 4.3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %RSD

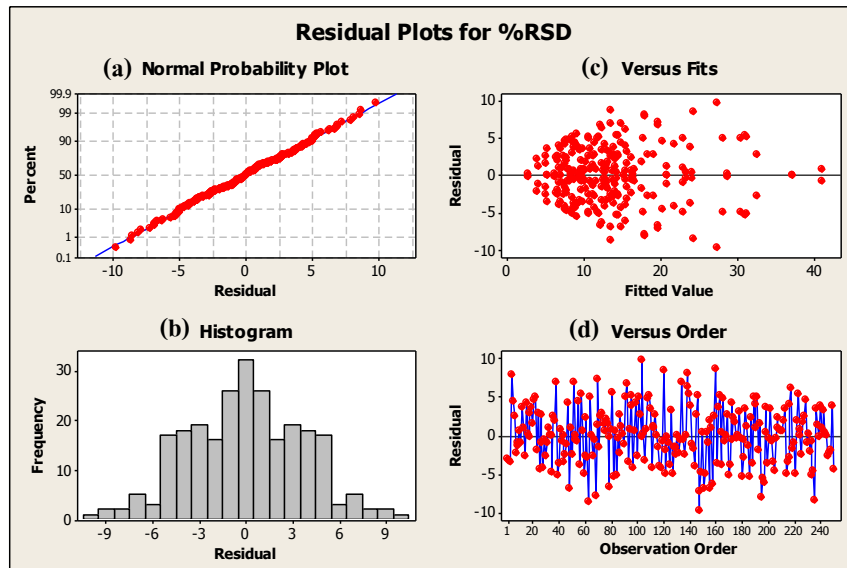
นำค่า %RSD จากตารางที่ 4.4 มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ( $\alpha=0.05$ ) ผลการวิเคราะห์ที่แสดงได้ดัง ภาพที่ 4.18 และ 4.19

| General Linear Model: %RSD versus %DO, Power, Time         |       |          |                      |        |       |       |
|--|-------|----------|----------------------|--------|-------|-------|
| Factor   | Type  | Levels   | Values               |        |       |       |
| %DO  | fixed | 5        | 30, 40, 50, 60, 70   |        |       |       |
| Power  | fixed | 5        | 40, 50, 60, 70, 80   |        |       |       |
| Time   | fixed | 5        | 30, 60, 90, 120, 150 |        |       |       |
| Analysis of Variance for %RSD, using Adjusted SS for Tests |       |          |                      |        |       |       |
| Source   | DF    | Seq SS   | Adj SS               | Adj MS | F     | P     |
| %DO  | 4     | 2345.22  | 2345.22              | 586.31 | 21.81 | 0.000 |
| Power  | 4     | 198.46   | 198.46               | 49.62  | 1.85  | 0.124 |
| Time   | 4     | 466.31   | 466.31               | 116.58 | 4.34  | 0.003 |
| %DO*Power  | 16    | 1269.13  | 1269.13              | 79.32  | 2.95  | 0.000 |
| %DO*Time   | 16    | 1973.02  | 1973.02              | 123.31 | 4.59  | 0.000 |
| Power*Time   | 16    | 1273.01  | 1273.01              | 79.56  | 2.96  | 0.000 |
| %DO*Power*Time   | 64    | 4706.50  | 4706.50              | 73.54  | 2.74  | 0.000 |
| Error  | 125   | 3359.62  | 3359.62              | 26.88  |       |       |
| Total  | 249   | 15591.27 |                      |        |       |       |
| S = 5.18430 R-Sq = 78.45% R-Sq(adj) = 57.08%               |       |          |                      |        |       |       |

ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %RSD

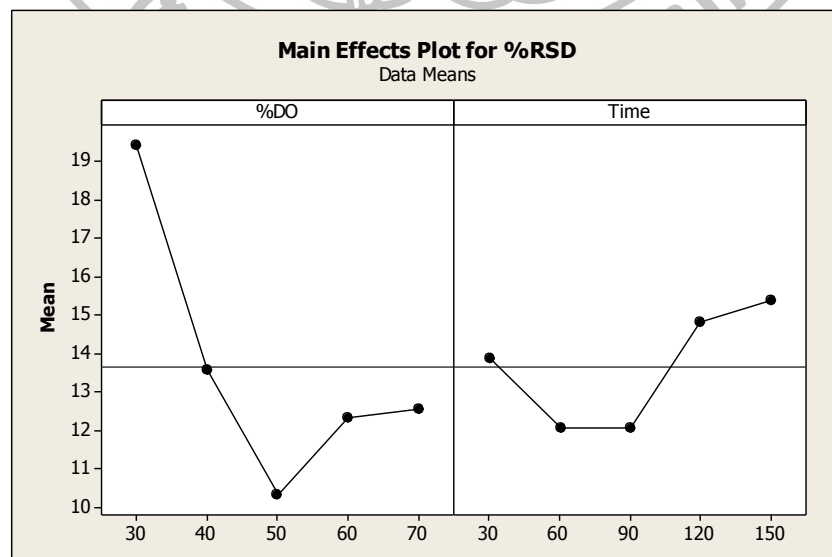
จากผลการวิเคราะห์ตามภาพที่ 4.18 พบว่าปัจจัยหลักคือ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน(A) และเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน (C) มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญดังแสดงได้ด้วยค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.05 ในขณะที่ปัจจัยหลักด้านกำลังอุตราโซนิกที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน(B) ไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-Value มีค่าสูงกว่า 0.05 ส่วนอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทั้งหมดมีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แต่เนื่องจากปัจจัยหลักด้านกำลังอุตราโซนิก ไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสนใจศึกษาเฉพาะอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของออกซิเจนกับเวลาในการสกัดซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า %RSD เท่านั้น





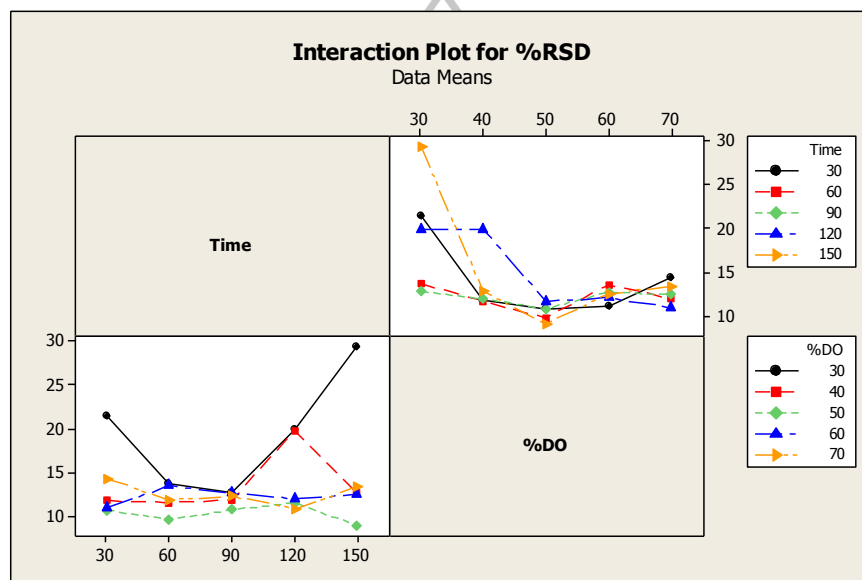
ภาพที่ 4.19 ส่วนตกค้างของค่า %RSD

ภาพที่ 4.19 (a) แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวเป็นปกติในแนวเส้นตรง และภาพที่ 4.19 (b) ฮิสโตแกรมก็มีลักษณะเช่นเดียวกันคือมีภาพที่ทรงเป็นระฆังคว่ำแสดงว่าค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวเป็นปกติ ส่วนภาพที่ 4.19 (c) เป็นกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าประมาณ(Fitted value) พบว่าการกระจายของค่าส่วนตกค้างเป็นรูปปากแตร แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างจะน้อย เมื่อค่าประมาณมีค่าต่ำ และความแปรปรวนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าประมาณมีค่ามากขึ้น และจากภาพที่ 4.19 (d) พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4.20 ผลของปัจจัยหลักต่อค่า %RSD

จากแผนภาพที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า %RSD ลดต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของออกซิเจนให้สูงขึ้นกว่า 50% พบว่าค่า %RSD จะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยค่าปริมาณของออกซิเจนที่ 50% จะให้ค่า %RSD ที่ต่ำที่สุดในขณะที่เวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนที่ 60 วินาที และ 90 วินาที ให้ให้ค่า %RSD ที่ต่ำที่สุดเช่นกัน แต่เวลาในการสกัดที่น้อยเกินไปหรือมากเกินไปจะส่งผลให้ค่า %RSD สูงขึ้น ซึ่งเวลาที่ 60 วินาที และ 90 วินาที มีผลต่อค่า %RSD ในระดับที่ใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 4.21 อันตรกิริยาของปริมาณของออกซิเจนกับเวลาในการสกัดที่มีผลต่อค่า %RSD

จากแผนภาพที่ 4.21 แสดงถึงผลของทั้งสองปัจจัยที่มีผลซึ่งกันและกันจากค่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อปริมาณของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า %RSD มีแนวโน้มที่ลดต่ำลงและมีค่าการกระจายของข้อมูลที่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของออกซิเจนให้มากกว่า 50% จะส่งผลให้ค่า %RSD สูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เวลาในการสกัดที่น้อยเกินไปหรือมากเกินไปจะส่งผลให้ค่า %RSD สูงขึ้นและมีค่าการกระจายของข้อมูลที่ลดสูงขึ้นเช่นกัน

#### 4.3.4 การหา % Contribution

ตารางที่ 4.5 % Contribution

| ปัจจัย             | Mean square | Contribution ratio | % Contribution |
|--------------------|-------------|--------------------|----------------|
| %DO                | 586.31      | 0.5290             | 52.90          |
| Power              | 49.62       | 0.0448             | 4.48           |
| Time               | 116.58      | 0.1052             | 10.52          |
| %DO * Power        | 79.32       | 0.0716             | 7.16           |
| %DO * Time         | 123.31      | 0.1113             | 11.13          |
| Power * Time       | 79.56       | 0.0718             | 7.18           |
| %DO * Power * Time | 73.54       | 0.0664             | 6.64           |
| ผลรวม              | 1,108.24    | 1.00               | 100.00         |

