บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 คัดเลือกปัจจัยของกระบวนการชุบ

การคัดเลือกปัจจัยของกระบวนการชุบเพื่อนำมานำการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปนั้น ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะได้ทำการนำข้อมูลประวัติการผลิตที่ผ่านมา มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลการทดลอง ข้อมูลการใช้งาน และข้อมูลการประเมินต่าง ๆ ที่มีอยู่ก่อนหน้า โดยนำมาสร้างสมมติฐานทางสถิติเพื่อตรวจสอบ โดยครั้งนี้จะนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลาสซับสเตรทเปรียบเทียบกับปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการ โดยจะตั้งสมมติฐานการตรวจสอบด้วย Student t-Test หรือ ANOVA

ปัจจัยของกระบวนการชุบที่สามารถตรวจสอบประวัติการผลิต การทดลอง และสามารถนำมาตรวจสอบสมมติฐานได้มีดังนี้

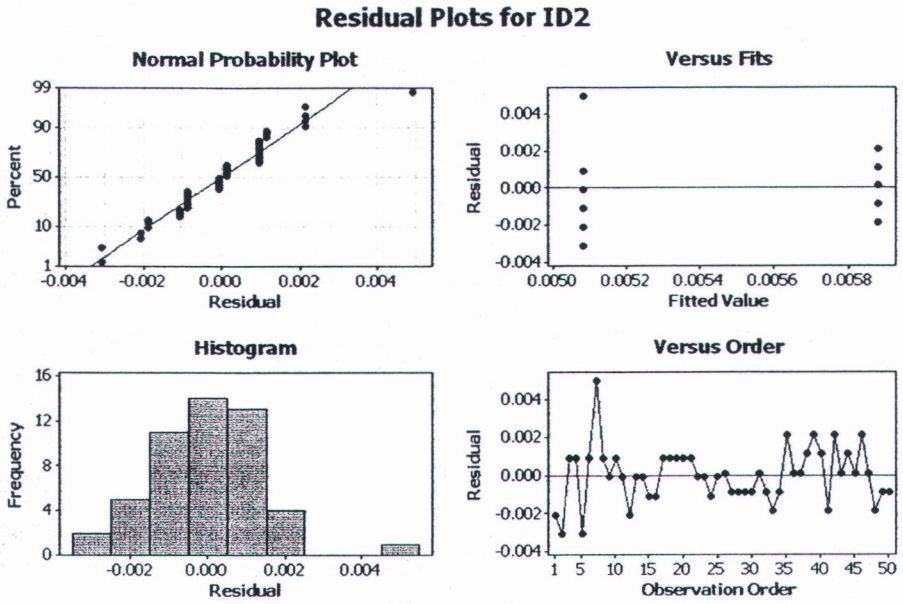
1. ตัวแปร B ในการชุบแข็ง
2. ตัวแปร C ในการชุบแข็ง
3. ตัวแปร D ในการชุบแข็ง

ตรวจสอบสมมติฐานที่ 1 ว่าตัวแปร C ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่

H_0: ที่ตัวแปร C ค่าที่ต่างกัน <u>ไม่มี</u>ความแตกต่างเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด

H_1: ที่ตัวแปร C ค่าที่ต่างกัน <u>มี</u>ความแตกต่างเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด

การตรวจสอบสมติฐานข้างต้น ผู้ศึกษาได้นำข้อมูลการปรับเปลี่ยนตัวแปร C ในการชุบแข็งมาทำการตรวจสอบความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทด้วยวิธีการ One-way ANOVA ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2



รูป 4.1 Residual plot ของการตรวจสอบสมมติฐานว่าตัวแปร C มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่โดยใช้ ANOVA

การตรวจสอบความเป็นธรรมชาติของข้อมูลที่นำมาตรวจสอบสมติฐานด้วยการวิเคราะห์จาก Residual plot พบว่าข้อมูลนำมาตรวจสอบสมมติฐานนั้นเป็นข้อมูลที่นำมาตรวจสอบได้จริง เนื่องจากลักษณะของ Residual plot มีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ศูนย์ มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน และมีความแปรปรวนที่คงที่

จากตารางการกระจายแบบ F จุดวิกฤตของการกระจายแบบ $F_{0.05,1,48}$ ได้ค่าของจุดวิกฤตอยู่ที่ 4.08 ซึ่งจากข้อมูลที่นำมาทำการตรวจสอบสมมติฐานนั้น เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบ ANOVA โดยพิจารณาค่า F ของข้อมูลที่ได้จากสัดส่วนของผลกระทบกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Mean Square Effect) ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Mean Square Error) นั้นมีค่าเท่ากับ 3.75 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ซึ่งมีค่า p-Value อยู่ที่ 0.059 ดังแสดงในรูป 4.2 ซึ่งจากความเชื่อมั่นที่ 95% นั้นจะสรุปได้ว่า ตัวแปร C ในการชุบแข็งนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของซับสเตรทอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาจากค่า p-Value ที่ 0.059 แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปร C ในการชุบแข็งนั้นเกือบจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

ของขนาดซับสเตรท ดังนั้นผู้วิจัยจะนำปัจจัยเรื่องตัวแปร C มาทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยร่วมต่อไป

One-way ANOVA: ID2 versus Factor C

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor C	1	0.0000080	0.0000080	3.75	0.059
Error	48	0.0001025	0.0000021		
Total	49	0.0001105			

S = 0.001461 R-Sq = 7.24% R-Sq(adj) = 5.31%

Level	N	Mean	StDev
Setting 1	25	0.005080	0.001631
Setting 2	25	0.005880	0.001269

```
                Individual 99% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level           --------+---------+---------+---------+-
Setting 1       (------------*------------)
Setting 2                   (------------*------------)
                --------+---------+---------+---------+-
                      0.00480   0.00540   0.00600   0.00660
```

Pooled StDev = 0.001461

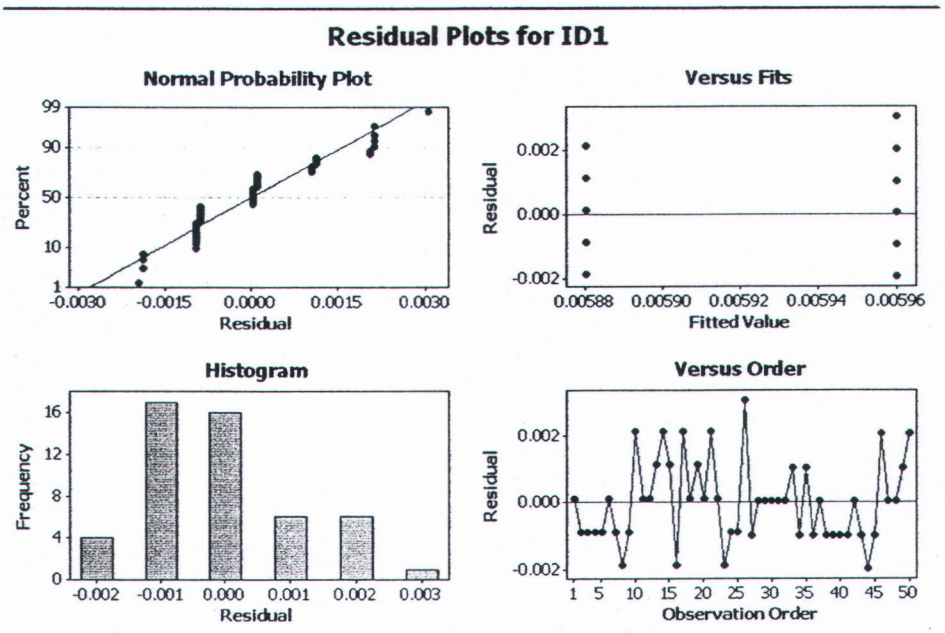
รูป 4.2 ผลการตรวจสอบสมมติฐานว่าตัวแปร C มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่โดยใช้ ANOVA

ตรวจสอบสมมติฐานที่ 2 ว่า ตัวแปร B ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่

H_0: ที่ตัวแปร B ในการชุบค่าที่ต่างกัน <u>ไม่มี</u>ความแตกต่างเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด

H_1: ที่ตัวแปร B ในการชุบค่าที่ต่างกัน <u>มี</u>ความแตกต่างเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด

การตรวจสอบสมติฐานข้างต้น ผู้ศึกษาได้นำข้อมูลการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร B ในการชุบแข็งมาทำการตรวจสอบความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทด้วยวิธีการ One-way ANOVA ซึ่งได้ผลดังรูป 4.3 และ 4.4



รูป 4.3 Residual plot ของการตรวจสอบสมมติฐานว่าตัวแปร B ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่โดยใช้ ANOVA

การตรวจสอบความเป็นธรรมชาติของข้อมูลที่นำมาตรวจสอบสมติฐานด้วยการวิเคราะห์จาก Residual Plot พบว่าข้อมูลนำมาตรวจสอบสมมติฐานนั้นเป็นข้อมูลที่นำมาตรวจสอบได้จริง เนื่องจากลักษณะของ Residual มีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ศูนย์ มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน และ มีความแปรปรวนที่คงที่

จากตารางการกระจายแบบ F จุดวิกฤตของการกระจายแบบ $F_{0.05,1,48}$ ได้ค่าของจุดวิกฤตอยู่ที่ 4.08 ซึ่งจากข้อมูลที่นำมาทำการตรวจสอบสมมติฐานนั้น เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบ ANOVA โดยพิจารณาค่า F ของข้อมูลที่ได้จากสัดส่วนของผลกระทบกำลังสองของค่าเฉลี่ย(Mean Square Effect) ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Mean Square Error) นั้นมีค่าเท่ากับ 0.05 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ซึ่งมีค่า p-Value อยู่ที่ 0.818 ซึ่งจากความเชื่อมั่นที่ 95% นั้นจะสรุปได้ว่า ตัวแปร B ในการชุบแข็งนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของซับสเตรทอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่ผู้วิจัยจะนำปัจจัยเรื่องตัวแปร B มาทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยร่วมต่อไป

One-way ANOVA: ID1 versus Factor B

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor B	1	0.0000001	0.0000001	0.05	0.818
Error	48	0.0000716	0.0000015		
Total	49	0.0000717			

S = 0.001221 R-Sq = 0.11% R-Sq(adj) = 0.00%

Level	N	Mean	StDev
Setting 1	25	0.005880	0.001269
Setting 2	25	0.005960	0.001172

```
                Individual 99% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level            -+---------+---------+---------+--------
Setting 1        (-------------------*-------------------)
Setting 2           (-----------------*-------------------)
                 -+---------+---------+---------+--------
                0.00525   0.00560   0.00595   0.00630
```

Pooled StDev = 0.001221

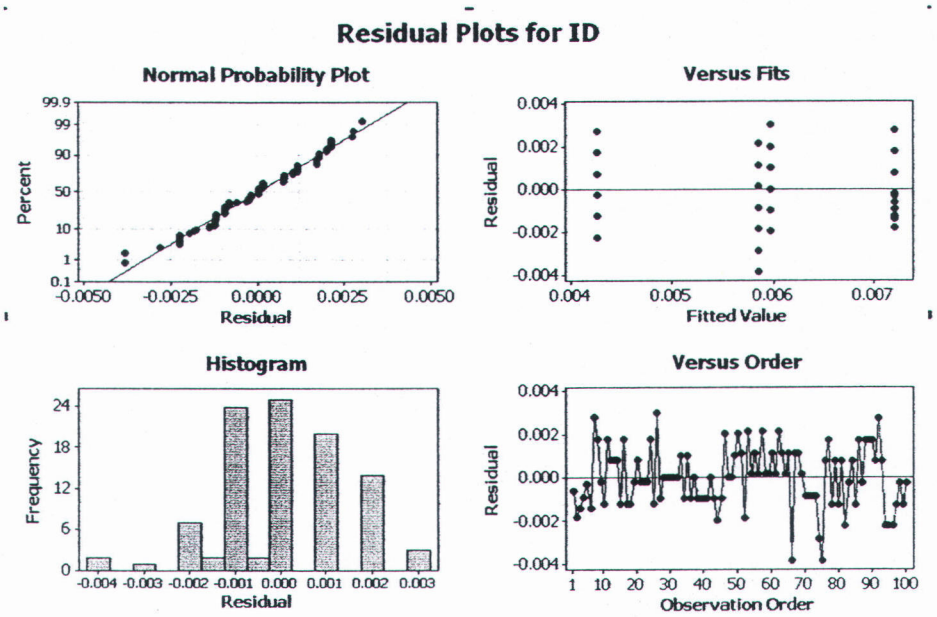
รูป 4.4 ผลการตรวจสอบสมมติฐานว่าตัวแปร B ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่โดยใช้ ANOVA