จากการหาค่า %Contribution ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกว่าปัจจัยใดมีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง (%RSD) มากหรือน้อยเพียงใด ดังตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณของออกซิเจนมีผลต่อค่า %RSD ที่ 52.90% ส่วนเวลาที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อค่า %RSD ที่ 10.52% และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของออกซิเจนกับเวลาที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อค่า %RSD ที่ 11.13% ดังนั้นการกำหนดและควบคุมค่าปริมาณของออกซิเจนและเวลาที่ใช้ในการสกัดจะส่งผลอย่างมากต่อค่า %RSD ของกระบวนการวัดค่า LPC

#### 4.3.5 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การหาสมการถดถอยเป็นการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD เพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในการปรับค่าปัจจัยที่ระดับต่างๆ ดังภาพที่ 4.22

### Response Surface Regression: %RSD versus %DO, Power, Time

Estimated Regression Coefficients for %RSD

| Term        | Coef    | SE Coef | T      | P     |
|-------------|---------|---------|--------|-------|
| Constant    | 10.6983 | 1.0289  | 10.397 | 0.000 |
| %DO         | -2.9835 | 0.6329  | -4.714 | 0.000 |
| Power       | -0.7389 | 0.6329  | -1.167 | 0.244 |
| Time        | 1.1525  | 0.6329  | 1.821  | 0.070 |
| %DO*%DO     | 4.9536  | 1.0698  | 4.630  | 0.000 |
| Power*Power | -1.1698 | 1.0698  | -1.093 | 0.275 |
| Time*Time   | 2.1114  | 1.0698  | 1.974  | 0.050 |
| %DO*Power   | 2.7930  | 0.8951  | 3.120  | 0.002 |
| %DO*Time    | -2.3450 | 0.8951  | -2.620 | 0.009 |
| Power*Time  | -1.0349 | 0.8951  | -1.156 | 0.249 |

S = 7.07628 PRESS = 13126.2

R-Sq = 22.92% R-Sq(pred) = 15.81% R-Sq(adj) = 20.03%

ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Response Surface (A)

จากภาพที่ 4.22 จะพบว่า มีปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลายปัจจัย ที่ไม่มีผลต่อสมการถดถอยอย่างมีนัยสำคัญจากค่า P-Value ที่มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงทำการตัดปัจจัยต่างๆดังกล่าวและทำการหาสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ได้ผลภาพที่ 4.23 , 4.24 , 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ

### Regression Analysis: %RSD versus %DO, Power, ...

The regression equation is

$$\begin{aligned} \%RSD = & 51.3 - 1.63 \%DO + 0.042 \text{ Power} + 0.0631 \text{ Time} + 0.0124 \%DO^2 \\ & - 0.00292 \text{ Power}^2 + 0.000586 \text{ Time}^2 + 0.00698 \%DO * \text{Power} \\ & - 0.00195 \%DO * \text{Time} - 0.000862 \text{ Power} * \text{Time} \end{aligned}$$

| Predictor  | Coef       | SE Coef   | T     | P     |
|------------|------------|-----------|-------|-------|
| Constant   | 51.32      | 14.28     | 3.60  | 0.000 |
| %DO        | -1.6307    | 0.3083    | -5.29 | 0.000 |
| Power      | 0.0425     | 0.3479    | 0.12  | 0.903 |
| Time       | 0.06309    | 0.07979   | 0.79  | 0.430 |
| %DO^2      | 0.012384   | 0.002675  | 4.63  | 0.000 |
| Power^2    | -0.002924  | 0.002675  | -1.09 | 0.275 |
| Time^2     | 0.0005865  | 0.0002972 | 1.97  | 0.050 |
| %DO*Power  | 0.006983   | 0.002238  | 3.12  | 0.002 |
| %DO*Time   | -0.0019542 | 0.0007459 | -2.62 | 0.009 |
| Power*Time | -0.0008624 | 0.0007459 | -1.16 | 0.249 |

S = 7.07628 R-Sq = 22.9%

R-Sq(adj) = 20.0%

ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 1 (B-1)

**Regression Analysis: %RSD versus %DO, Time, ...**

The regression equation is

$$\%RSD = 52.7 - 1.64 \%DO + 0.0620 \text{ Time} + 0.0124 \%DO^2 - 0.00262 \text{ Power}^2 + 0.000586 \text{ Time}^2 + 0.00707 \%DO * \text{Power} - 0.00195 \%DO * \text{Time} - 0.000845 \text{ Power} * \text{Time}$$

| Predictor          | Coef       | SE Coef   | T     | P     |
|--------------------|------------|-----------|-------|-------|
| Constant           | 52.728     | 8.445     | 6.24  | 0.000 |
| %DO                | -1.6359    | 0.3047    | -5.37 | 0.000 |
| Time               | 0.06204    | 0.07916   | 0.78  | 0.434 |
| %DO <sup>2</sup>   | 0.012384   | 0.002669  | 4.64  | 0.000 |
| Power <sup>2</sup> | -0.002623  | 0.001030  | -2.55 | 0.012 |
| Time <sup>2</sup>  | 0.0005865  | 0.0002966 | 1.98  | 0.049 |
| %DO*Power          | 0.007070   | 0.002115  | 3.34  | 0.001 |
| %DO*Time           | -0.0019542 | 0.0007444 | -2.63 | 0.009 |
| Power*Time         | -0.0008448 | 0.0007304 | -1.16 | 0.249 |

S = 7.06180 R-Sq = 22.9% R-Sq(adj) = 20.4%

ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 2 (B-2) (ตัดปัจจัยหลักด้านกำลังวัตต์)

**Regression Analysis: %RSD versus %DO, %DO<sup>2</sup>, ...**

The regression equation is

$$\%RSD = 55.8 - 1.66 \%DO + 0.0124 \%DO^2 - 0.00283 \text{ Power}^2 + 0.000743 \text{ Time}^2 + 0.00701 \%DO * \text{Power} - 0.00168 \%DO * \text{Time} - 0.000528 \text{ Power} * \text{Time}$$

| Predictor          | Coef       | SE Coef   | T     | P     |
|--------------------|------------|-----------|-------|-------|
| Constant           | 55.847     | 7.442     | 7.50  | 0.000 |
| %DO                | -1.6569    | 0.3032    | -5.46 | 0.000 |
| %DO <sup>2</sup>   | 0.012384   | 0.002667  | 4.64  | 0.000 |
| Power <sup>2</sup> | -0.0028333 | 0.0009938 | -2.85 | 0.005 |
| Time <sup>2</sup>  | 0.0007432  | 0.0002188 | 3.40  | 0.001 |
| %DO*Power          | 0.007009   | 0.002111  | 3.32  | 0.001 |
| %DO*Time           | -0.0016799 | 0.0006564 | -2.56 | 0.011 |
| Power*Time         | -0.0005279 | 0.0006078 | -0.87 | 0.386 |

S = 7.05617 R-Sq = 22.7% R-Sq(adj) = 20.5%

ภาพที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 3 (B-3) (ตัดปัจจัยหลักด้านเวลา)

**Regression Analysis: %RSD versus %DO, %DO<sup>2</sup>, ...**

The regression equation is

$$\%RSD = 55.5 - 1.63 \%DO + 0.0124 \%DO^2 - 0.00318 \text{ Power}^2 + 0.000628 \text{ Time}^2 + 0.00691 \%DO * \text{Power} - 0.00188 \%DO * \text{Time}$$

| Predictor          | Coef       | SE Coef   | T     | P     |
|--------------------|------------|-----------|-------|-------|
| Constant           | 55.469     | 7.426     | 7.47  | 0.000 |
| %DO                | -1.6326    | 0.3018    | -5.41 | 0.000 |
| %DO <sup>2</sup>   | 0.012384   | 0.002666  | 4.65  | 0.000 |
| Power <sup>2</sup> | -0.0031833 | 0.0009080 | -3.51 | 0.001 |
| Time <sup>2</sup>  | 0.0006278  | 0.0001738 | 3.61  | 0.000 |
| %DO*Power          | 0.006907   | 0.002107  | 3.28  | 0.001 |
| %DO*Time           | -0.0018818 | 0.0006136 | -3.07 | 0.002 |

S = 7.05260 R-Sq = 22.5% R-Sq(adj) = 20.6%

ภาพที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์การถดถอยด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 4 (B-4) (ตัดปัจจัยร่วมระหว่างกำลังวัตต์กับเวลา)

ตารางที่ 4.6 สมการถดถอย

| ลำดับ | รหัส | รูปแบบสมการถดถอย   | R-sq(adj) (%) |
|-------|------|--|---------------|
| 1     | A    | $10.6983 - 2.9835 \%DO - 0.7389 \text{ Power} + 1.1525 \text{ Time} + 4.9536$<br>$\%DO^2 - 1.1698 \text{ Power}^2 + 2.1114 \text{ Time}^2 + 2.793 \%DO * \text{Power} -$<br>$2.345 \%DO * \text{Time} - 1.0349 \text{ Power} * \text{Time}$    | 20.03         |
| 2     | B-1  | $51.3 - 1.63 \%DO + 0.042 \text{ Power} + 0.0631 \text{ Time} + 0.0124 \%DO^2 -$<br>$0.00292 \text{ Power}^2 + 0.000586 \text{ Time}^2 + 0.00698 \%DO * \text{Power} -$<br>$0.00195 \%DO * \text{Time} - 0.000862 \text{ Power} * \text{Time}$ | 20.0          |
| 3     | B-2  | $52.7 - 1.64 \%DO + 0.0620 \text{ Time} + 0.0124 \%DO^2 - 0.00262 \text{ Power}^2$<br>$+ 0.000586 \text{ Time}^2 + 0.00707 \%DO * \text{Power} - 0.00195 \%DO * \text{Time} -$<br>$0.000845 \text{ Power} * \text{Time}$                       | 20.4          |
| 4     | B-3  | $55.8 - 1.66 \%DO + 0.0124 \%DO^2 - 0.00283 \text{ Power}^2 + 0.000743$<br>$\text{Time}^2 + 0.00701 \%DO * \text{Power} - 0.00168 \%DO * \text{Time} - 0.000528$<br>$\text{Power} * \text{Time}$   | 20.5          |
| 5     | B-4  | $55.5 - 1.63 \%DO + 0.0124 \%DO^2 - 0.00318 \text{ Power}^2 + 0.000628$<br>$\text{Time}^2 + 0.00691 \%DO * \text{Power} - 0.00188 \%DO * \text{Time}$  | 20.6          |

หมายเหตุ : ทำการทดลองในช่วงปัจจัยดังต่อไปนี้

- ปริมาณออกซิเจนในน้ำ : 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์
- เวลาในการสกัด : 30 ถึง 150 วินาที
- กำลังวัตต์อัลตราโซนิค : 40 ถึง 80 วัตต์ต่อแกลลอน

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยในหลายรูปแบบดังแสดงตามตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq(adj)) พบว่าสมการถดถอยจากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Surface คือสมการ A มีค่า R-sq(adj) เท่ากับ 20.03% ดังภาพที่ 4.22 ในขณะที่สมการถดถอยจากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Regression Analysis ที่ให้ค่า R-sq(adj) สูงสุดคือสมการ B-4 ดังภาพที่ 4.26 โดยที่ค่า R-sq(adj) มีค่าเท่ากับ 20.6%

#### 4.3.6 การยืนยันผลการทดลอง

จากผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบทั้งหมด พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า %RSD ได้แก่ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อน โดยปริมาณของออกซิเจนที่ 50% ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยด้านเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนที่ปริมาณของออกซิเจนที่ 50% พบว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน จะให้ค่า %RSD ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถกำหนดปัจจัยหลักสำหรับใช้ในการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.7

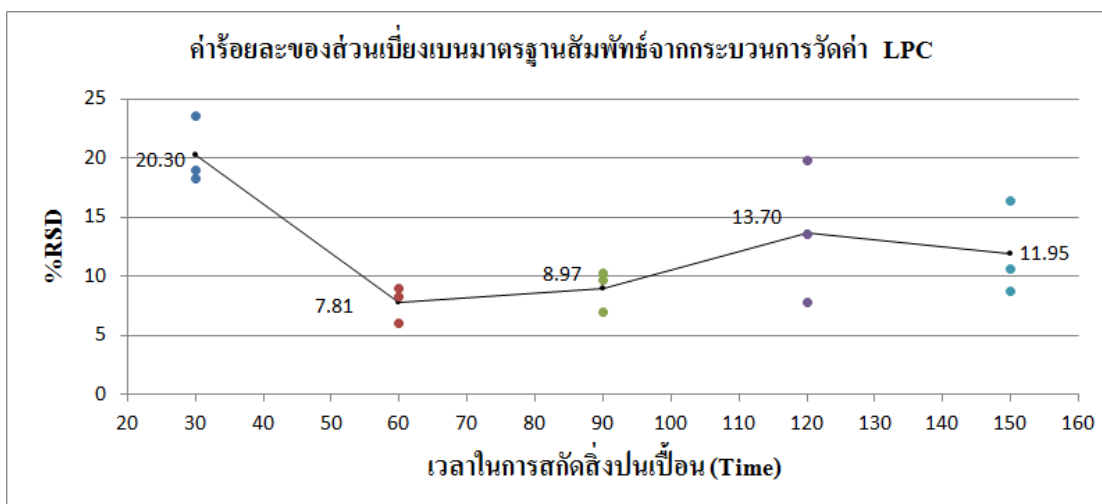
ตารางที่ 4.7 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง

| รหัส | ปัจจัย                        | ระดับปัจจัย              | หน่วย          |
|------|-------------------------------|--------------------------|----------------|
| A    | ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ        | 50                       | เปอร์เซ็นต์    |
| B    | กำลังวัตต์คลื่นอัลตราโซนิค    | 60                       | วัตต์ต่อแกลลอน |
| C    | ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน | 30 , 60 , 90 , 120 , 150 | วินาที         |

จากตารางที่ 4.7 สาเหตุที่ทำให้การเลือกปัจจัยด้านกำลังวัตต์คลื่นอัลตราโซนิคซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญที่ 60 วัตต์ต่อแกลลอน เนื่องมาจากเป็นกำลังวัตต์ที่ทางบริษัท ภูมิศึกษา ใช้อยู่เป็นปกติ จึงทำการเลือกใช้กำลังวัตต์ที่ค่าดังกล่าวเพื่อให้สะดวกในการปรับตั้งค่า และสะดวกในการปฏิบัติงานของพนักงาน โดยผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.27

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง

| เวลา (วินาที) | ค่า %RSD      |               |               |              |
|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|               | การทดลองที่ 1 | การทดลองที่ 2 | การทดลองที่ 3 | ค่าเฉลี่ย    |
| 30            | 19.03         | 23.61         | 18.25         | <b>20.30</b> |
| 60            | 6.09          | 8.29          | 9.03          | <b>7.81</b>  |
| 90            | 9.65          | 6.99          | 10.28         | <b>8.97</b>  |
| 120           | 19.74         | 13.62         | 7.75          | <b>13.70</b> |
| 150           | 10.66         | 16.42         | 8.77          | <b>11.95</b> |



ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนกับค่า %RSD

จากภาพที่ 4.27 พบว่าเวลาในการสกัดที่ 60 วินาที และ 90 วินาที ให้ค่า %RSD ที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำที่สุด เมื่อนำค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำในตารางที่ 4.8 มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของค่า %RSD (2-Sample t-Test) ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab 16 เพื่อหาความแตกต่างกันของค่า %RSD เมื่อใช้เวลาในการสกัดที่ 60 วินาที และ 90 วินาที โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ( $\alpha=0.05$ ) ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังภาพที่ 4.28

#### Two-Sample T-Test and CI: 60 วินาที, 90 วินาที

Two-sample T for 60 วินาที vs 90 วินาที

|           | N | Mean | StDev | SE Mean |
|-----------|---|------|-------|---------|
| 60 วินาที | 3 | 7.81 | 1.53  | 0.88    |
| 90 วินาที | 3 | 8.97 | 1.74  | 1.0     |

Difference =  $\mu$  (60 วินาที) -  $\mu$  (90 วินาที)

Estimate for difference: -1.17

95% CI for difference: (-4.88, 2.55)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0.87 P-Value = 0.433 DF = 4

Both use Pooled StDev = 1.6389

ภาพที่ 4.28 การวิเคราะห์ 2-Sample t ระหว่างค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำที่เวลาในการสกัด 60 วินาทีกับ 90 วินาที

จากการวิเคราะห์ค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำที่ 60 วินาทีกับ 90 วินาทีพบว่า ค่า %RSD เมื่อใช้เวลาในการสกัดที่ 60 วินาทีและ 90 วินาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4.28



ดังนั้นจึงสามารถสรุประดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการวัดค่า LPC ที่ส่งผลให้ค่า %RSD มีค่าต่ำที่สุดได้ดังตารางที่ 4.9 โดยให้ค่า %RSD เฉลี่ยเท่ากับ 7.81% ซึ่งลดลงจากค่า %RSD ในปัจจุบัน 20.68%

ตารางที่ 4.9 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองเฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

| ปัจจัย                        | ระดับปัจจัยที่เหมาะสม | หน่วย          |
|-------------------------------|-----------------------|----------------|
| ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ        | 50                    | เปอร์เซ็นต์    |
| กำลังวัตต์คลื่นอุลตราโซนิก    | 60                    | วัตต์ต่อแกลลอน |
| ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน | 60                    | วินาที         |

#### 4.3.7 การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย (Validating model)

การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอยที่สรุปได้จากการวิเคราะห์หาในหัวข้อ 4.3.5 โดยกำหนดช่วงปัจจัย A (ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ) ที่ 50% ปัจจัย B (กำลังวัตต์อุลตราโซนิก) ที่ 60 วัตต์ต่อแกลลอน และปัจจัย C (ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน) ที่ 30 วินาที – 150 วินาที โดยผลลัพธ์ของการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 แสดงผลลัพธ์การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย A

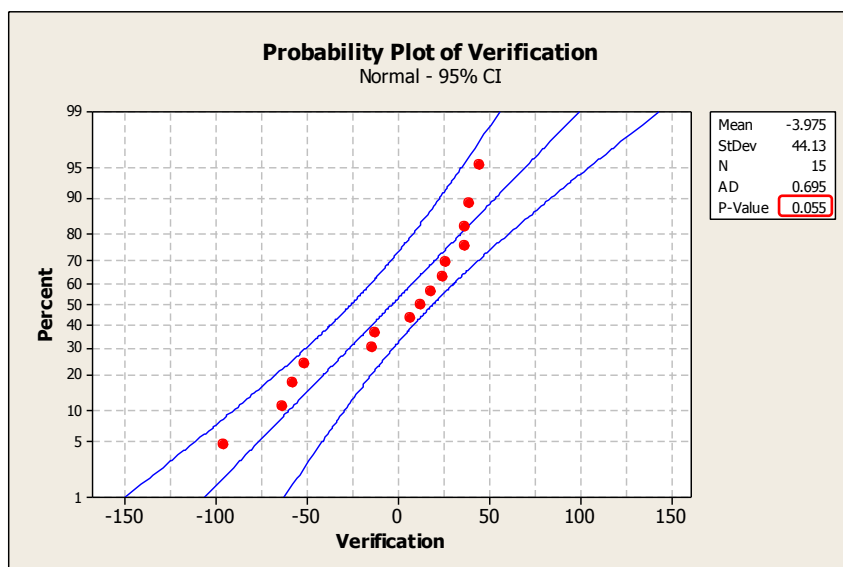
| การทดสอบ | ปริมาณออกซิเจน (A) (%) | เวลา (C) (วินาที) | ค่าพยากรณ์ | จำนวนครั้ง | ค่าที่ได้จากการทดลอง | ค่าส่วนต่าง | %ส่วนต่าง |
|----------|------------------------|-------------------|------------|------------|----------------------|-------------|-----------|
| 1        | 50                     | 30                | 12923.42   | 1          | 19.03                | 12904.39    | 99.85     |
|          |                        |                   |            | 2          | 23.61                | 12899.81    | 99.82     |
|          |                        |                   |            | 3          | 18.25                | 12905.18    | 99.86     |
| 2        | 50                     | 60                | 13278.46   | 1          | 6.09                 | 13272.37    | 99.95     |
|          |                        |                   |            | 2          | 8.29                 | 13270.17    | 99.94     |
|          |                        |                   |            | 3          | 9.03                 | 13269.43    | 99.93     |
| 3        | 50                     | 90                | 17434.01   | 1          | 9.65                 | 17424.37    | 99.94     |
|          |                        |                   |            | 2          | 6.99                 | 17427.02    | 99.96     |
|          |                        |                   |            | 3          | 10.28                | 17423.74    | 99.94     |