ตรวจสอบสมมติฐานที่ 3 ว่าตัวแปร D ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่

H_0: ที่ตัวแปร D ที่ค่าต่าง ๆกัน <u>ไม่มี</u>ความแตกต่างเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด

H_1: ที่ตัวแปร D ที่ค่าต่าง ๆกัน <u>มี</u>ความแตกต่างเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด

การตรวจสอบสมติฐานข้างต้น ผู้ศึกษาได้นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร D ในการชุบมาทำการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทด้วยวิธีการ One-way ANOVA ซึ่งได้ผลดังรูป 4.5 และ 4.6



รูป 4.5 Residual plot ของการตรวจสอบสมมติฐานว่าตัวแปร D ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่โดยใช้ ANOVA

จากตารางการกระจายแบบ F จุดวิกฤตของการกระจายแบบ $F_{0.05.3.96}$ ได้ค่าของจุดวิกฤตอยู่ที่ 2.68 ซึ่งจากข้อมูลที่นำมาทำการตรวจสอบสมมติฐานนั้น เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบ ANOVA โดยพิจารณาค่า F ของข้อมูลที่ได้จากสัดส่วนของผลกระทบกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Mean Square Effect) ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Mean Square Error) นั้นมีค่าเท่ากับ 18.13 ซึ่งสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ซึ่งมีค่า p-Value อยู่ที่ 0.00 ซึ่งจากความเชื่อมั่นที่ 95% นั้นจะสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร D ในการชุบนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของซับสเตรทอย่างมีนัยยะสำคัญ

One-way ANOVA: ID versus Factor D

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor D	3	0.0001099	0.0000366	18.13	0.000
Error	96	0.0001941	0.0000020		
Total	99	0.0003040			

S = 0.001422 R-Sq = 36.16% R-Sq(adj) = 34.17%

```
                                   Individual 99% CIs For Mean Based on
                                   Pooled StDev
Level        N      Mean     StDev  -+---------+---------+---------+--------
Setting 1   25  0.007192  0.001278                          (-----*-----)
Setting 2   25  0.005960  0.001172                 (------*-----)
Setting 3   25  0.005840  0.001675                (------*-----)
Setting 4   25  0.004240  0.001508   (-----*------)
                                    -+---------+---------+---------+--------
                                   0.0036    0.0048    0.0060    0.0072

Pooled StDev = 0.001422
```

รูป 4.6 การตรวจสอบสมมติฐานว่าตัวแปร D ในการชุบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรทหรือไม่โดยใช้ ANOVA

จากการตรวจสอบความสัมพันธ์ของปัจจัยการผลิตต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแก้ว โดยใช้ข้อมูลประวัติการใช้งาน (Historical Data) โดยใช้วิธีการตรวจสอบสมมติฐาน ด้วย ANOVA หรือ two sample t-Test พบว่า

- ตัวแปร D ในการชุบ <u>มี</u>ผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ p-Value = 0.000
- ตัวแปร B ในการชุบ <u>ไม่มี</u>ผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ p-value = 0.818
- ตัวแปร C ในการชุบ เหมือนจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ p-value = 0.059

และเพื่อตรวจสอบอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัย ผู้วิจัยจึงได้นำปัจจัยการผลิตที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ของกระบวนการชุบแข็ง มาทำการศึกษาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ 2^4 โดยคัดเลือกปัจจัยการผลิตดังนี้คือ

1) ตัวแปร A ในการชุบแข็ง

2) ตัวแปร B ในการชุบแข็ง

3) ตัวแปร C ในการชุบแข็ง

4) ตัวแปร D ในการชุบแข็ง (ซึ่งปัจจุบันใช้เป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของสารชุบแข็ง)

4.2 ออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูป 2^4

นำปัจจัยของกระบวนการชุบที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางดิสค์ และที่สามารถทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ มาทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูป 2^4 โดยใช้ Minitab ver.15

ในขั้นตอนนี้จะนำปัจจัยที่ตรวจสอบทั้งหมดทั้งที่มีอิทธิพลและไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาสซับสเตรทมาทำการวางแผนการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูป ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้นำปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัยคือ ปัจจัย A ปัจจัย B ปัจจัย C และปัจจัย D ในการชุบแข็ง มาทำการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูป 2^4 ดังนั้นจำนวนเงื่อนไขในการทดลองจะมีทั้งหมด 2^4 การทดลอง หรือทั้งหมด 16 การทดลอง และเพื่อป้องกันผลกระทบจากความต่อเนื่องทางธรรมชาติของข้อมูลจึงจะทำการทดลองปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองแบบสุ่ม

ซึ่งแต่ละปัจจัยการผลิตที่ถูกเลือกมาทำการออกแบบการทดลองนั้น จะนำค่าปรับตั้งต่ำสุดและค่าปรับตั้งสูงสุด มาทำการระบุในโปรแกรม Minitab เพื่อทำการระบุเงื่อนไขในการทดลองที่แตกต่างกันออกไป และครอบคลุมทุก ๆ เงื่อนไขการผลิตที่สามารถเป็นไปได้จากปัจจัยการผลิตที่มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ซึ่งสามารถแสดงตารางการทดลองได้ดังนี้

ในที่นี้ เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย ผู้วิจัยจะปรับเปลี่ยนค่าปรับตั้งแต่ละปัจจัยให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน หรือ Coded unit เพื่อป้องกันความสับสน หรือควาแตกต่างของหน่วยที่แตกต่างกันของแต่ละปัจจัย ดังตาราง 4.1 โดยให้ ค่าปรับตั้งต่ำสุด คือ (-1) และให้ ค่าปรับตั้งสูงสุด คือ (+1) หรือ (1)

ค่าปรับตั้งสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละปัจจัยเป็นดังนี้

1) ปัจจัย A ในการชุบแข็ง

ค่าปรับตั้งสูงสุดเท่ากับ ระดับที่ 5 (+1)

ค่าปรับตั้งต่ำสุดเท่ากับ ระดับที่ 1 (-1)

2) ปัจจัย B ในการชุบแข็ง

ค่าปรับตั้งสูงสุดเท่ากับ ระดับที่ 5 (+1)

ค่าปรับตั้งต่ำสุดเท่ากับ ระดับที่ 1 (-1)

3) ปัจจัย C ในการชุบแข็ง

ค่าปรับตั้งสูงสุดเท่ากับ ระดับที่ 5 (+1)

ค่าปรับตั้งต่ำสุดเท่ากับ ระดับที่ 1 (-1)

4) ปัจจัย D ในการชุบแข็ง

ค่าปรับตั้งสูงสุดเท่ากับ ระดับที่ 5 (+1)

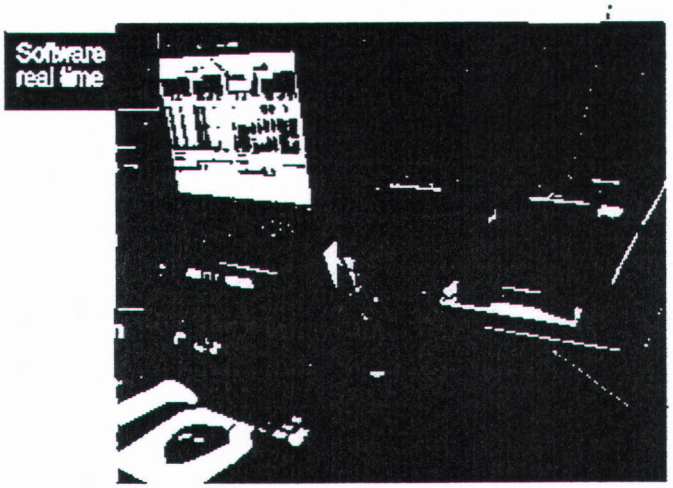
ค่าปรับตั้งต่ำสุดเท่ากับ ระดับที่ 1 (-1)

ตาราง 4.1 แสดงเงื่อนไขทั้งหมดในการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูป 2^4 แบบสุ่ม

ลำดับมาตรฐาน	ลำดับการทดลอง	จุดกึ่งกลาง	บล็อกที่	ตัวแปร A	ตัวแปร B	ตัวแปร C	ตัวแปร D
2	1	1	1	1	-1	-1	-1
8	2	1	1	1	1	1	-1
12	3	1	1	1	1	-1	1
1	4	1	1	-1	-1	-1	-1
3	5	1	1	-1	1	-1	-1
16	6	1	1	1	1	1	1
4	7	1	1	1	1	-1	-1
14	8	1	1	1	-1	1	1
5	9	1	1	-1	-1	1	-1
7	10	1	1	-1	1	1	-1
9	11	1	1	-1	-1	-1	1
11	12	1	1	-1	1	-1	1
6	13	1	1	1	-1	1	-1
13	14	1	1	-1	-1	1	1
15	15	1	1	-1	1	1	1
10	16	1	1	1	-1	-1	1

4.3 ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนดแบบสุ่ม

การบันทึกผลการทดลองขนาดการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางกลาสซับสเตรทคือผลต่างระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาสซับสเตรทหลังการชุบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาสซับสเตรทก่อนการชุบ ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเลเซอร์ ดังรูป 4.7



รูป 4.7 ภาพเทียบเคียง เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูย์กลางซับสเตรท

ผลการทดลองได้ค่าความเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทซึ่งได้ค่าเฉลี่ยความเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากเงื่อนไขการทดลองเงื่อนไขละ 25 ข้อมูลดังแสดงผลตามตาราง 4.2

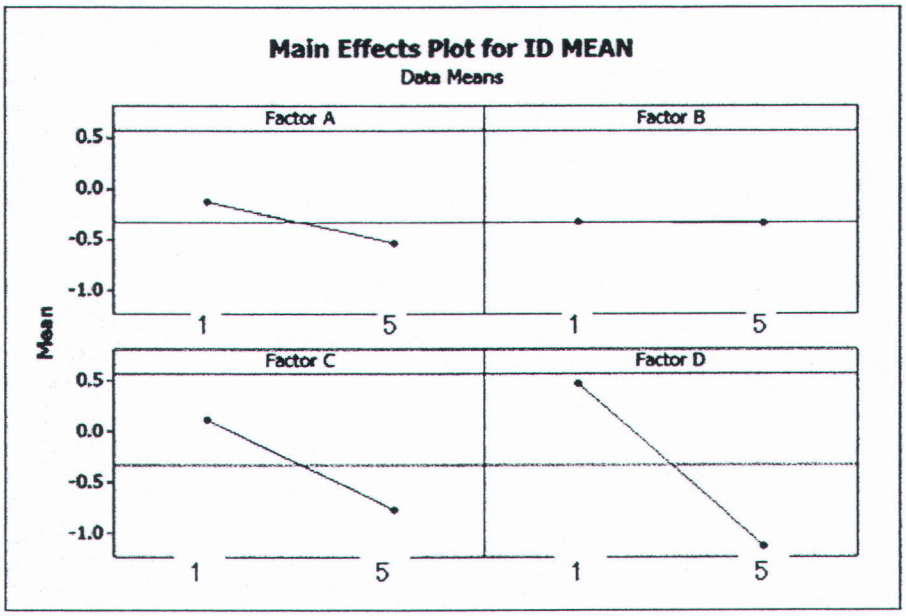
$\triangle$ID = ขนาดแก้วหลังชุบ – ขนาดแก้วก่อนชุบ

ตาราง 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	ตัวแปร A	ตัวแปร B	ตัวแปร C	ตัวแปร D	ปริมาณขนาดที่เปลี่ยน
2	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.04
8	2	1	1	1	1	1	-1	0.76
12	3	1	1	1	1	-1	1	-0.68
1	4	1	1	-1	-1	-1	-1	0.48
3	5	1	1	-1	1	-1	-1	0.68
16	6	1	1	1	1	1	1	-2.8
4	7	1	1	1	1	-1	-1	0.52
14	8	1	1	1	-1	1	1	-1.6
5	9	1	1	-1	-1	1	-1	0.12
7	10	1	1	-1	1	1	-1	1.24
9	11	1	1	-1	-1	-1	1	0.4
11	12	1	1	-1	1	-1	1	-0.08
6	13	1	1	1	-1	1	-1	-0.08
13	14	1	1	-1	-1	1	1	-1.56
15	15	1	1	-1	1	1	1	-2.32
10	16	1	1	1	-1	-1	1	-0.4

4.4 ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยร่วม

ทำการตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยร่วมแบบคร่าว ๆ โดยการทำสร้างกราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) และกราฟอิทธิพลร่วม (Interaction Plot) โดยตรวจสอบดูว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของการชุบแข็งใดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกลาสซับสเตรท



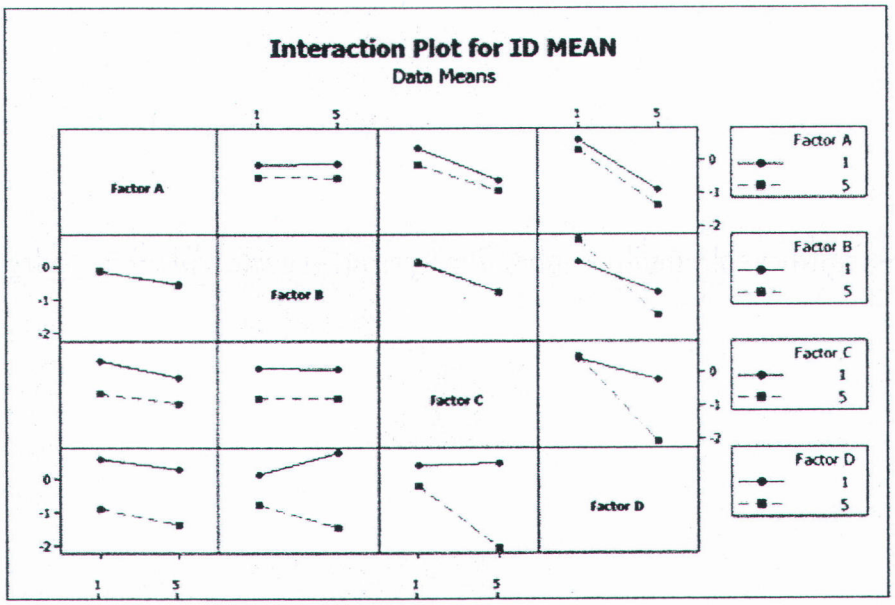
รูป 4.8 กราฟแสดง Main Effect Plot ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท

จากรูป 4.8 จะเห็นได้ว่า ปัจจัย D ในการชุบ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดโดยกราฟแสดงให้เห็นว่าที่ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ปัจจัย D ที่ค่าระดับที่ 1 นั้นมีค่าที่ต่างจากค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ปัจจัย D ที่ค่าระดับที่ 5 มากที่สุด รองลงมาคือตัวแปร C ในการชุบแข็ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ปัจจัย C ที่ค่าระดับที่ 1 นั้นมีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ปัจจัย C ที่ค่าระดับที่ 5 รองลงมา ถัดมาคือปัจจัย A ในการชุบแข็งซึ่งค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ปัจจัย A ที่ค่าระดับที่ 1 และ ระดับที่ 5 น้อยที่สุด โดยที่ปัจจัย B ในการชุบแข็งที่ค่าระดับที่ 1 และค่าระดับที่ 5 นั้น ไม่พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทเลย

จากรูป 4.9 จะเห็นได้ว่า ระหว่างปัจจัย D ในการชุบกับปัจจัย Bในการชุบแข็งนั้นมีอิทธิพลร่วมกันอยู่ เนื่องจาก ณ ที่ปัจจัย D ที่ค่าระดับที่ 1 นั้น การเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทที่ปัจจัย B ในการชุบแข็งที่ค่าระดับที่ 5 นั้นจะมีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทมากกว่ากว่าปัจจัย B ในการชุบแข็งที่ค่าระดับที่ 1 แต่เมื่อปัจจัย D เปลี่ยนแปลงไปเป็นที่ค่าระดับที่ 5 นั้น การเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทที่ปัจจัย B ในการชุบที่ค่าระดับที่ 1 และค่าระดับที่ 5 กลับให้ผลออกมาตรงกันข้าม คือปัจจัย B ในการชุบแข็งที่ระดับที่ 5 มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดซับ

สเตรทที่น้อยกว่าปัจจัย B ในการชุบแข็งที่ค่าระดับที่ 1 เช่นเดียวกัน ผู้วิจัยก็ตรวจสอบพบอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัย D ในการชุบแข็ง และปัจจัย C ในการชุบแข็ง กล่าวคือ ที่ปัจจัย D ที่ค่าระดับที่ 1 นั้น ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับเสตรทระหว่างปัจจัย C ในการชุบแข็งที่ค่าระดับที่ 1 และค่าระดับที่ 5 นั้น ให้ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่เท่ากัน แต่เมื่อปัจจัย D ในการชุบแข็งเปลี่ยนไปเป็นที่ค่าระดับที่ 5 นั้น ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ปัจจัย C ระดับที่ 1 จะมีระดับการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าปัจจัย C ในการชุบแข็งที่ค่าระดับที่ 5

ส่วนอิทธิพลร่วมของปัจจัยคู่อื่น ๆ นั้นเห็นได้ว่ามีผลน้อยมาก แต่จำเป็นที่จะต้องนำไปตรวจสอบสมมติฐานด้วยวิธีการ Student t-Test อีกครั้งหนึ่งเพื่อตรวจสอบนัยยะความสำคัญของอิทธิพลร่วมแบบ 2, 3 และ 4 ปัจจัย



รูป 4.9 กราฟแสดงอันตรกิริยาร่วมของแต่ละปัจจัย

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล

ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล(Analyze Factorial Design) เพื่อตรวจสอบนัยยะสำคัญของอิทธิพลของแต่ละตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยร่วม โดยขั้นตอนนี้สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบระดับความรุนแรงของอิทธิพล (Effect) ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมโดยตรงได้ เพราะเป็นการวิเคราะห์แบบใส่รหัส หรือ Coded Units โดยที่ระดับความรุนแรงของอิทธิพลของปัจจัยใดที่มีตัวเลขค่าสมบูรณ์ (Absolute) ที่มากที่สุด คือปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดซับสเตรทมากที่สุด

Factorial Fit: ID MEAN versus Factor A, Factor B, Factor C, Factor D

Estimated Effects and Coefficients for ID MEAN (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		-0.3300
Factor A	-0.4000	-0.2000
Factor B	-0.0100	-0.0050
Factor C	-0.9000	-0.4500
Factor D	-1.6000	-0.8000
Factor A*Factor B	-0.0300	-0.0150
Factor A*Factor C	0.1000	0.0500
Factor A*Factor D	-0.0800	-0.0400
Factor B*Factor C	0.0100	0.0050
Factor B*Factor D	-0.6700	-0.3350
Factor C*Factor D	-0.9800	-0.4900
Factor A*Factor B*Factor C	-0.1500	-0.0750
Factor A*Factor B*Factor D	-0.0300	-0.0150
Factor A*Factor C*Factor D	0.1200	0.0600
Factor B*Factor C*Factor D	-0.3100	-0.1550
Factor A*Factor B*Factor C*Factor D	-0.0100	-0.0050

รูป 4.10 ระดับอิทธิพลและค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

จากรูป 4.10 และ 4.11 พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทมากที่สุดคือปัจจัย D ในการชุบแข็ง เช่นเดียวกับการสร้าง Main Effect Plot และอิทธิพลร่วมของปัจจัย D ในการชุบแข็งกับปัจจัย C ในการชุบแข็ง และอิทธิพลร่วมของปัจจัย D ในการชุบแข็งกับปัจจัย B ในการชุบแข็งก็แสดงถึงอิทธิพลที่เด่นชัดกว่าอิทธิพลร่วมระหว่างคู่ปัจจัยอื่น ๆ

Analysis of Variance for ID MEAN (coded units)

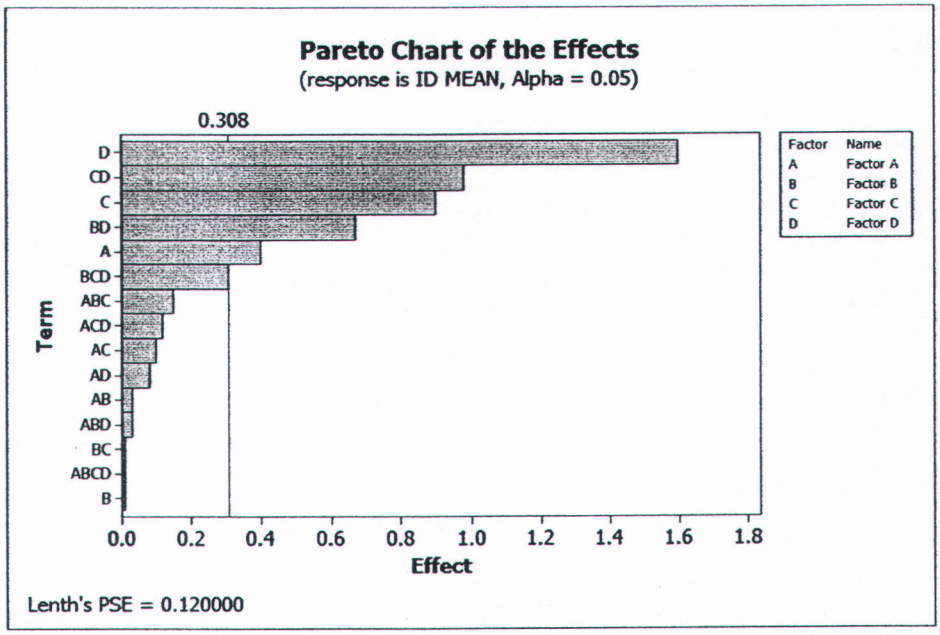
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	14.1204	14.1204	3.5301	*	*
Factor A	1	0.6400	0.6400	0.6400	*	*
Factor B	1	0.0004	0.0004	0.0004	*	*
Factor C	1	3.2400	3.2400	3.2400	*	*
Factor D	1	10.2400	10.2400	10.2400	*	*
2-Way Interactions	6	5.7068	5.7068	0.9511	*	*
Factor A*Factor B	1	0.0036	0.0036	0.0036	*	*
Factor A*Factor C	1	0.0400	0.0400	0.0400	*	*
Factor A*Factor D	1	0.0256	0.0256	0.0256	*	*
Factor B*Factor C	1	0.0004	0.0004	0.0004	*	*
Factor B*Factor D	1	1.7956	1.7956	1.7956	*	*
Factor C*Factor D	1	3.8416	3.8416	3.8416	*	*
3-Way Interactions	4	0.5356	0.5356	0.1339	*	*
Factor A*Factor B*Factor C	1	0.0900	0.0900	0.0900	*	*
Factor A*Factor B*Factor D	1	0.0036	0.0036	0.0036	*	*
Factor A*Factor C*Factor D	1	0.0576	0.0576	0.0576	*	*
Factor B*Factor C*Factor D	1	0.3844	0.3844	0.3844	*	*
4-Way Interactions	1	0.0004	0.0004	0.0004	*	*
Factor A*Factor B*Factor C*Factor D	1	0.0004	0.0004	0.0004	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	15	20.3632				

รูป 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรท

4.6 ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรหลักแต่ละตัว และอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยร่วม

ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรหลักแต่ละตัวแปร และอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยร่วมด้วยวิธีทางสถิติแบบ Student t-Test และทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยยะสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดซับสเตรททิ้ง โดยใช้แผนภาพพาเรโต้มาช่วยในการพิจารณาระดับของอิทธิพล โดยทำการตัดตัวแปรร่วมที่ไม่มีนัยยะสำคัญออกก่อนทีละตัวแปรจนกระทั่งเหลือเฉพาะตัวแปรที่มีอิทธิพลแบบมีนัยยะสำคัญโดยพิจารณาจากค่า t (ยกเว้นจะไม่ตัดตัวแปรหลักที่ไม่มีนัยยะต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท แต่ตัวแปรร่วมของตัวแปรหลักนั้น ๆ มีนัยยะต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท)

จากการวิเคราะห์การออกแบบแฟคตอเรียลเบื้องต้นเมื่อนำนัยยะสำคัญของแต่ละปัจจัยมาสร้างเป็นแผนภาพพาเรโต้ดังรูป 4.12



รูป 4.12 แผนภาพพาเรโต้แสดงนัยยะของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

จะเห็นได้ว่ามีอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลาย ๆ ปัจจัยที่มีนัยยะสำคัญและไม่มีนัยยะสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรท แต่เมื่อพิจารณาจากปัจจัยที่มีทั้งหมด ถือว่ายังไม่สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ไม่มีนัยยะสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทนั้นจะไม่มีผลใด ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากยังมีปัจจัยที่ไม่มีนัยยะสำคัญอยู่มาก ซึ่งอาจส่งผลให้ปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งไม่สามารถแสดงอิทธิพลออกมาได้