ตารางที่ 4.10 แสดงผลลัพธ์การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย A (ต่อ)

| การทดสอบ | ปริมาณออกซิเจน (A) (%) | เวลา (C) (วินาที) | ค่าพยากรณ์ | จำนวนครั้ง | ค่าที่ได้จากการทดลอง | ค่าส่วนต่าง | %ส่วนต่าง |
|----------|------------------------|-------------------|------------|------------|----------------------|-------------|-----------|
| 4        | 50                     | 120               | 25390.09   | 1          | 19.74                | 25370.35    | 99.92     |
|          |                        |                   |            | 2          | 13.62                | 25376.47    | 99.95     |
|          |                        |                   |            | 3          | 7.75                 | 25382.33    | 99.97     |
| 5        | 50                     | 150               | 37146.68   | 1          | 10.66                | 37136.02    | 99.97     |
|          |                        |                   |            | 2          | 16.42                | 37130.26    | 99.96     |
|          |                        |                   |            | 3          | 8.77                 | 37137.91    | 99.98     |

ตารางที่ 4.11 แสดงผลลัพธ์การทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย B-4

| การทดสอบ | ปริมาณออกซิเจน (A) (%) | เวลา (C) (วินาที) | ค่าพยากรณ์ | จำนวนครั้ง | ค่าที่ได้จากการทดลอง | ค่าส่วนต่าง | %ส่วนต่าง |
|----------|------------------------|-------------------|------------|------------|----------------------|-------------|-----------|
| 1        | 50                     | 30                | 12.03      | 1          | 19.03                | -7.00       | -58.22    |
|          |                        |                   |            | 2          | 23.61                | -11.59      | -96.34    |
|          |                        |                   |            | 3          | 18.25                | -6.22       | -51.71    |
| 2        | 50                     | 60                | 10.90      | 1          | 6.09                 | 4.81        | 44.11     |
|          |                        |                   |            | 2          | 8.29                 | 2.61        | 23.95     |
|          |                        |                   |            | 3          | 9.03                 | 1.87        | 17.16     |
| 3        | 50                     | 90                | 10.91      | 1          | 9.65                 | 1.26        | 11.58     |
|          |                        |                   |            | 2          | 6.99                 | 3.92        | 35.89     |
|          |                        |                   |            | 3          | 10.28                | 0.63        | 5.79      |
| 4        | 50                     | 120               | 12.05      | 1          | 19.74                | -7.69       | -63.86    |
|          |                        |                   |            | 2          | 13.62                | -1.57       | -13.04    |
|          |                        |                   |            | 3          | 7.75                 | 4.29        | 35.62     |
| 5        | 50                     | 150               | 14.31      | 1          | 10.66                | 3.65        | 25.49     |
|          |                        |                   |            | 2          | 16.42                | -2.11       | -14.76    |
|          |                        |                   |            | 3          | 8.77                 | 5.54        | 38.72     |



ภาพที่ 4.29 การกระจายตัวแบบปกติของค่าร้อยละส่วนต่างของสมการถดถอย B-4

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.10 แสดงถึงความแม่นยำของสมการถดถอย เมื่อพิจารณา ร้อยละส่วนต่างพบว่าผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยรวมมีค่าความผิดพลาดด้านสูง กว่าค่าพยากรณ์ที่มากถึง 99.98% และจากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.11 แสดงถึงความแม่นยำของ สมการถดถอย เมื่อพิจารณาร้อยละส่วนต่างพบว่าผลการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยรวม มีค่าความผิดพลาดทั้งด้านต่ำและด้านสูงกว่าค่าพยากรณ์ที่ไม่เกิน 96% ส่วนผลการวิเคราะห์การ กระจายตัวแบบปกติของค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างตามภาพที่ 4.29 พบว่าการกระจายตัวที่เป็นแบบปกติ จากค่า P-Value ที่มากกว่า 0.05

## บทที่ 5

### สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาแหล่งกำเนิดความแปรปรวนของกระบวนการวัดค่า LPC เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC ที่ทำให้ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่าค่า %RSD ในปัจจุบันเท่ากับ 28.49% และกระบวนการที่มีผลต่อค่า %RSD มีอยู่ 3 กระบวนการ ได้แก่ การชักสุมตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่องล้าง การสกัดอนุภาคปนเปื้อนออกจากชิ้นงานโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง และการตรวจวัดปริมาณอนุภาคโดยใช้เซ็นเซอร์ จากนั้นดำเนินการกำหนดขั้นตอนการวิจัยเป็น 3 ส่วน ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดของกระบวนการทดสอบค่า LPC

จุดประสงค์ในการทำการทดลองในขั้นตอนนี้เพื่อทำการค้นหาแหล่งที่มาของความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC ซึ่งได้ผลสรุปดังนี้

1. ผู้ปฏิบัติงานไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ แต่ชิ้นงานที่มาจากล็อตการผลิตที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการชักสุมตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่องล้างเพื่อเข้าสู่กระบวนการวัดค่า LPC มีผลต่อค่า %RSD
2. ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของระบบการวัด (%R&R) มีค่าเท่ากับ 1,176.26% ซึ่งสูงกว่า 30% แสดงให้เห็นว่าสาเหตุของความแปรผันในกระบวนการวัดค่า LPC ในปัจจุบันมาจากกระบวนการวัดเอง โดยต้องทำการค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC
3. ค่าความแปรผันเฉพาะตัว (%RSD) ของการตรวจวัดปริมาณอนุภาคด้วยเซ็นเซอร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.93%

##### 5.1.2 ผลการกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่างจากเครื่องล้างงาน

จุดประสงค์ในการทำการทดลองในขั้นตอนนี้เพื่อทำการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการชักสุมตัวอย่าง ที่ส่งผลให้ค่า %RSD มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งได้ผลสรุปดังนี้

1. ค่า %RSD จากการทดลองกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่าง มีค่าต่ำกว่าค่า %RSD จากการชักสุมในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ
2. ช่วงเวลาในการชักสุมตัวอย่างไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตำแหน่งในการชักสุมตัวอย่างจากตะกร้าล้างงานมีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ตำแหน่งงานที่ทำ

การชักลุ่มจากกลางตะกร้า จะให้ค่า %RSD ที่ต่ำที่สุดที่ 21.07% ซึ่งลดลงจากค่า %RSD ในปัจจุบัน 7.42%

### 5.1.3 ผลการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบของกระบวนการวัดค่า LPC

ในขั้นตอนนี้เป็นการค้นหาปัจจัยในกระบวนการวัดค่า LPC ที่ส่งผลต่อค่า %RSD โดยทำการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยทั้งสิ้น 3 ปัจจัยคือ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน กำลังอุตราโซนิกที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน และเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน และทำการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ 5 ระดับ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

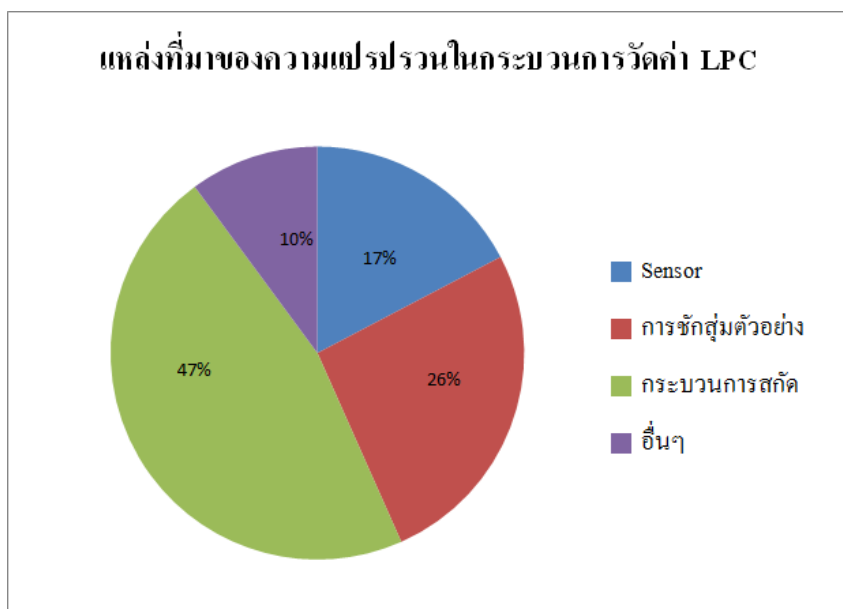
1. ปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานและเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานมีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ
2. สมการถดถอยที่สร้างขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อใช้ทำนายความสัมพันธ์ของระดับปัจจัยกับค่า %RSD มีค่า R-sq อยู่ที่ 20.10%
3. จากการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการวัดค่า LPC ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุดที่ 7.81% ซึ่งลดลงจากค่า %RSD ในปัจจุบัน 20.68%

ตารางที่ 5.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

| ปัจจัย                        | ระดับปัจจัยที่เหมาะสม | หน่วย       |
|-------------------------------|-----------------------|-------------|
| ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ        | 50                    | เปอร์เซ็นต์ |
| ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน | 60                    | วินาที      |

### 5.1.4 แหล่งที่มาของความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC

จากผลการทดลองพบว่าของความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC (%RSD) ในปัจจุบันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.49% ซึ่งมีแหล่งที่มาจากกระบวนการชักลุ่มตัวอย่าง กระบวนการสกัดอนุภาคปนเปื้อน กระบวนการอ่านค่าอนุภาคด้วยเซ็นเซอร์ และปัจจัยรบกวนภายนอกที่ไม่ได้ทำการศึกษา และสามารถคำนวณผลของแต่ละกระบวนการที่มีต่อค่าความแปรปรวน เป็นร้อยละ โดยเทียบกับค่า %RSD เฉลี่ยในปัจจุบันที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ร้อยละของผลกระทบของกระบวนการที่มีต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC

#### 5.1.5 ปัจจัยที่เหมาะสมในการวัดค่า LPC ที่ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุด

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถกำหนดระดับปัจจัยต่างๆ ทั้งในการชักสุมตัวอย่าง กระบวนการล้างงานด้วยคลื่นอุลตราโซนิก และกระบวนการทดสอบค่า LPC เพื่อให้ได้ค่า %RSD ต่ำที่สุดได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุด

| กระบวนการ                       | ปัจจัย                        | ระดับปัจจัย       | หน่วย          |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------|
| ชักสุมตัวอย่างจากเครื่องล้างงาน | ตำแหน่งการชักสุมตัวอย่าง      | กลางตะกร้าล้างงาน | -              |
| วัดค่า LPC                      | ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ        | 50                | เปอร์เซ็นต์    |
|                                 | กำลังวัตต์คลื่นอุลตราโซนิก    | 60                | วัตต์ต่อแกลลอน |
|                                 | ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน | 60                | วินาที         |