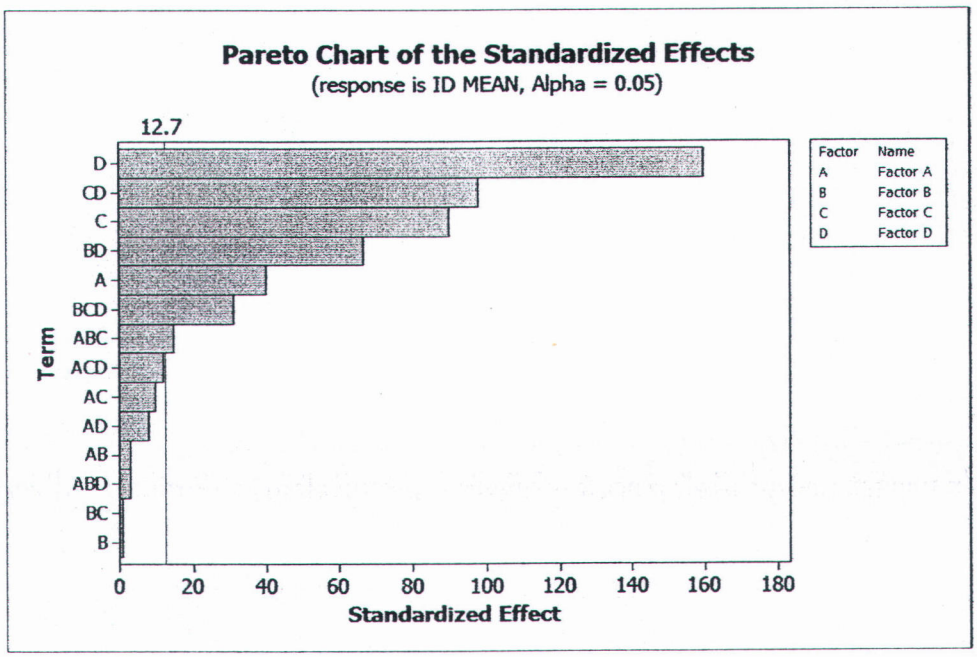
ดังนั้นขั้นตอนต่อไป จึงจำเป็นที่จะต้องทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยยะสำคัญออกทีละปัจจัย โดยที่เริ่มการตัดปัจจัยร่วมของปัจจัยจำนวนมากที่สุด(ในที่นี่คืออิทธิพลร่วมแบบ 4 ทาง หรือ 4-Way Interaction ของ อิทธิพลร่วมระหว่าง ABCD) ทั้งนี้ทั้งนั้นในส่วนของปัจจัยหลักปัจจัยใดที่ไม่มีนัยยะสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท แต่ปัจจัยร่วมของปัจจัยหลักนั้น ๆ แสดงอิทธิพลที่มีนัยยะสำคัญ ก็ยังจำเป็นที่จะต้องเก็บปัจจัยหลักนั้น ๆ ไว้สำคัญการพิจารณาอยู่

โดยตั้งสมมติฐานของสมการถดถอยแบบพหุไว้ดังนี้

สมมติฐานหลัก(H_0) ที่ว่า ปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้น ๆ <u>ไม่มี</u>ผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรท

และสมมติฐานทางเลือก(H_1) ที่ว่า ปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้น ๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรท

ขั้นตอนที่ 1 ตัดอิทธิพลร่วมแบบ 4 ทางของทุก ๆ ปัจจัยร่วมออก (ABCD) ซึ่งเมื่อนำปัจจัยที่เหลือและมีนัยยะสำคัญมาวิเคราะห์จะได้ผลดังรูป 4.13, 4.14 และ 4.15



รูป 4.13 แผนภาพพาเรโต้แสดงนัยยะของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง ABCD ออก

Factorial Fit: ID MEAN versus Factor A, Factor B, Factor C, Factor D

Estimated Effects and Coefficients for ID MEAN (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-0.3300	0.005000	-66.00	0.010
Factor A	-0.4000	-0.2000	0.005000	-40.00	0.016
Factor B	-0.0100	-0.0050	0.005000	-1.00	0.500
Factor C	-0.9000	-0.4500	0.005000	-90.00	0.007
Factor D	-1.6000	-0.8000	0.005000	-160.00	0.004
Factor A*Factor B	-0.0300	-0.0150	0.005000	-3.00	0.205
Factor A*Factor C	0.1000	0.0500	0.005000	10.00	0.063
Factor A*Factor D	-0.0800	-0.0400	0.005000	-8.00	0.079
Factor B*Factor C	0.0100	0.0050	0.005000	1.00	0.500
Factor B*Factor D	-0.6700	-0.3350	0.005000	-67.00	0.010
Factor C*Factor D	-0.9800	-0.4900	0.005000	-98.00	0.006
Factor A*Factor B*Factor C	-0.1500	-0.0750	0.005000	-15.00	0.042
Factor A*Factor B*Factor D	-0.0300	-0.0150	0.005000	-3.00	0.205
Factor A*Factor C*Factor D	0.1200	0.0600	0.005000	12.00	0.053
Factor B*Factor C*Factor D	-0.3100	-0.1550	0.005000	-31.00	0.021

รูป 4.14 ระดับอิทธิพลและค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง ABCD ออก

Analysis of Variance for ID MEAN (coded units)

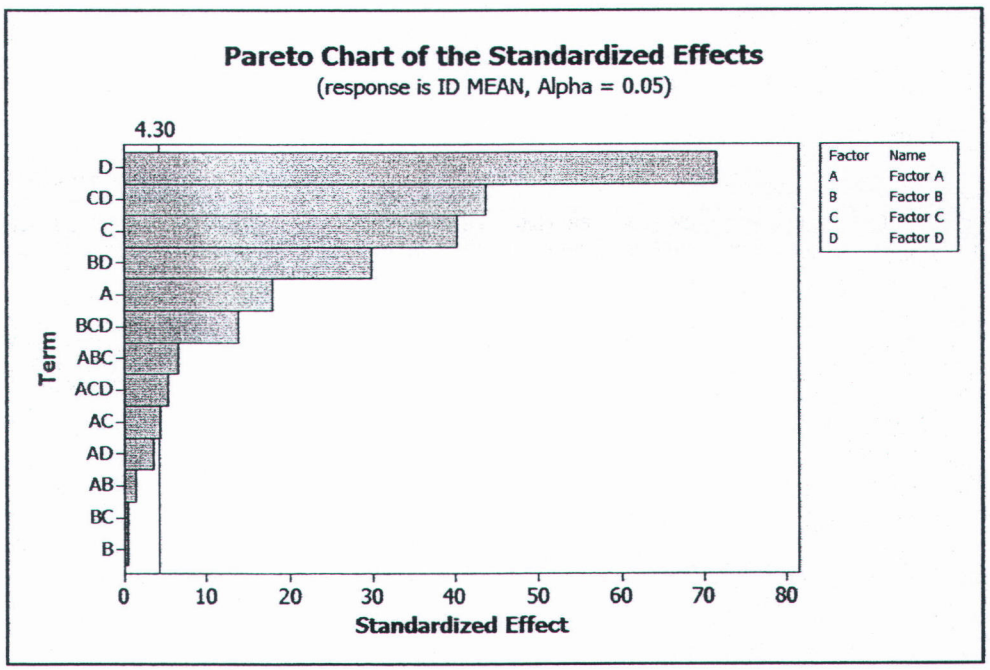
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	14.1204	14.1204	3.5301	8825.25	0.008
Factor A	1	0.6400	0.6400	0.6400	1600.00	0.016
Factor B	1	0.0004	0.0004	0.0004	1.00	0.500
Factor C	1	3.2400	3.2400	3.2400	8100.00	0.007
Factor D	1	10.2400	10.2400	10.2400	25600.00	0.004
2-Way Interactions	6	5.7068	5.7068	0.9511	2377.83	0.016
Factor A*Factor B	1	0.0036	0.0036	0.0036	9.00	0.205
Factor A*Factor C	1	0.0400	0.0400	0.0400	100.00	0.063
Factor A*Factor D	1	0.0256	0.0256	0.0256	64.00	0.079
Factor B*Factor C	1	0.0004	0.0004	0.0004	1.00	0.500
Factor B*Factor D	1	1.7956	1.7956	1.7956	4489.00	0.010
Factor C*Factor D	1	3.8416	3.8416	3.8416	9604.00	0.006
3-Way Interactions	4	0.5356	0.5356	0.1339	334.75	0.041
Factor A*Factor B*Factor C	1	0.0900	0.0900	0.0900	225.00	0.042
Factor A*Factor B*Factor D	1	0.0036	0.0036	0.0036	9.00	0.205
Factor A*Factor C*Factor D	1	0.0576	0.0576	0.0576	144.00	0.053
Factor B*Factor C*Factor D	1	0.3844	0.3844	0.3844	961.00	0.021
Residual Error	1	0.0004	0.0004	0.0004		
Total	15	20.3632				

รูป 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง ABCD ออก

จากการพิจารณานัยยะสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแต่ละปัจจัยโดยวิธี Student t-Test ที่ Degree of Freedome(DF) = 1 และตรวจสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แบบ 2 ทาง ซึ่งจุดวิกฤตของการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปนี้คือ $t_{0.025,1} = 12.7$

ดังนั้นปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด ๆ ที่มีค่าสมบูรณ์ของ t ที่มากกว่า 12.7 หมายความว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทไม่ว่าจะแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> ตัดอิทธิพลร่วมแบบ 3 ทางระหว่างปัจจัย A กับปัจจัย B กับปัจจัย D (ABD) ออก ซึ่งเมื่อนำปัจจัยที่เหลือและมีนัยยะสำคัญมาวิเคราะห์จะได้ผลดังรูป 4.16, 4.17 และ 4.18



รูป 4.16 แผนภาพพาเรโต้แสดงนัยยะของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง ABD ออก

Factorial Fit: ID MEAN versus Factor A, Factor B, Factor C, Factor D

Estimated Effects and Coefficients for ID MEAN (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-0.3300	0.01118	-29.52	0.001
Factor A	-0.4000	-0.2000	0.01118	-17.89	0.003
Factor B	-0.0100	-0.0050	0.01118	-0.45	0.698
Factor C	-0.9000	-0.4500	0.01118	-40.25	0.001
Factor D	-1.6000	-0.8000	0.01118	-71.55	0.000
Factor A*Factor B	-0.0300	-0.0150	0.01118	-1.34	0.312
Factor A*Factor C	0.1000	0.0500	0.01118	4.47	0.047
Factor A*Factor D	-0.0800	-0.0400	0.01118	-3.58	0.070
Factor B*Factor C	0.0100	0.0050	0.01118	0.45	0.698
Factor B*Factor D	-0.6700	-0.3350	0.01118	-29.96	0.001
Factor C*Factor D	-0.9800	-0.4900	0.01118	-43.83	0.001
Factor A*Factor B*Factor C	-0.1500	-0.0750	0.01118	-6.71	0.022
Factor A*Factor C*Factor D	0.1200	0.0600	0.01118	5.37	0.033
Factor B*Factor C*Factor D	-0.3100	-0.1550	0.01118	-13.86	0.005

รูป 4.17 ระดับอิทธิพลและค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง ABD ออก

Analysis of Variance for ID MEAN (coded units)

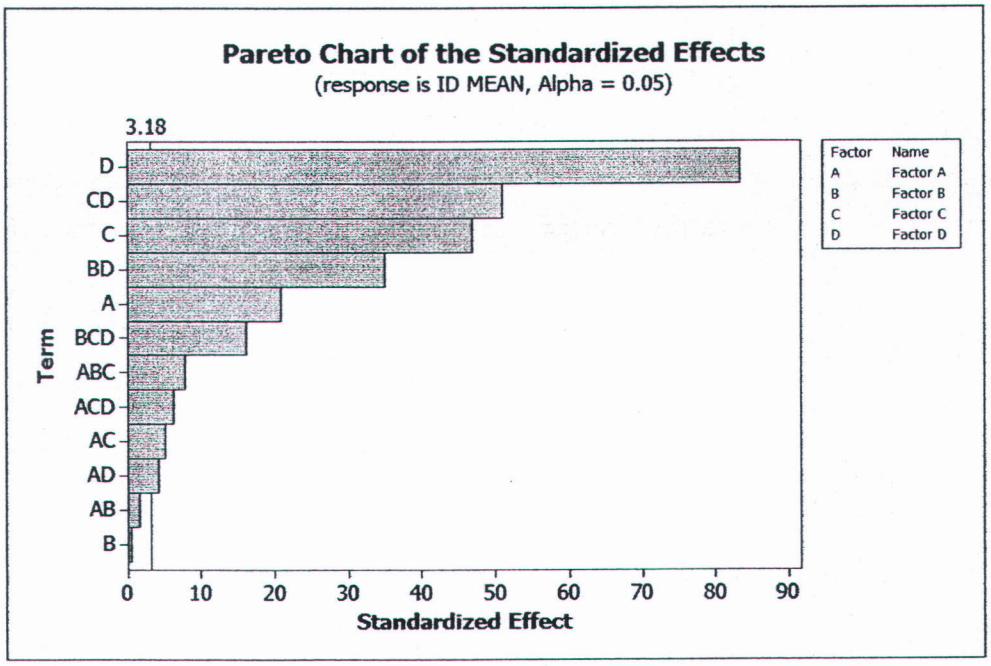
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	14.1204	14.1204	3.5301	1765.05	0.001
Factor A	1	0.6400	0.6400	0.6400	320.00	0.003
Factor B	1	0.0004	0.0004	0.0004	0.20	0.698
Factor C	1	3.2400	3.2400	3.2400	1620.00	0.001
Factor D	1	10.2400	10.2400	10.2400	5120.00	0.000
2-Way Interactions	6	5.7068	5.7068	0.9511	475.57	0.002
Factor A*Factor B	1	0.0036	0.0036	0.0036	1.80	0.312
Factor A*Factor C	1	0.0400	0.0400	0.0400	20.00	0.047
Factor A*Factor D	1	0.0256	0.0256	0.0256	12.80	0.070
Factor B*Factor C	1	0.0004	0.0004	0.0004	0.20	0.698
Factor B*Factor D	1	1.7956	1.7956	1.7956	897.80	0.001
Factor C*Factor D	1	3.8416	3.8416	3.8416	1920.80	0.001
3-Way Interactions	3	0.5320	0.5320	0.1773	88.67	0.011
Factor A*Factor B*Factor C	1	0.0900	0.0900	0.0900	45.00	0.022
Factor A*Factor C*Factor D	1	0.0576	0.0576	0.0576	28.80	0.033
Factor B*Factor C*Factor D	1	0.3844	0.3844	0.3844	192.20	0.005
Residual Error	2	0.0040	0.0040	0.0020		
Total	15	20.3632				

รูป 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง ABD ออก

จากการพิจารณานัยยะสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแต่ละปัจจัยโดยวิธี Student t-Test ที่ Degree of Freedom (DF) = 2 และตรวจสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แบบ 2 ทาง ซึ่งจุดวิกฤตของการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปนี้คือ $t_{0.025,2} = 4.30$

ดังนั้นปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด ๆ ที่มีค่าสมบูรณ์ของ t ที่มากกว่า 4.30 หมายความว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทไม่ว่าจะแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> ตัดอิทธิพลร่วมแบบ 2 ทางระหว่างปัจจัย B กับ ปัจจัย C ในการชุบแข็ง (BC) ออก ซึ่งเมื่อนำปัจจัยที่เหลือและมีนัยยะสำคัญมาวิเคราะห์จะได้ผลดังรูป 4.19, 4.20 และ 4.21



รูป 4.19 แผนภาพพาเรโต้แสดงนัยยะของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง BC ออก

Factorial Fit: ID MEAN versus Factor A, Factor B, Factor C, Factor D

Estimated Effects and Coefficients for ID MEAN (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-0.3300	0.009574	-34.47	0.000
Factor A	-0.4000	-0.2000	0.009574	-20.89	0.000
Factor B	-0.0100	-0.0050	0.009574	-0.52	0.638
Factor C	-0.9000	-0.4500	0.009574	-47.00	0.000
Factor D	-1.6000	-0.8000	0.009574	-83.56	0.000
Factor A*Factor B	-0.0300	-0.0150	0.009574	-1.57	0.215
Factor A*Factor C	0.1000	0.0500	0.009574	5.22	0.014
Factor A*Factor D	-0.0800	-0.0400	0.009574	-4.18	0.025
Factor B*Factor D	-0.6700	-0.3350	0.009574	-34.99	0.000
Factor C*Factor D	-0.9800	-0.4900	0.009574	-51.18	0.000
Factor A*Factor B*Factor C	-0.1500	-0.0750	0.009574	-7.83	0.004
Factor A*Factor C*Factor D	0.1200	0.0600	0.009574	6.27	0.008
Factor B*Factor C*Factor D	-0.3100	-0.1550	0.009574	-16.19	0.001

รูป 4.20 ระดับอิทธิพลและค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง BC ออก

Analysis of Variance for ID MEAN (coded units)

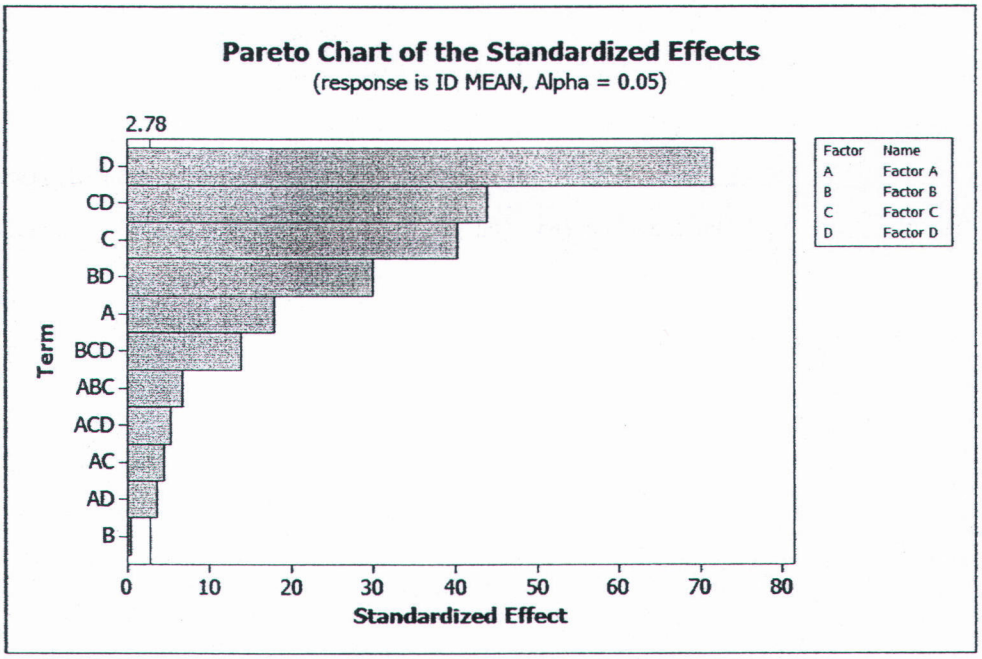
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	14.1204	14.1204	3.5301	2406.89	0.000
Factor A	1	0.6400	0.6400	0.6400	436.36	0.000
Factor B	1	0.0004	0.0004	0.0004	0.27	0.638
Factor C	1	3.2400	3.2400	3.2400	2209.09	0.000
Factor D	1	10.2400	10.2400	10.2400	6981.82	0.000
2-Way Interactions	5	5.7064	5.7064	1.1413	778.15	0.000
Factor A*Factor B	1	0.0036	0.0036	0.0036	2.45	0.215
Factor A*Factor C	1	0.0400	0.0400	0.0400	27.27	0.014
Factor A*Factor D	1	0.0256	0.0256	0.0256	17.45	0.025
Factor B*Factor D	1	1.7956	1.7956	1.7956	1224.27	0.000
Factor C*Factor D	1	3.8416	3.8416	3.8416	2619.27	0.000
3-Way Interactions	3	0.5320	0.5320	0.1773	120.91	0.001
Factor A*Factor B*Factor C	1	0.0900	0.0900	0.0900	61.36	0.004
Factor A*Factor C*Factor D	1	0.0576	0.0576	0.0576	39.27	0.008
Factor B*Factor C*Factor D	1	0.3844	0.3844	0.3844	262.09	0.001
Residual Error	3	0.0044	0.0044	0.0015		
Total	15	20.3632				

รูป 4.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง BC ออก

จากการพิจารณานัยยะสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแต่ละปัจจัยโดยวิธี Student t-Test ที่ Degree of Freedom (DF) = 3 และตรวจสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แบบ 2 ทาง ซึ่งจุดวิกฤตของการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปนี้คือ $t_{0.025,3} = 3.18$

ดังนั้นปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด ๆ ที่มีค่าสมบูรณ์ของ t ที่มากกว่า 3.18 หมายความว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทไม่ว่าจะแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> ขั้นตอนสุดท้าย ตัดอิทธิพลร่วมระหว่าง ปัจจัย A กับปัจจัย B (AB) ออก ซึ่งเมื่อนำปัจจัยที่เหลือและมีนัยยะสำคัญมาวิเคราะห์จะได้ผลดังรูป 4.22, 4.23 และ 4.24



รูป 4.22 แผนภาพพาเรโตแสดงนัยยะของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง AB ออก

Factorial Fit: ID MEAN versus Factor A, Factor B, Factor C, Factor D

Estimated Effects and Coefficients for ID MEAN (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-0.3300	0.01118	-29.52	0.000
Factor A	-0.4000	-0.2000	0.01118	-17.89	0.000
Factor B	-0.0100	-0.0050	0.01118	-0.45	0.678
Factor C	-0.9000	-0.4500	0.01118	-40.25	0.000
Factor D	-1.6000	-0.8000	0.01118	-71.55	0.000
Factor A*Factor C	0.1000	0.0500	0.01118	4.47	0.011
Factor A*Factor D	-0.0800	-0.0400	0.01118	-3.58	0.023
Factor B*Factor D	-0.6700	-0.3350	0.01118	-29.96	0.000
Factor C*Factor D	-0.9800	-0.4900	0.01118	-43.83	0.000
Factor A*Factor B*Factor C	-0.1500	-0.0750	0.01118	-6.71	0.003
Factor A*Factor C*Factor D	0.1200	0.0600	0.01118	5.37	0.006
Factor B*Factor C*Factor D	-0.3100	-0.1550	0.01118	-13.86	0.000

รูป 4.23 ระดับอิทธิพลและค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง AB ออก

Analysis of Variance for ID MEAN (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	14.1204	14.1204	3.5301	1765.05	0.000
Factor A	1	0.6400	0.6400	0.6400	320.00	0.000
Factor B	1	0.0004	0.0004	0.0004	0.20	0.678
Factor C	1	3.2400	3.2400	3.2400	1620.00	0.000
Factor D	1	10.2400	10.2400	10.2400	5120.00	0.000
2-Way Interactions	4	5.7028	5.7028	1.4257	712.85	0.000
Factor A*Factor C	1	0.0400	0.0400	0.0400	20.00	0.011
Factor A*Factor D	1	0.0256	0.0256	0.0256	12.80	0.023
Factor B*Factor D	1	1.7956	1.7956	1.7956	897.80	0.000
Factor C*Factor D	1	3.8416	3.8416	3.8416	1920.80	0.000
3-Way Interactions	3	0.5320	0.5320	0.1773	88.67	0.000
Factor A*Factor B*Factor C	1	0.0900	0.0900	0.0900	45.00	0.003
Factor A*Factor C*Factor D	1	0.0576	0.0576	0.0576	28.80	0.006
Factor B*Factor C*Factor D	1	0.3844	0.3844	0.3844	192.20	0.000
Residual Error	4	0.0080	0.0080	0.0020		
Total	15	20.3632				

รูป 4.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรทหลังจากตัดปัจจัยร่วมระหว่าง AB ออก

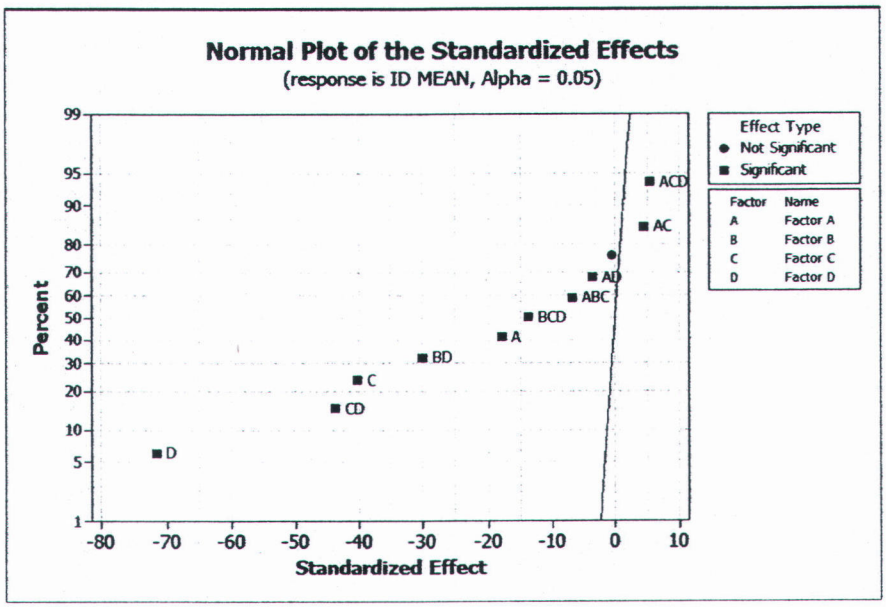
จากการพิจารณานัยยะสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแต่ละปัจจัยโดยวิธี Student t-Test ที่ Degree of Freedom (DF) = 4 และตรวจสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แบบ 2 ทาง ซึ่งจุดวิกฤตของการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปนี้คือ $t_{0.025,4} = 2.78$