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

### 5.2.1 ปัจจัยที่มีผลในกระบวนการชักสุมตัวอย่างจากเครื่องล้างงาน

จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญในการชักสุมตัวอย่าง คือตำแหน่งของงานในตะกร้าล้าง โดยที่ตำแหน่งงานที่ทำการชักสุมมาจากตรงกลางตะกร้าล้าง จะให้ค่า %RSD ที่ต่ำกว่างานที่ทำการชักสุมมาจากริมตะกร้า เนื่องจากอาจเกิดการหักล้างกันของคลื่นอุลตราโซนิกจากด้านล่างและด้านข้างของถังล้างทำให้ประสิทธิภาพในการล้างงานด้วยคลื่นอุลตราโซนิกของงานที่อยู่ด้านริมตะกร้าที่ติดกับข้างถังล้างลดลง ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอนุภาคที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานได้ จึงส่งผลให้ค่า %RSD ของงานที่ชักสุมมาจากริมตะกร้าสูงกว่าชิ้นงานที่จากตรงกลางตะกร้าที่ได้รับการทำความสะอาดจากคลื่นอุลตราโซนิกจากด้านล่างของถังล้างเพียงทิศทางเดียว ทำให้มีความสม่ำเสมอของปริมาณอนุภาคที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานที่ดีกว่า

สาเหตุที่ทำให้เวลาในการชักสุมตัวอย่างไม่ส่งผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากในถังล้างงานด้วยคลื่นอุลตราโซนิก มีการใช้น้ำล้างงานที่มีการไหลเวียนในระบบปิดอยู่ตลอดเวลา ซึ่งน้ำล้างงานดังกล่าวได้มีการใช้ฟیلเตอร์เพื่อทำการกรองอนุภาคที่หลุดออกมาในขณะล้างงาน จึงส่งผลให้ไม่มีการสะสมของอนุภาคที่อยู่ในน้ำที่ใช้ล้างงาน ดังนั้นการล้างงานที่เวลาต่างกันจึงไม่ส่งผลให้ปริมาณอนุภาคในน้ำล้างงานแตกต่างกัน จึงไม่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของอนุภาคที่ตกค้างอยู่บนชิ้นงานเช่นกัน

### 5.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า %RSD ในกระบวนการวัดค่า LPC อย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ และระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน โดยจะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบนั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของนฤมล[8] ที่พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า %RSD ได้แก่ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ และระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน โดยปริมาณฟองอากาศในน้ำที่ 70% และเวลาที่ใช้สกัดสิ่งปนเปื้อนที่ 2 นาทีส่งผลให้ %RSD ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของออกซิเจนในน้ำเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้แรงดึงผิวของของเหลวลดลงทำให้เกิดฟองอากาศได้เพิ่มมากขึ้น[16] ซึ่งส่งผลให้เกิดกระบวนการคาวิเทชัน(Cavitation) ที่เป็นการเกิดและแตกของฟองอากาศขนาดเล็ก จำนวนมากอย่างรวดเร็วได้มากขึ้น ทำให้สามารถสกัดอนุภาคปนเปื้อนที่ตกค้างบนชิ้นงานออกมาได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่า LPC ที่วัดได้สม่ำเสมอมากขึ้น ค่า %RSD จึงลดลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน ให้มากขึ้นทำให้สามารถสกัดอนุภาคปนเปื้อนที่ตกค้างบนชิ้นงานออกมาได้มากขึ้นเช่นกัน ค่า LPC ที่วัดได้จึงมีความสม่ำเสมอและส่งผลให้ค่า

%RSD ต่ำลงเช่นกัน แต่หากใช้เวลาในการสกัดมากเกินไป จะเห็นว่าค่า %RSD มีแนวโน้มที่สูงขึ้น อาจเนื่องมาจากเนื้อวัสดุเกิดการหลุดออกมา ทำให้ค่า LPC ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ค่า %RSD สูงขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณออกซิเจนและเวลาซึ่งส่งผลกระทบต่อค่า %RSD กล่าวคือ ที่ปริมาณออกซิเจน 30% และ 40% จะได้ค่า %RSD ที่แตกต่างกันมากเมื่อใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน แต่เมื่อปริมาณออกซิเจนมีค่าตั้งแต่ 50% เป็นต้นไปจะพบว่าค่า %RSD ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนในน้ำที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของการเกิดควาวิชันในน้ำที่มีมากขึ้น จึงทำให้ค่า LPC ที่วัดได้สม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลให้ค่า %RSD ใกล้เคียงกันมากขึ้นแม้จะใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองจะเห็นว่าปัจจัยด้านกำลังอุตราโซนิกที่ใช้ในการสกัดสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน ไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการเลือกใช้กำลังอุตราโซนิกที่ 60 วัตต์ต่อแกลลอน ในการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองและกำหนดเป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากกำลังอุตราโซนิกดังกล่าว เป็นค่าที่ทาง โรงงานกรณีศึกษาใช้อยู่ในปัจจุบัน จึงทำให้มีความสะดวกในการปรับตั้งค่าดังกล่าว

จากการยืนยันผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ 50% เวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อนที่ให้ค่า %RSD ที่ต่ำที่สุดคือที่ 60 วินาที และ 90 วินาที โดยที่เวลาในการสกัดทั้งสองมีค่าการกระจายของข้อมูลที่ใกล้เคียงกันและมีค่า %RSD ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นทางในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกเวลาที่เหมาะสมที่ 60 วินาที เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการทดสอบทางด้านเวลา เนื่องจากหากใช้เวลาในการทดสอบที่น้อยลง จะทำให้สามารถทำการทดสอบได้มากขึ้นนั่นเอง

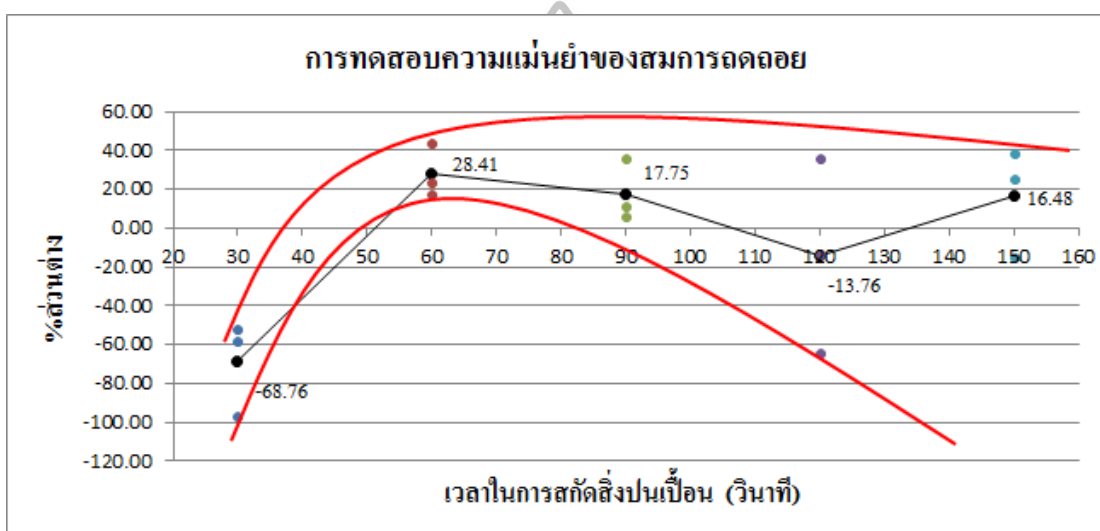
### 5.2.3 สมการถดถอย

สมการถดถอยที่วิเคราะห์ได้ฟังก์ชัน Response Surface (A) มีความแม่นยำในการพยากรณ์ค่า %RSD ที่ต่ำมาก จากการวิเคราะห์ค่าร้อยละส่วนต่างระหว่างค่าพยากรณ์กับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง โดยที่มีค่าร้อยละส่วนต่างต่ำที่สุดที่ 99.82% และสูงสุดที่ 99.98% ในขณะที่สมการถดถอยที่วิเคราะห์ได้ฟังก์ชัน Regression Analysis ครั้งที่ 4 (B-4) มีความแม่นยำในการพยากรณ์ค่า %RSD ที่สูงกว่าจากการวิเคราะห์ค่าร้อยละส่วนต่างระหว่างค่าพยากรณ์กับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง โดยที่มีค่าร้อยละส่วนต่างต่ำที่สุดที่ 5.79% และสูงสุดที่ 96.34%

สมการถดถอยที่วิเคราะห์ได้จากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ โดยใช้ฟังก์ชัน Regression Analysis (B-4) มีค่า R-square adjusted ที่ต่ำ ประเด็นนี้สามารถอธิบายได้จากข้อมูลร้อยละส่วนต่างของค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองเทียบกับค่า



%RSD ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการถดถอย ดังภาพที่ 5.2 จะเห็นว่าแนวโน้มการกระจายตัวของค่าร้อยละส่วนต่างของค่า %RSD เป็นรูปปีกผีเสื้อบานออกอย่างชัดเจน จะเห็นว่าข้อมูลมีจุดคอดที่สุด(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด) ที่เวลา 60 วินาที และจะเริ่มบานออกที่เวลา 90 วินาทีไปจนบานออกมากที่สุดที่เวลา 120 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยสามารถทำนายค่า %RSD ได้ อย่างแม่นยำในช่วงปัจจัยแคบๆเท่านั้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่า R-square adjusted ที่ได้จากสมการถดถอยมีค่าต่ำนั่นเอง