ดังนั้นปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด ๆ ที่มีค่าสมบูรณ์ของ t ที่มากกว่า 2.78 หมายความว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทไม่ว่าจะแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ

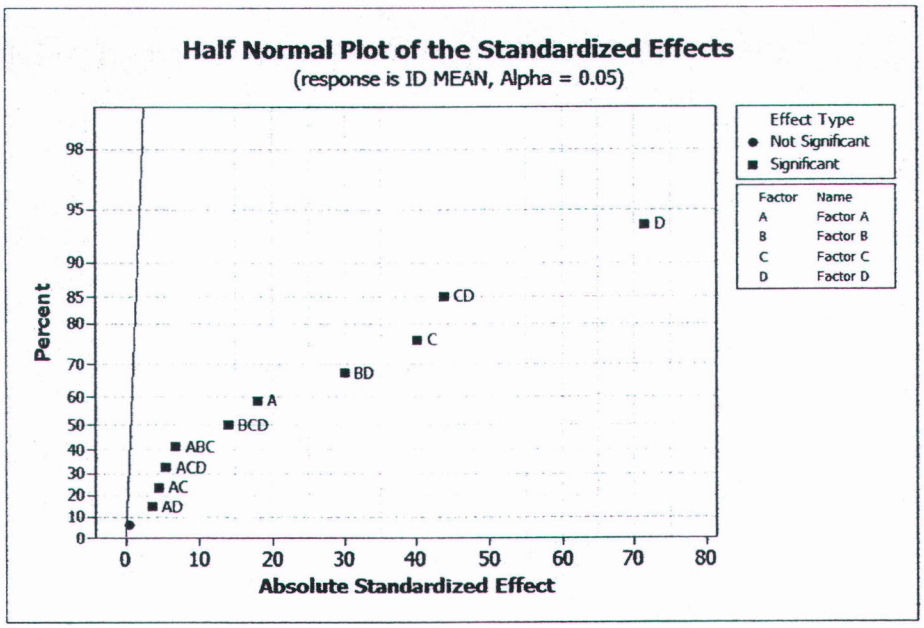
ซึ่งในที่นี้ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทได้แก่ ปัจจัย D ในการชุบแข็ง, ปัจจัย C ในการชุบแข็ง และปัจจัย A ในการชุบแข็ง โดยที่ปัจจัย C ในการชุบแข็งนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทโดยตรง

ส่วนปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทได้แก่ ปัจจัยร่วมแบบ 2 ทางระหว่างปัจจัย A ในการชุบกับปัจจัย C ในการชุบแข็ง, ปัจจัย A ในการชุบกับปัจจัย D ในการชุบแข็ง, ปัจจัย B ในการชุบและปัจจัย D ในการชุบแข็ง, ปัจจัย D ในการชุบและปัจจัย D ในการชุบแข็ง รวมถึงปัจจัยร่วมแบบ 3 ทาง ปัจจัย A ในการชุบกับปัจจัย B ในการชุบกับปัจจัย D ในการชุบแข็ง, ปัจจัย A ในการชุบกับปัจจัย C ในการชุบแข็งกับปัจจัย D ในการชุบแข็ง และปัจจัย B ในการชุบแข็งกับปัจจัย C ในการชุบแข็งกับปัจจัย D ในการชุบแข็ง ตามลำดับ

ดังนั้น จะสามารถสร้าง Normal Plot และ Half Normal Plot ซึ่งแสดงถึงนัยยะสำคัญของอิทธิของปัจจัยต่าง ๆ เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนได้ดังรูป 4.25 และ 4.26



รูป 4.25 ระดับมาตรฐานอิทธิพลของแต่ละปัจจัย



รูป 4.26 ระดับมาตรฐานอิทธิพลสมบูรณ์ของแต่ละปัจจัย

4.7 สร้างสมการถดถอยท้ายสุดแบบหลายตัวแปร (Final Multiple Regression Model)

สร้างสมการถดถอยหลังจากตัดตัวแปรหลักและอันตรกิริยาที่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซับสเตรท

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j$$

จากอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหลัก, ปัจจัยร่วม และค่าสัมปสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยจะสามารถสร้างสมการถดถอยแบบหลายตัวแปรท้ายสุดได้ดังรูป 4.27

Factorial Fit: ID MEAN versus Factor A, Factor B, Factor C, Factor D

Estimated Effects and Coefficients for ID MEAN (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		-0.3300	0.01118	-29.52	0.000
Factor A	-0.4000	-0.2000	0.01118	-17.89	0.000
Factor B	-0.0100	-0.0050	0.01118	-0.45	0.678
Factor C	-0.9000	-0.4500	0.01118	-40.25	0.000
Factor D	-1.6000	-0.8000	0.01118	-71.55	0.000
Factor A*Factor C	0.1000	0.0500	0.01118	4.47	0.011
Factor A*Factor D	-0.0800	-0.0400	0.01118	-3.58	0.023
Factor B*Factor D	-0.6700	-0.3350	0.01118	-29.96	0.000
Factor C*Factor D	-0.9800	-0.4900	0.01118	-43.83	0.000
Factor A*Factor B*Factor C	-0.1500	-0.0750	0.01118	-6.71	0.003
Factor A*Factor C*Factor D	0.1200	0.0600	0.01118	5.37	0.006
Factor B*Factor C*Factor D	-0.3100	-0.1550	0.01118	-13.86	0.000

รูป 4.27 ระดับอิทธิพลและค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมท้ายสุด

เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างสมการ ต่อไปนี้จะให้ความหมายของแต่ละตัวแปรไว้ดังนี้

A = ปัจจัย A ในการชุบแข็ง

B = ปัจจัย B ในการชุบแข็ง

C = ปัจจัย C ในการชุบแข็ง

D = ปัจจัย D ในการชุบแข็ง

เพราะฉะนั้น สมการถดถอยแบบหลายตัวแปรท้ายสุดแบบใส่รหัส จะเป็นดังนี้

$$\triangle ID = -0.33 -(0.2\times A) -(0.005\times B) -(0.45\times C) -(0.8\times D) +(0.05\times A\times C) -(0.04\times A\times D) -(0.335\times B\times D) -(0.49\times C\times D) -(0.075\times A\times B\times C) +(0.06\times A\times C\times D) -(0.155\times B\times C\times D)$$

หมายเหตุ : ปัจจัยแต่ละปัจจัยเป็นตัวเลขเข้ารหัส (+1) และ (-1) ณ ค่าปรับตั้งสูงสุด และค่าปรับตั้งต่ำสุด ดังนั้นกรณีที่จะปรับตั้งที่ค่าปรับตั้งอื่น ๆ จะไม่สามารถใช้สมการนี้ได้ ซึ่งจะต้องใช้การปรับตั้งค่าโดยการกำหนดช่วงค่าแต่ละปัจจัยใหม่ให้เป็นค่าจริง โดยกำหนดช่วงความกว้างของข้อมูลที่ค่าปรับตั้งสูงสุด หรือค่าปรับตั้งต่ำสุดใหม่ให้เหมาะสม หรือใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ในการหาค่าตอบสนองจากสมการแทน

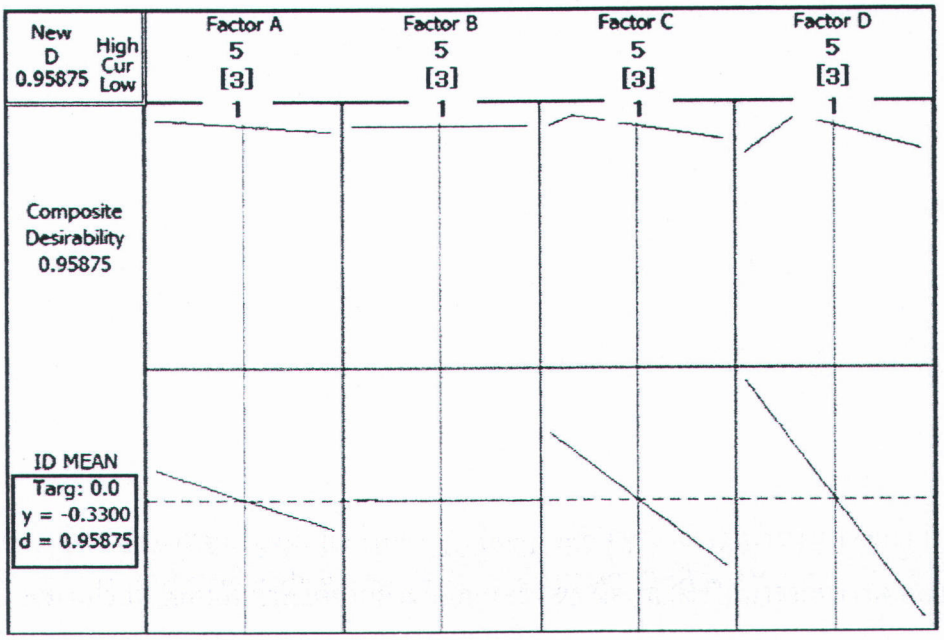
เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปที่นำมาออกแบบนั้น สร้างมาจากปัจจัยที่เลือกมาจากค่าปรับตั้งต่ำสุด และค่าปรับตั้งสูงสุด ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของงสมการที่ได้ หรือเพื่อยืนยันว่ากระบวนการจริงมีลักษณะเป็นแบบพื้นผิวเรียบเหมือนกับสมการหรือไม่นั้น จึงจำเป็นต้องทำการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบซ้ำที่จุดกึ่งกลางของค่าปรับตั้งของทุก ๆ ปัจจัยค่าค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทนั้นจะแตกต่างจากค่าที่ได้จากใช้ Minitab คำนวนจากสมการที่ได้โดยใช้คำสั่งเครื่องมือหาค่าที่ดีที่สุด (Response Optimizer) หรือไม่ โดยนำค่าที่ได้จาก Minitab มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง 25 ข้อมูล (ซึ่งได้มาจากการทดลองตามขั้นตอนที่ 4.2) มาทดสอบด้วย Student t-Test แบบ One Sample-t โดยตั้งสมมติฐานการตรวจสอบไว้ดังนี้

สมมติฐานหลัก H_0: ค่าที่ได้จากสมการมีค่า<u>ไม่แตกต่าง</u>จากค่าที่ได้จากการทดลองจริง

สมมติฐานทางเลือก H_1: ค่าที่ได้จากสมการมีค่า<u>แตกต่าง</u>จากค่าที่ได้จากการทดลองจริง

โดยถ้าค่า p-Value ที่ได้มีค่ามากกว่า 0.05 จะถือได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงนั้นมีค่าที่ไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการถดถอยแบบหลายตัวแปร หรือหมายความว่าสมการที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปนั้นมีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบจริง แต่กรณีที่ค่า p-Value ที่ได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 จะถือได้ว่าค่าที่ได้จากสมการมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจริง หรือหมายความว่า กระบวนการชุบแข็งเองนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทแบบพื้นผิวโค้ง

ซึ่งจากการตรวจสอบค่าตอบสนองที่จุดกึ่งกลางของทุก ๆ ปัจจัยโดยใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab จะได้ค่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท ณ จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยคือ ปัจจัย A ที่ค่าระดับที่ 3, ปัจจัย B ที่ค่าระดับที่ 3, ปัจจัย C ที่ค่าระดับที่ 3 และปัจจัย D ที่ค่าระดับที่ 3 นั้นจะอยู่ที่ -0.33 ดังรูป 4.28



รูป 4.28 ผลของ Respond optimizer ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยหลักจากโปรแกรม Minitab

จากนั้น ได้นำค่าปรับตั้งที่ค่ากลางของแต่ละปัจจัยที่ ปัจจัย A ที่ค่าระดับที่ 3 ปัจจัย B ที่ค่าระดับที่ 3 ปัจจัย C ที่ค่าระดับที่ 3 และปัจจัย D ที่ค่าระดับที่ 3 มาทำการทดลองที่กระบวนการผลิตจริง ดังตาราง 1.3 และทำการเก็บข้อมูลปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรททั้งหมด 25 ข้อมูล โดยทำตามขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกันกับการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลแบบเต็มรูป จะได้ข้อมูลปริมาณการขยายตัวทั้ง 25 ข้อมูลดังตาราง 4.4

ตาราง 4.3 ค่าปรับตั้งจริงของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย	ค่าปรับตั้ง	หน่วย
ปัจจัย A	3	ระดับ
ปัจจัย B	3	ระดับ
ปัจจัย D	3	ระดับ
ปัจจัย D	3	ระดับ

ตาราง 4.4 แสดงผลการปริมาณการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการทดลองจริง

ลำดับที่	การขยายตัว
1	-0.002
2	0.000
3	0.001
4	0.000
5	0.000
6	-0.002
7	0.000
8	-0.001
9	0.000
10	0.002
11	0.001

ตาราง 4.4 (ต่อ)

ลำดับที่	การขยายตัว
12	-0.002
13	0.000
14	-0.001
15	0.000
16	0.001
17	0.000
18	-0.001
19	0.000
20	0.001
21	0.001
22	0.002
23	0.000
24	0.000
25	-0.001

จากนั้นนำค่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทที่บันทึกได้ทุก ๆ ข้อมูลมาทำการตรวจสอบสมมติฐานดังที่ตั้งไว้ กับค่าที่ได้จากสมการคือ -0.33 คือ

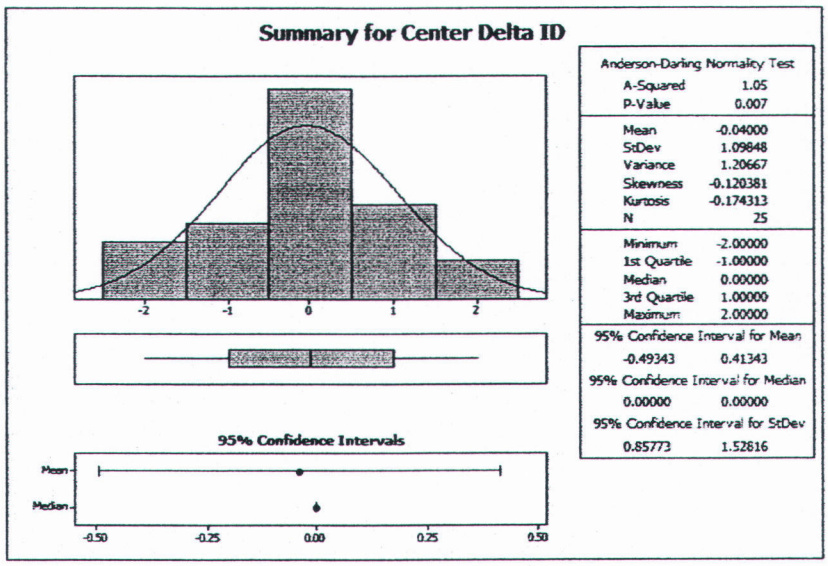
สมมติฐานหลัก H_0: ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรท<u>ไม่แตกต่าง</u>จากค่า -0.33 um.

สมมติฐานทางเลือก H_1 : ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทแตกต่างจากค่า -0.33 um.

ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงได้การกระจายข้อมูลเป็นแบบปกติ ซึ่งที่ความเชื่อมั่น 95% มีโอกาสที่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทสามารถเกิดขึ้นได้ที่ค่า -0.49 ถึง 0.41 ซึ่งหมายความว่าโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทที่ -0.33 ก็สามารถเกิดขึ้นได้ที่การทดลองจริงดังรูป 4.29

และจากการตรวจสอบสมมติฐานโดยใช้ Student t-Test แบบ 2 ทิศทาง ซึ่งค่าวิกฤตของกราฟการกระจายแบบ t หรือ t-Distribution คือ $t_{0.025,24} = 2.064$ แต่จากการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง ค่า t อยู่ที่ 1.32 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ซึ่งได้ค่า p-Value ที่ 0.199 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทที่ได้จากการทดลองจริงที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยการชุบแข็งมีค่าไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทที่ได้จากค่าพยากรณ์ของสมการถดถอยแบบหลายตัวแปร ดังรูป 4.30

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าลักษณะพื้นผิวของสมการถดถอยแบบหลายตัวแปรที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลแบบเต็มรูปนั้น มีลักษณะพื้นผิวที่แบนราบไม่มีลักษณะที่โค้งนูนหรือเว้า หมายความว่า ผู้วิจัยสามารถใช้สมการถดถอยที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มรูปนี้ในการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทจากกระบวนการชุบแข็งได้จริง



รูป 4.29 การกระจายข้อมูลแบบปกติของปริมาณการขยายตัวที่ได้จากการทดลองจริงที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย

One-Sample T: Center Delta ID

Test of mu = -0.33 vs not = -0.33

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Center Delta ID	25	-0.040	1.098	0.220	(-0.493, 0.413)	1.32	0.199

รูป 4.30 ผลการตรวจสอบสมมติฐานแบบ one sample t

4.8 พยากรณ์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซับสเตรทจากสมการถดถอย

ใช้สมการถดถอยที่ได้มาพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และกำหนดช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางป้อนเข้าในแต่ละช่วงการใช้งานของกระบวนการชุบ และปรับใช้ในกระบวนการ โดยทำการปรับเปลี่ยนระบบการป้อนกลับข้อมูลของกระบวนการชุบแข็งใหม่ จากการป้อนกลับโดยใช้ข้อมูลขนาดซับสเตรทท้ายสุดของกระบวนการ มาเป็นการป้อนกลับข้อมูลการ

ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรท ณ ขณะนั้น ๆ โดยการพยากรณ์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของขนาดซับสเตรท ณ ค่าความเข้มข้นของลิเที่ยมที่กระบวนการชุบแข็งมีอยู่แทน

เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผลิตจริงมีปัจจัยการผลิตหลายปัจจัยที่ไม่สามารถทำการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากมีผลกระทบต่อเนื่องซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการประเมินผลไปถึงขั้นตอนการบันทึกชั้นแม่เหล็ก หรือ Media และขั้นตอนการประกอบเพื่อใช้งานจริง หรือ Hard Disk Drive ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานจริง จึงจะไม่เปลี่ยนปัจจัยดังตาราง 4.5

ปัจจัย A ในการชุบแข็ง จะคงไว้ที่ระดับที่ 4

ปัจจัย B ในการชุบแข็ง จะคงไว้ที่ระดับที่ 4

ปัจจัย C ในการชุบแข็ง จะคงไว้ที่ระดับที่ 3

แต่ปัจจัยที่แปรเปลี่ยนตามอายุการใช้งานของเกลือ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จะนำมาพยากรณ์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทคือ ปัจจัย D ในการชุบแข็ง ซึ่งมีการกำหนดช่วงการใช้งานไว้ที่ระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 5 เท่านั้น

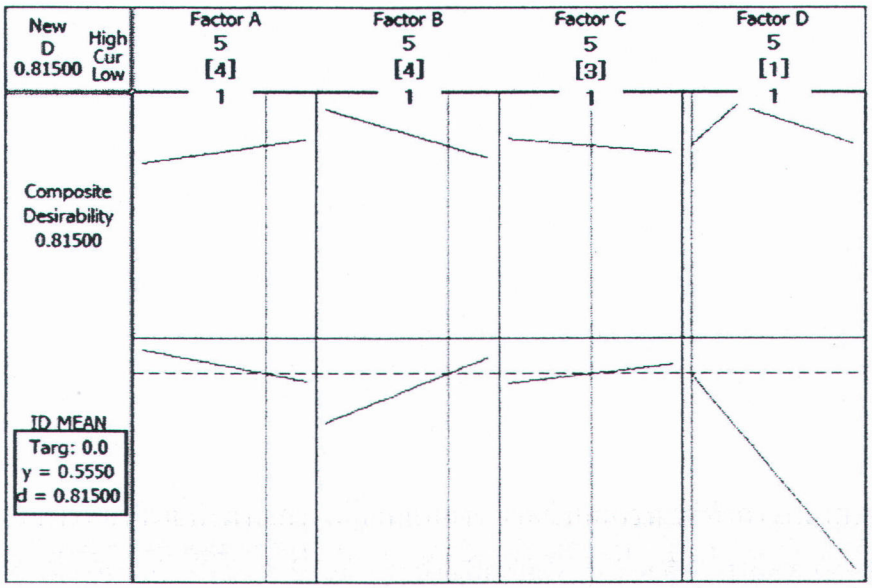
ดังนั้น การพยากรณ์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท จะทำการพยากรณ์ที่ช่วงปัจจัย D ที่ระดับที่แรก จนถึงปัจจัย D ที่ระดับสุดท้าย คือ ปัจจัย D ที่ระดับที่ 1 ถึง 5 ดังตาราง 4.5 โดยใช้คำสั่ง Response Optimizer

ตาราง 4.5 ค่าปรับตั้งแต่ละปัจจัยตลอดช่วงอายุการใช้งาน

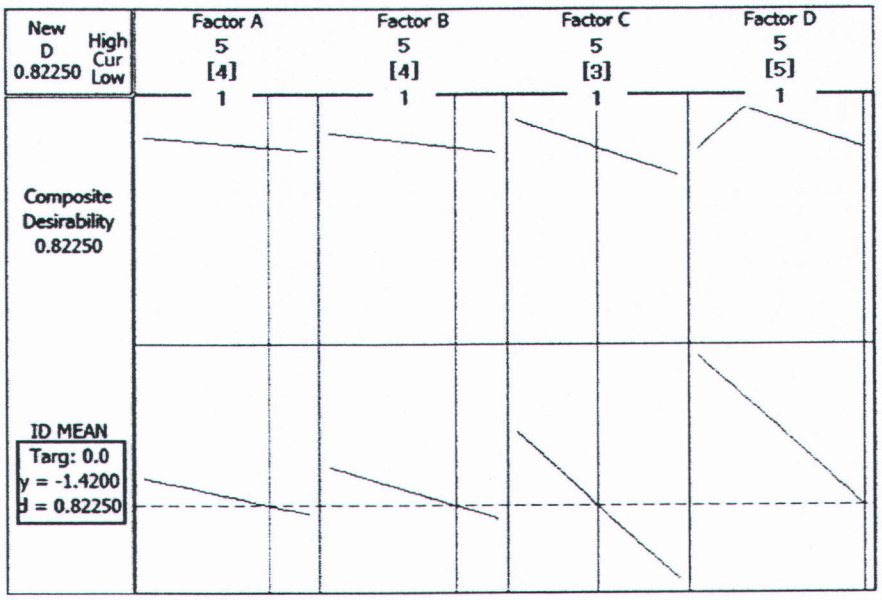
ปัจจัย	ค่าปรับตั้ง	หน่วย
ปัจจัย A	4	ระดับ
ปัจจัย B	4	ระดับ
ปัจจัย C	3	ระดับ
ปัจจัย D	ผันแปรตั้งแต่ 1 ถึง 5	ระดับ

ซึ่งจากการพยากรณ์ที่ปัจจัย D ที่ระดับที่ 1 คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทจะอยู่ที่ 0.555 um ดังรูป 4.31

และจากการพยากรณ์ที่ปัจจัย D ที่ระดับที่ 5 คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทจะอยู่ที่ -1.42 um ดังรูป 4.32



รูป 4.31 ปริมาณการเปลี่ยนขนาดซับสเตรทที่ค่าปรับตั้งที่ปัจจัย D ระดับที่ 1 ด้วย respond optimizer



รูป 4.32 ปริมาณการเปลี่ยนขนาดซับสเตรทที่ค่าปรับตั้งค่าปรับตั้งที่ปัจจัย D ระดับที่ 5 ด้วย respond optimizer

จากนั้น ได้นำค่าพยากรณ์ที่ได้มาสร้างมาตรฐานปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทจากกระบวนการชุบแข็งดังตาราง 4.6

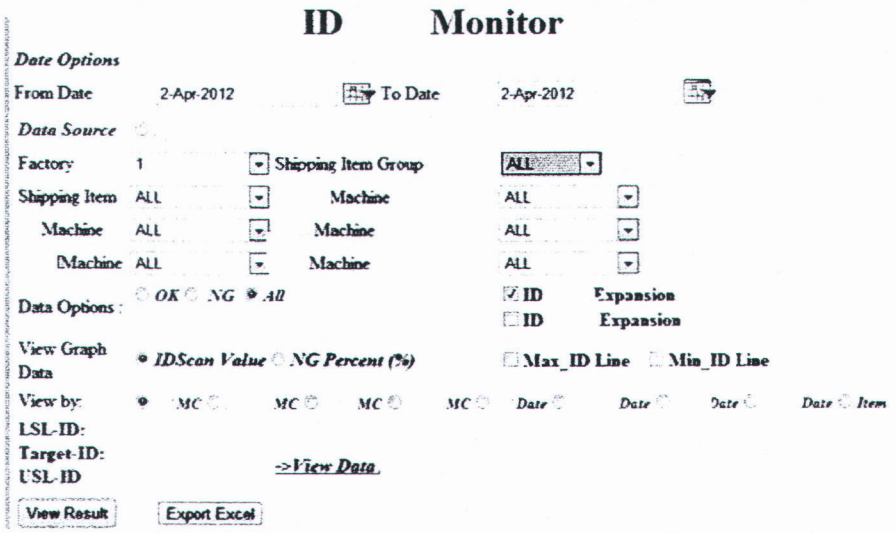
ตาราง 4.6 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรทที่ค่าปรับตั้งต่ำสุดและสูงสุดของปัจจัย D