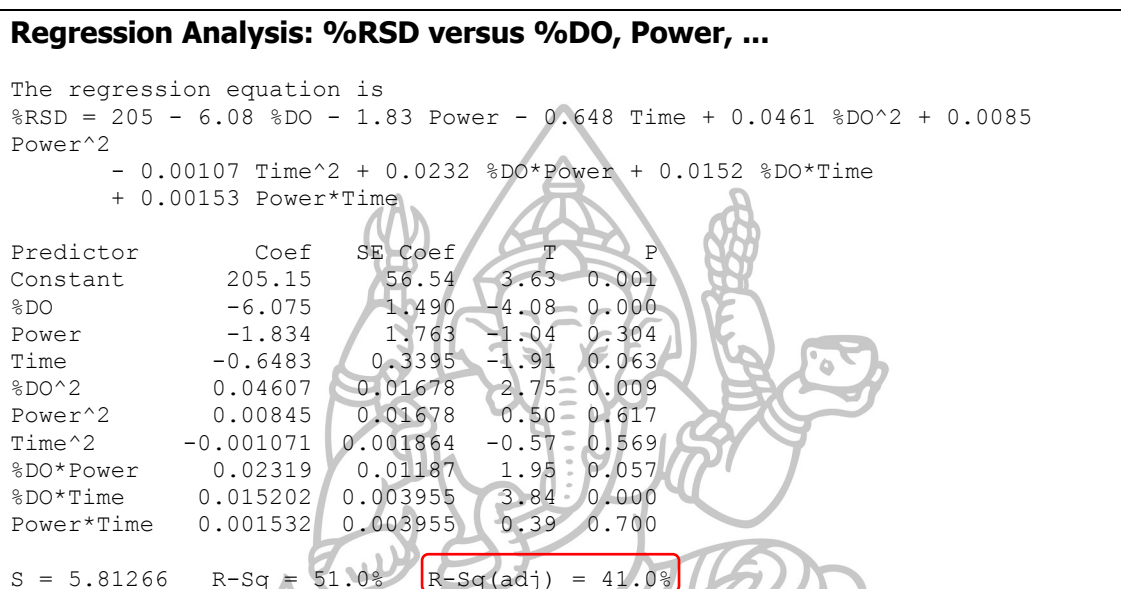
ภาพที่ 5.2 ร้อยละส่วนต่างของค่า %RSD ที่ได้จากการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองเทียบกับค่า %RSD ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการถดถอย

ตารางที่ 5.3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอย

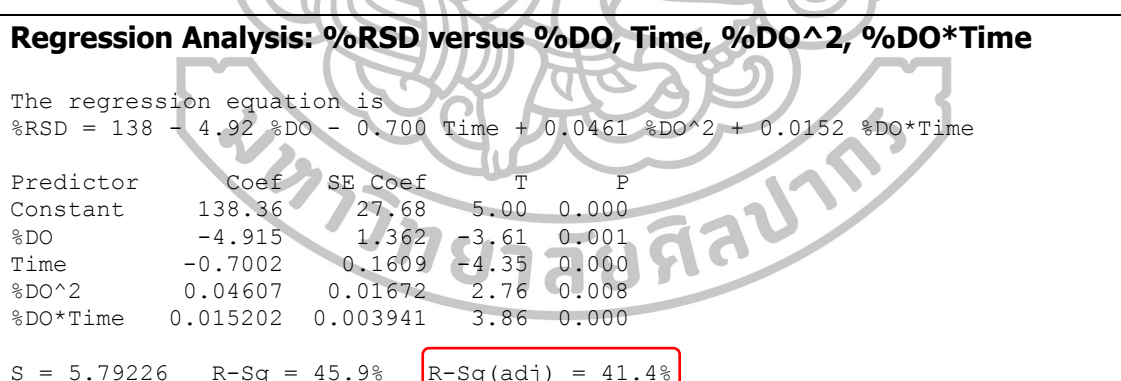
| รหัส | ปัจจัยที่ศึกษา                | ระดับปัจจัย |    |    | หน่วย          |
|------|-------------------------------|-------------|----|----|----------------|
|      |                               | 1           | 2  | 3  |                |
| A    | ปริมาณของออกซิเจนในน้ำ        | 30          | 40 | 50 | เปอร์เซ็นต์    |
| B    | กำลังวัตต์คลื่นอัลตราโซนิก    | 40          | 50 | 60 | วัตต์ต่อแกลลอน |
| C    | ระยะเวลาในการสกัดสิ่งปนเปื้อน | 30          | 60 | 90 | วินาที         |

เมื่อทดลองทำการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงปัจจัยที่แคบลงดังตารางที่ 5.3 พบว่าสมการถดถอยที่ได้จากข้อมูลในช่วงของปัจจัยที่แคบลง มีความสามารถทำนายค่า %RSD ได้แม่นยำมากขึ้น จะ

เห็นได้จากค่า R-square adjusted ที่เพิ่มสูงขึ้นจากเดิมที่มีค่าที่ 20.6% เป็น 41.0% ดังแสดงในภาพที่ 5.3 และเมื่อทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-Value มากกว่า 0.05) ออกจากการคำนวณหาสมการถดถอย พบว่าค่า R-sq(adj) มีค่าสูงขึ้นอีกเล็กน้อยที่ 41.4% ดังภาพที่ 5.4

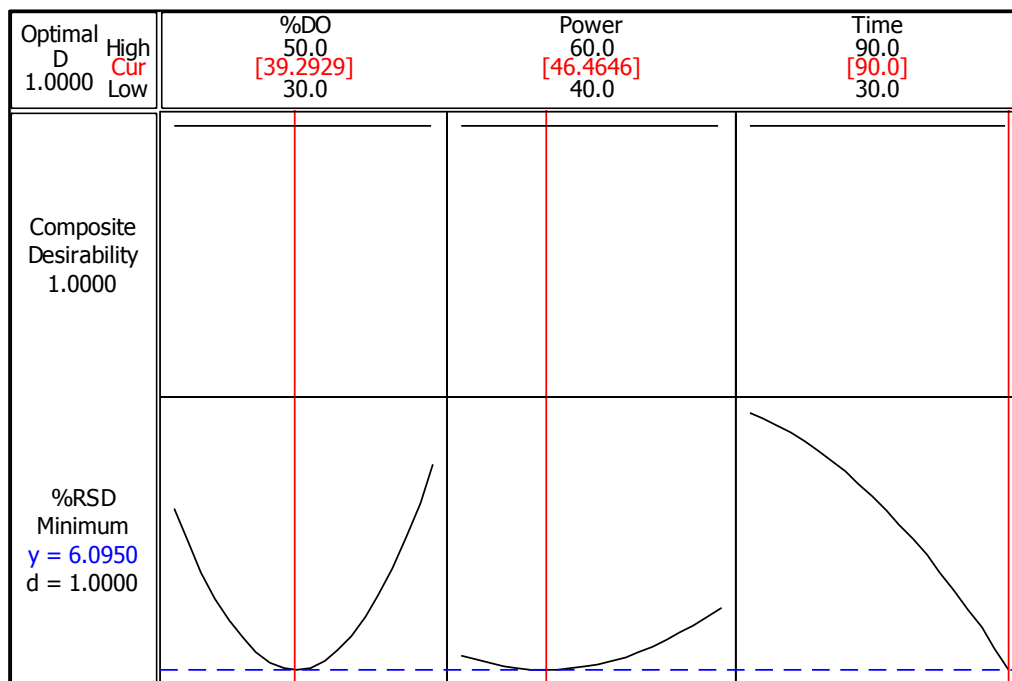


ภาพที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอย



ภาพที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์การถดถอย (ตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อค่า %RSD อย่างมีนัยสำคัญ)

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากช่วงปัจจัยที่แคบลงดังกล่าวด้วยฟังก์ชัน Response Optimization ดังภาพที่ 5.5 พบว่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้ค่า %RSD ต่ำที่สุดในช่วงปัจจัยดังตารางที่ 5.3 คือ ระดับออกซิเจนที่ 40% กำลังวัตต์ที่ 50 วัตต์ต่อแกลลอน และเวลาที่ 90 วินาที ซึ่งเป็นค่าปัจจัยที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ก่อนหน้าเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimization ของปัจจัย 3 ปัจจัยต่อค่า %RSD

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากยังไม่มีการวิจัยที่ทำการศึกษากับผลของค่าความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิก ที่ส่งผลต่อความแปรปรวนในกระบวนการวัดค่า LPC และในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องอุลตราโซนิกที่มีย่านความถี่ที่จำกัด จึงทำให้ไม่สามารถศึกษาผลของค่าความถี่ที่มีต่อค่า %RSD ได้ในหลายๆระดับ ดังนั้นการศึกษาย่านความถี่คลื่นอุลตราโซนิกที่หลากหลายมากกว่าจึงควรทำการศึกษาวิจัยต่อไป

2. ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในรุ่นที่ไม่ส่วนประกอบที่มีการเคลือบผิวด้วยทองที่ช่วยเพิ่มความสามารถด้านการนำไฟฟ้า โดยทางโรงงานกรณีศึกษายังมีผลิตภัณฑ์รุ่นที่มีการเคลือบผิวอีกหลายผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปจึงควรทำการศึกษาวิจัยผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วย

3. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการวัดค่า LPC ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ โดยใช้ชิ้นงานจากการกำหนดแผนการชักสุมตัวอย่าง ซึ่งได้มีการลดค่าความแปรปรวนมาบางส่วนแล้ว ทำให้ไม่เห็นความสัมพันธ์ของกระบวนการล้างและกระบวนการวัดค่า LPC อย่างชัดเจน ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้จึงควรจะมีขึ้นต่อไปในส่วนการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบของกระบวนการวัดค่า LPC โดยใช้ชิ้นงานจากกระบวนการผลิตปกติ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองกระบวนการ

### รายการอ้างอิง

- [1] จีราวุธ วารินทร์, สุทธิพันธุ์ แสนละเอียด. (2558). **ความรู้พื้นฐานของฮาร์ดดิสก์**. เข้าถึงเมื่อ 5 ตุลาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.rangforever.com/news.php?id=15>
- [2] S. Pojprapai , Z. Luo , R. Yimnirun. (2558). **Frequency effect on electrical fatigue behaviour of lead zirconate titanate ceramics**. เข้าถึงเมื่อ 26 ตุลาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.theiet.org/resources/journals/eletters/4817/sharp-memory.cfm>
- [3] ชีวพันธ์ อมรศรีสังข์. (2551). “การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดแขนจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ใช้เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] ชูชาติ อริจิตรานุสรณ์. (2544). **เครื่องมือวิทยาศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา
- [5] พงศกร เสือประเสริฐ. (2557). “การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการทำความสะอาดแผ่นเพลทสแตนเลสของชิ้นงานแขนจับหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีผลต่อค่าอนุภาคปนเปื้อนตกค้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [6] สันติ พุ่มกระจ่าง. (2552). “การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [7] มานะชัย รอดชื่น. (2558). **เทคนิคการชักตัวอย่างเบื้องต้น**. เข้าถึงเมื่อ 21 ตุลาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.manachai.cmustat.com/208272/chapter1.pdf>
- [8] นฤมล รอดกำเนิด. (2553). “การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความผันแปรในการทดสอบการวัดปริมาณสิ่งปนเปื้อน ในชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [9] นันทชัยญาน์ จารัตน์. (2554). “การลดปริมาณอนุภาคเปียร์โซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์ที่หลุดออกมาจากแขนจับหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้แนวทางซิกซ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [10] พงษ์ศักดิ์ โหลิมชยโชติกุล. (2551). “การสร้างแบบจำลองและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ใช้เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิคด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [11] วิชาสพล อ่อนสอาด. (2555). “การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยคลื่นอัลตราโซนิคในผลิตภัณฑ์ฐานรองรับชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [12] R. Vertrimurugan. (2012). "Optimization of Hard Disk Drive Heads Cleaning by Using Ultrasonic and Prevention of Its Damage," APCBEE Procedia 3: 222–230.
- [13] R. Vertrimurugan. (2014). "Ultrasonic and Megasonic Cleaning to Remove Nano-Dimensional Contaminants from Various Disk Drive Components", **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, Vol. 2, Issue 11.
- [14] ณัฐพล บัวอุไร.(2554). **เทคนิคการชักกลุ่มตัวอย่าง**. เข้าถึงเมื่อ 24 ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.nattapon.com/2011/05/random-sampling/>
- [15] บริษัทบีเคอาร์บิสซิเนสจำกัด.(2558). **การวิเคราะห์ระบบการวัด(Measurement System Analysis : MSA)**. เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม. เข้าถึงได้จาก <http://topofquality.com/smsa1/indexmsa1.html>
- [16] Joost Rooze and Team. (2012). "Dissolved gas and ultrasonic cavitation - A review", **Ultrasonic Sonochemistry**, เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม, บทความจากฐานข้อมูล วิทยาศาสตร์ Direct <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417712000910>





แสดงการเก็บข้อมูลค่า %RSD แบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 1            | 70          | 50 | 90  | 5.53   |
| 2            | 40          | 70 | 90  | 10.12  |
| 3            | 60          | 40 | 60  | 3.47   |
| 4            | 40          | 60 | 120 | 25.84  |
| 5            | 60          | 80 | 120 | 13.21  |
| 6            | 30          | 60 | 90  | 9.16   |
| 7            | 70          | 70 | 120 | 1.66   |
| 8            | 40          | 70 | 120 | 11.52  |
| 9            | 50          | 80 | 60  | 5.67   |
| 10           | 70          | 80 | 150 | 9.41   |
| 11           | 70          | 70 | 90  | 7.15   |
| 12           | 60          | 50 | 150 | 13.41  |
| 13           | 70          | 70 | 60  | 13.68  |
| 14           | 60          | 60 | 30  | 11.60  |
| 15           | 40          | 40 | 150 | 11.68  |
| 16           | 30          | 70 | 150 | 28.94  |
| 17           | 60          | 50 | 120 | 9.04   |
| 18           | 30          | 40 | 60  | 21.12  |
| 19           | 50          | 50 | 90  | 12.31  |
| 20           | 30          | 50 | 60  | 17.09  |
| 21           | 40          | 60 | 30  | 12.08  |
| 22           | 70          | 80 | 120 | 22.71  |
| 23           | 70          | 50 | 120 | 7.74   |
| 24           | 40          | 60 | 150 | 21.91  |
| 25           | 60          | 80 | 30  | 4.21   |
| 26           | 50          | 60 | 30  | 14.07  |



แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 27           | 70          | 60 | 150 | 9.94   |
| 28           | 50          | 50 | 60  | 10.60  |
| 29           | 60          | 70 | 90  | 15.57  |
| 30           | 50          | 60 | 30  | 8.55   |
| 31           | 70          | 70 | 60  | 11.71  |
| 32           | 30          | 60 | 30  | 23.96  |
| 33           | 40          | 70 | 60  | 5.11   |
| 34           | 40          | 70 | 60  | 5.23   |
| 35           | 50          | 70 | 150 | 2.99   |
| 36           | 50          | 70 | 60  | 9.90   |
| 37           | 30          | 70 | 120 | 12.10  |
| 38           | 50          | 60 | 150 | 20.37  |
| 39           | 30          | 50 | 30  | 25.96  |
| 40           | 50          | 80 | 120 | 5.33   |
| 41           | 30          | 60 | 150 | 41.75  |
| 42           | 30          | 50 | 90  | 9.20   |
| 43           | 60          | 40 | 150 | 15.10  |
| 44           | 60          | 80 | 60  | 8.92   |
| 45           | 70          | 70 | 30  | 2.39   |
| 46           | 50          | 50 | 150 | 3.00   |
| 47           | 50          | 50 | 60  | 19.21  |
| 48           | 60          | 50 | 60  | 7.90   |
| 49           | 40          | 70 | 150 | 17.46  |
| 50           | 40          | 50 | 150 | 11.46  |
| 51           | 60          | 50 | 60  | 21.82  |
| 52           | 60          | 50 | 30  | 7.00   |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 53           | 30          | 60 | 60  | 13.20  |
| 54           | 30          | 60 | 150 | 40.32  |
| 55           | 60          | 80 | 30  | 12.99  |
| 56           | 50          | 40 | 90  | 5.37   |
| 57           | 30          | 40 | 30  | 36.50  |
| 58           | 30          | 60 | 60  | 14.25  |
| 59           | 40          | 70 | 30  | 23.20  |
| 60           | 70          | 40 | 150 | 11.81  |
| 61           | 40          | 80 | 150 | 8.77   |
| 62           | 60          | 70 | 30  | 11.04  |
| 63           | 60          | 80 | 90  | 4.67   |
| 64           | 40          | 40 | 120 | 27.84  |
| 65           | 40          | 50 | 120 | 37.32  |
| 66           | 70          | 80 | 60  | 7.85   |
| 67           | 60          | 50 | 90  | 11.94  |
| 68           | 40          | 60 | 120 | 9.92   |
| 69           | 40          | 70 | 120 | 14.15  |
| 70           | 30          | 80 | 90  | 26.82  |
| 71           | 40          | 50 | 30  | 5.99   |
| 72           | 70          | 70 | 30  | 7.53   |
| 73           | 60          | 70 | 30  | 16.68  |
| 74           | 50          | 40 | 60  | 6.63   |
| 75           | 50          | 80 | 90  | 10.18  |
| 76           | 50          | 60 | 90  | 16.33  |
| 77           | 50          | 70 | 90  | 13.82  |
| 78           | 40          | 80 | 60  | 5.42   |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 79           | 40          | 40 | 30  | 2.64   |
| 80           | 60          | 40 | 90  | 12.30  |
| 81           | 70          | 60 | 60  | 14.79  |
| 82           | 70          | 50 | 30  | 8.89   |
| 83           | 60          | 70 | 90  | 16.81  |
| 84           | 70          | 60 | 120 | 5.38   |
| 85           | 30          | 50 | 150 | 22.97  |
| 86           | 40          | 80 | 150 | 4.07   |
| 87           | 70          | 80 | 60  | 13.16  |
| 88           | 50          | 40 | 30  | 15.19  |
| 89           | 60          | 50 | 120 | 9.32   |
| 90           | 50          | 40 | 30  | 12.84  |
| 91           | 40          | 70 | 30  | 33.03  |
| 92           | 40          | 80 | 60  | 18.83  |
| 93           | 70          | 70 | 150 | 9.48   |
| 94           | 40          | 60 | 90  | 11.52  |
| 95           | 70          | 60 | 120 | 15.84  |
| 96           | 50          | 40 | 90  | 13.09  |
| 97           | 60          | 60 | 120 | 7.14   |
| 98           | 50          | 40 | 120 | 15.98  |
| 99           | 40          | 40 | 90  | 17.00  |
| 100          | 70          | 40 | 60  | 8.49   |
| 101          | 50          | 70 | 30  | 16.70  |
| 102          | 60          | 60 | 30  | 17.11  |
| 103          | 30          | 70 | 150 | 28.55  |
| 104          | 70          | 80 | 90  | 37.08  |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 105          | 40          | 40 | 30  | 2.94   |
| 106          | 30          | 70 | 60  | 12.30  |
| 107          | 60          | 70 | 150 | 10.30  |
| 108          | 30          | 70 | 30  | 12.81  |
| 109          | 30          | 50 | 30  | 36.41  |
| 110          | 70          | 60 | 90  | 12.94  |
| 111          | 40          | 40 | 90  | 8.53   |
| 112          | 50          | 50 | 150 | 5.23   |
| 113          | 40          | 50 | 90  | 8.14   |
| 114          | 70          | 40 | 60  | 13.75  |
| 115          | 60          | 60 | 90  | 9.61   |
| 116          | 50          | 70 | 90  | 10.67  |
| 117          | 70          | 40 | 30  | 2.76   |
| 118          | 40          | 40 | 150 | 3.41   |
| 119          | 60          | 40 | 90  | 10.67  |
| 120          | 70          | 60 | 30  | 32.82  |
| 121          | 30          | 70 | 120 | 8.35   |
| 122          | 70          | 80 | 120 | 12.82  |
| 123          | 40          | 80 | 120 | 8.06   |
| 124          | 50          | 70 | 120 | 11.85  |
| 125          | 30          | 60 | 120 | 20.08  |
| 126          | 30          | 70 | 60  | 18.84  |
| 127          | 50          | 70 | 30  | 6.76   |
| 128          | 50          | 40 | 60  | 3.38   |
| 129          | 50          | 70 | 60  | 4.80   |
| 130          | 30          | 50 | 60  | 14.08  |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 131          | 40          | 60 | 60  | 20.93  |
| 132          | 60          | 60 | 150 | 5.25   |
| 133          | 30          | 40 | 90  | 9.54   |
| 134          | 70          | 50 | 150 | 26.50  |
| 135          | 50          | 80 | 90  | 9.12   |
| 136          | 30          | 60 | 90  | 4.01   |
| 137          | 40          | 60 | 60  | 20.74  |
| 138          | 60          | 60 | 60  | 26.08  |
| 139          | 70          | 40 | 120 | 18.67  |
| 140          | 70          | 50 | 30  | 19.48  |
| 141          | 30          | 80 | 30  | 17.60  |
| 142          | 30          | 80 | 150 | 19.68  |
| 143          | 30          | 70 | 90  | 15.78  |
| 144          | 70          | 80 | 30  | 17.57  |
| 145          | 30          | 40 | 150 | 35.33  |
| 146          | 50          | 40 | 150 | 17.10  |
| 147          | 70          | 80 | 90  | 17.52  |
| 148          | 30          | 80 | 90  | 12.30  |
| 149          | 30          | 70 | 30  | 3.27   |
| 150          | 30          | 50 | 150 | 23.72  |
| 151          | 70          | 50 | 150 | 12.80  |
| 152          | 40          | 40 | 120 | 17.89  |
| 153          | 60          | 70 | 120 | 14.60  |
| 154          | 40          | 70 | 150 | 15.71  |
| 155          | 50          | 60 | 150 | 6.61   |
| 156          | 70          | 50 | 120 | 11.66  |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 157          | 70          | 70 | 90  | 8.90   |
| 158          | 70          | 40 | 120 | 6.04   |
| 159          | 40          | 50 | 150 | 16.44  |
| 160          | 60          | 80 | 90  | 22.15  |
| 161          | 30          | 80 | 60  | 1.60   |
| 162          | 30          | 80 | 60  | 8.87   |
| 163          | 70          | 40 | 90  | 13.53  |
| 164          | 40          | 80 | 90  | 11.52  |
| 165          | 30          | 40 | 120 | 24.52  |
| 166          | 50          | 70 | 150 | 12.43  |
| 167          | 50          | 50 | 120 | 7.16   |
| 168          | 60          | 40 | 150 | 15.20  |
| 169          | 70          | 40 | 150 | 17.16  |
| 170          | 70          | 40 | 90  | 3.30   |
| 171          | 30          | 80 | 30  | 10.06  |
| 172          | 60          | 60 | 120 | 15.71  |
| 173          | 70          | 80 | 150 | 8.10   |
| 174          | 70          | 70 | 120 | 6.10   |
| 175          | 40          | 80 | 30  | 14.88  |
| 176          | 60          | 40 | 120 | 16.12  |
| 177          | 60          | 50 | 30  | 6.94   |
| 178          | 70          | 50 | 90  | 11.56  |
| 179          | 50          | 60 | 120 | 12.43  |
| 180          | 30          | 40 | 30  | 25.67  |
| 181          | 40          | 60 | 150 | 16.25  |
| 182          | 50          | 40 | 120 | 14.73  |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 183          | 30          | 80 | 120 | 14.42  |
| 184          | 30          | 80 | 150 | 21.91  |
| 185          | 60          | 40 | 30  | 9.79   |
| 186          | 50          | 60 | 60  | 9.09   |
| 187          | 60          | 60 | 150 | 10.00  |
| 188          | 50          | 50 | 90  | 4.90   |
| 189          | 50          | 50 | 30  | 15.52  |
| 190          | 50          | 70 | 120 | 13.85  |
| 191          | 70          | 40 | 30  | 10.64  |
| 192          | 30          | 50 | 120 | 35.42  |
| 193          | 50          | 80 | 150 | 5.84   |
| 194          | 40          | 50 | 30  | 9.10   |
| 195          | 60          | 60 | 60  | 9.90   |
| 196          | 70          | 60 | 60  | 3.47   |
| 197          | 60          | 70 | 60  | 9.10   |
| 198          | 50          | 80 | 120 | 12.73  |
| 199          | 50          | 60 | 120 | 13.03  |
| 200          | 60          | 50 | 150 | 6.05   |
| 201          | 60          | 70 | 120 | 13.90  |
| 202          | 70          | 70 | 150 | 16.40  |
| 203          | 40          | 60 | 90  | 10.01  |
| 204          | 30          | 80 | 120 | 7.34   |
| 205          | 60          | 80 | 150 | 15.79  |
| 206          | 30          | 40 | 120 | 23.56  |
| 207          | 70          | 50 | 60  | 18.48  |
| 208          | 70          | 60 | 150 | 11.84  |

แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 209          | 30          | 50 | 90  | 10.65  |
| 210          | 60          | 50 | 90  | 13.23  |
| 211          | 30          | 40 | 90  | 10.59  |
| 212          | 50          | 80 | 150 | 9.68   |
| 213          | 60          | 40 | 60  | 10.54  |
| 214          | 30          | 50 | 120 | 25.30  |
| 215          | 70          | 60 | 90  | 6.10   |
| 216          | 30          | 40 | 60  | 15.46  |
| 217          | 70          | 80 | 30  | 25.82  |
| 218          | 60          | 70 | 60  | 21.56  |
| 219          | 40          | 80 | 30  | 11.40  |
| 220          | 30          | 60 | 30  | 21.92  |
| 221          | 50          | 50 | 30  | 5.57   |
| 222          | 40          | 50 | 60  | 8.37   |
| 223          | 50          | 60 | 60  | 19.83  |
| 224          | 50          | 50 | 120 | 8.70   |
| 225          | 40          | 50 | 120 | 37.17  |
| 226          | 40          | 40 | 60  | 10.98  |
| 227          | 30          | 70 | 90  | 19.19  |
| 228          | 40          | 40 | 60  | 16.00  |
| 229          | 60          | 80 | 150 | 24.84  |
| 230          | 40          | 50 | 90  | 6.14   |
| 231          | 40          | 80 | 120 | 8.47   |
| 232          | 50          | 60 | 90  | 11.93  |
| 233          | 60          | 70 | 150 | 8.89   |
| 234          | 50          | 40 | 150 | 6.71   |



แสดงการเก็บข้อมูลค่า LPC แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (ต่อ)

| Run<br>Order | ระดับปัจจัย |    |     | ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์<br>(%RSD) |
|--------------|-------------|----|-----|--|
|              | A           | B  | C   |  |
| 235          | 40          | 60 | 30  | 3.00   |
| 236          | 70          | 60 | 30  | 15.71  |
| 237          | 60          | 80 | 60  | 15.79  |
| 238          | 60          | 40 | 30  | 12.45  |
| 239          | 50          | 80 | 30  | 5.86   |
| 240          | 40          | 80 | 90  | 19.38  |
| 241          | 50          | 80 | 60  | 7.69   |
| 242          | 50          | 80 | 30  | 6.35   |
| 243          | 40          | 70 | 90  | 16.56  |
| 244          | 60          | 40 | 120 | 16.70  |
| 245          | 60          | 60 | 90  | 9.62   |
| 246          | 30          | 40 | 150 | 29.90  |
| 247          | 70          | 50 | 60  | 13.75  |
| 248          | 40          | 50 | 60  | 4.57   |
| 249          | 30          | 60 | 120 | 27.84  |
| 250          | 60          | 80 | 120 | 4.41   |



แสดงหลักฐานการเข้าร่วมการประชุมวิชาการเพื่อการพัฒนาตนเอง

| ปีการศึกษา | วันที่              | งานประชุมวิชาการ           | หลักฐานการเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ   |
|------------|---------------------|----------------------------|--|
| 2556       | 16 - 18 ตุลาคม 2556 | IE Network conference 2013 |    |
| 2557       | 12 พฤษภาคม 2558     | CIOD 2015                  |    |
|            | 12 สิงหาคม 2558     | 8th ATRANS SYMPOSIUM       |   |
| 2558       | 7 - 8 กรกฎาคม 2559  | IE Network conference 2016 |  |

แสดงหลักฐานการเข้าร่วมการประชุมวิชาการเพื่อการพัฒนาตนเอง (ต่อ)

| ปีการศึกษา | วันที่              | งานประชุมวิชาการ           | ชื่อบุคคลที่ทำความรู้จัก | สถานะการเข้าร่วมงาน      | อ้างอิง  |
|------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| 2556       | 16 - 18 ตุลาคม 2556 | IE Network conference 2013 | ศุภฤติ บุญธรรม           | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : oke_kmitl@hotmail.com                           |
|            |                     |                            | ธีรวัชร แก้วเปี้ย        | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : kaewpia_t@hotmail.com                           |
|            |                     |                            | มลธิรัตน์ แซ่อึ้ง        | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : saeong_m@hotmail.com                            |
| 2557       | 12 พฤษภาคม 2558     | CIOD 2015                  | ธนพล นันตา               | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : tanapon.nunta@gmail.com                         |
|            |                     |                            | จิรพงศ์ ศิริเลิศ         | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : sjirapong11@gmail.com                           |
|            |                     |                            | มนตรี ทลาคจิตร์          | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : montreelfc@yahoo.com                            |
|            | 12 สิงหาคม 2558     | 8th ATRANS SIMPOSIUM       | ศรายุทธ จุลแก้ว          | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : sarayut.j@psu.ac.th<br>Tel. : 083-685-6889      |
|            |                     |                            | นฤพล นิยม                | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : Naruphol@outlook.com<br>Tel. : 083-183-4629     |
|            |                     |                            | วุฒิชัย ไชยยะ            | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : wutichaichaiya@gmail.com<br>Tel. : 089-047-3136 |
| 2558       | 7 - 8 กรกฎาคม 2559  | IE Network conference 2016 | ชนนาล กฤตวรกาญจน์        | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : chonnanath.krit@gmail.com                       |
|            |                     |                            | บัญชา อริยะจรรยา         | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : bancha@buu.ac.th                                |
|            |                     |                            | วรวิรี สัมฤตจิวณิชชา     | เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย | E-mail : warawee.sum@mail.kmutt.ac.th                    |



## ประวัติผู้วิจัย

|                    |  |
|--------------------|--|
| ชื่อ – สกุล        | พิศพงษ์ นิลธำรงกุล   |
| ที่อยู่            | 9/46 ม.11 ซอยบรมราชชนนี105 ถนนบรมราชชนนี แขวงศาลา<br>ธรรมสพน์ เขตทวีวัฒนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| ที่ทำงาน           | บริษัทแมกเนคคอมพ์ ฟริชชั่น เทคโนโลยี จำกัด   |
| ประวัติการศึกษา    |  |
| พ.ศ. 2542          | จบปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์<br>มหาวิทยาลัยศิลปากร                  |
| ประวัติการทำงาน    |  |
| พ.ศ.2555 - 2558    | บริษัทอูทามากิ(ประเทศไทย) จำกัด  |
| พ.ศ.2558- ปัจจุบัน | บริษัทแมกเนคคอมพ์ ฟริชชั่น เทคโนโลยี จำกัด   |