ค่าปรับตั้ง	**ระดับปัจจัย D**	**อัตราการขยายตัว**
ค่าต่ำสุด	1	0.555
ค่าสูงสุด	5	-1.42

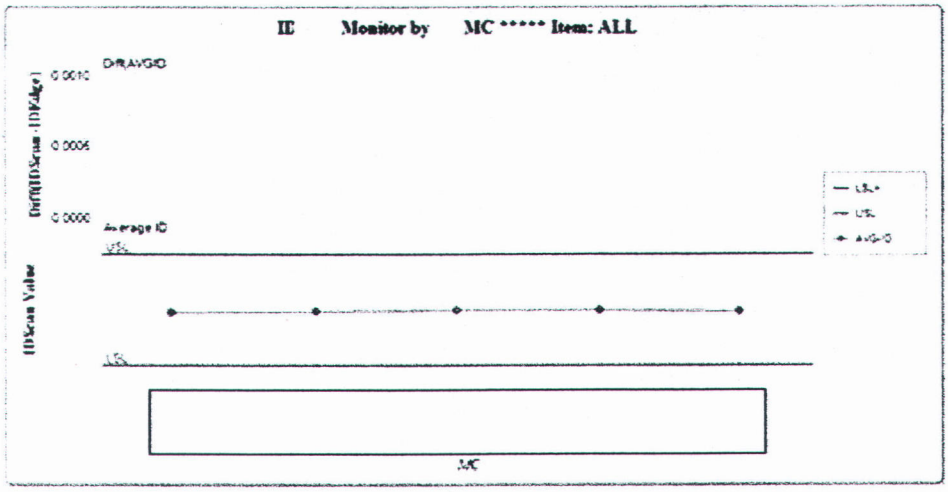
ต่อมาผู้วิจัยได้สร้างระบบติดตามผลปริมาณการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย D ในการชุบแข็งเพื่อตรวจสอบระดับของปัจจัย D ที่แท้จริงของปัจจัยที่ควบคุม เพื่อนำมาสร้างค่าพยากรณ์ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรท เพื่อจัดระบบป้อนกลับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาดซับสเตรทให้กับกระบวนการ เพื่อจัดสร้างขนาดของซับสเตรทป้อนเข้าให้เหมาะสมกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาด เพื่อให้ได้ค่าขนาดของซับสเตรทขาออกที่คงที่ ดังนี้

การสร้างระบบติดตามผล ผู้วิจัยและบริษัท ได้ร่วมกันสร้างระบบติดตามผลขนาดของซับสเตรทขาออกของกระบวนการชุบแข็งแบบเรียลไทม์ (Real-Time) เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดของซับสเตรท เพื่อการป้อนกลับข้อมูลไปยังกระบวนการ เพื่อการปรับค่าแบบทันท่วงที

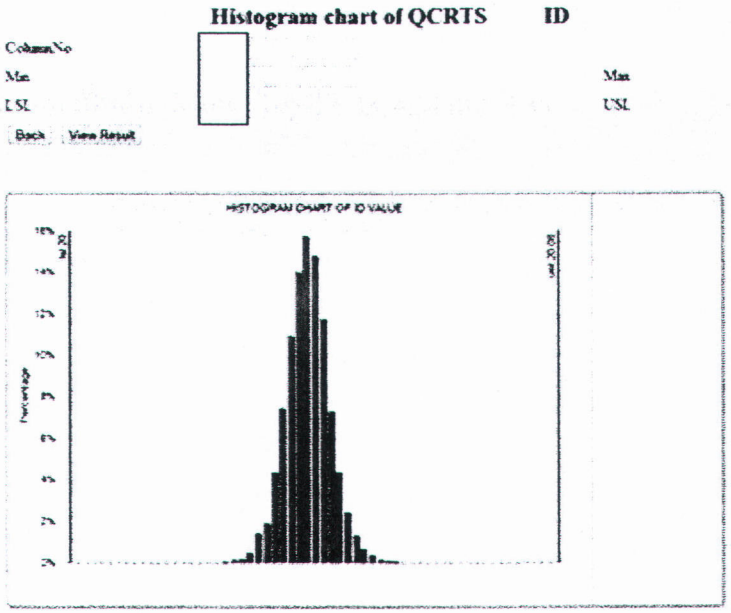
ระบบสารสนเทศขององค์กรเป็นระบบบันทึกค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบแผ่นต่อแผ่น ซึ่งสามารถแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ โดยข้อมูลประวัติการผลิตทั้งหมดของกระบวนการจะถูกบันทึกไว้พร้อม ๆ กับข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น ๆ ด้วยเพื่อให้ประโยชน์ในการสืบย้อนประวัติการผลิต ระบบแสดงผลจะสามารถเลือกแสดงผลข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อน และลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล เพื่อวัตถุประสงค์เรื่องความรวดเร็วในการวิเคราะห์ข้อมูล ทั้งความผิดปกติของกระบวนการ และความผิดปกติของการปรับตั้งค่าที่แผนกต้นทาง เช่น แผนกเจาะและแผนกขัดขอบ เป็นต้น ดังแสดงในรูป 4.33, 4.34 และ 4.35



รูป 4.33 ตัวอย่างระบบการติดตามผลขนาดซับสเตรทแบบเรียลไทม์



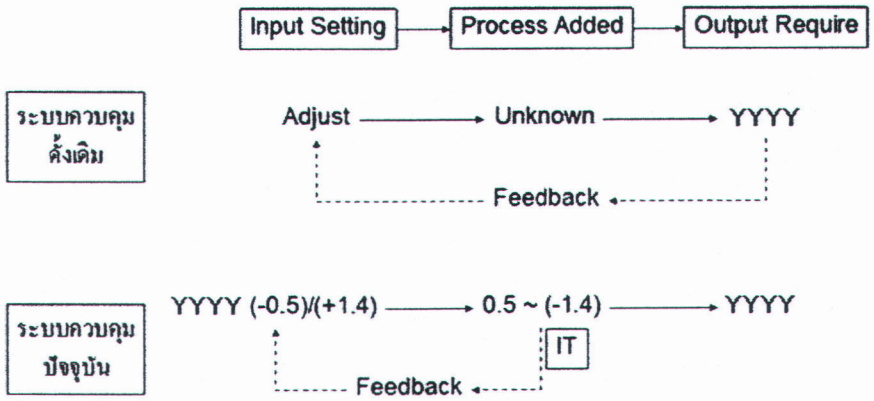
รูป 4.34 ตัวอย่างระบบการติดตามผลขนาดซับสเตรทแบบเรียลไทม์



รูป 4.35 ตัวอย่างระบบการติดตามผลขนาดซับสเตรทแบบเรียลไทม์

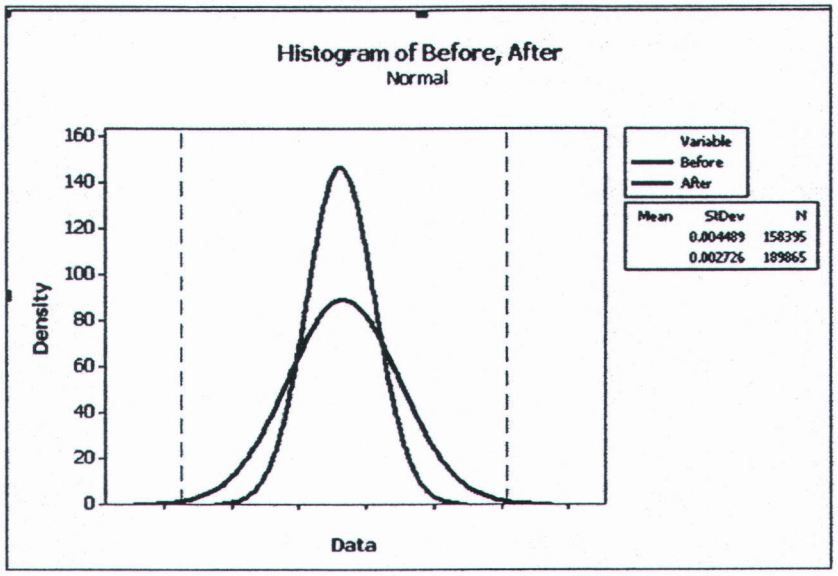
ความเร็วในการแสดงผลและการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้สามารถเพิ่มความเร็วในการปรับเปลี่ยน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลาสซับสเตท ในการป้อนเข้ากระบวนการชุบแข็งให้ถูกต้องและแม่นยำได้ทันท่วงที หมายความว่าความคลาดเคลื่อนของจัดการกระบวนการจะมีน้อยลงเท่านั้น

ซึ่งสามารถเปรียบเทียบระบบการควบคุมแบบดั้งเดิม กับระบบการควบคุมแบบใหม่ได้ดังรูป 4.36

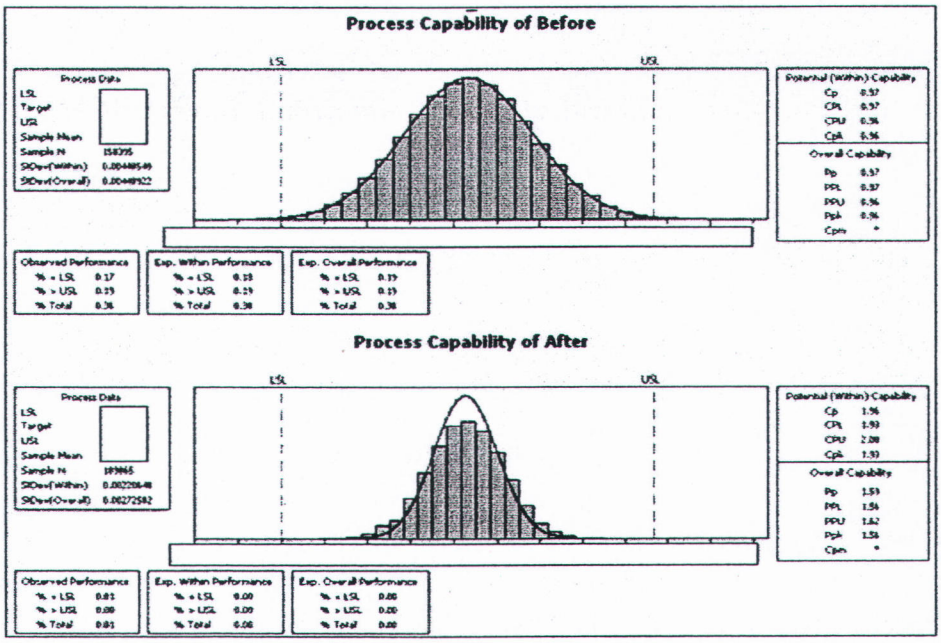


รูป 4.36 เปรียบเทียบระบบการควบคุมแบบดั้งเดิม กับระบบการควบคุมแบบใหม่

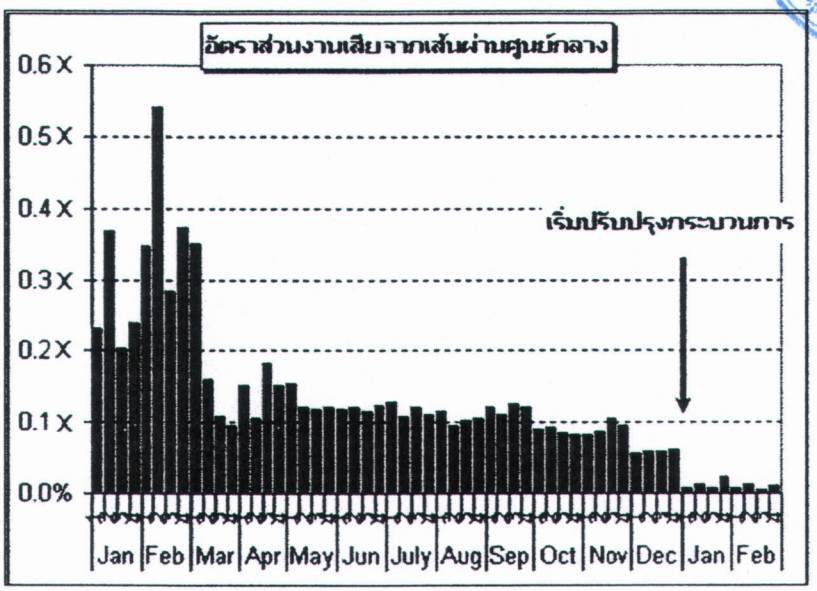
จากการปรับปรุงกระบวนการ ผู้วิจัยและทีมงานสามารถปรับปรุงความสามารถของกระบวนการ(C_{pk}) จาก 0.96 เป็น 1.56 ดังรูป 4.37 และ 4.38 และสามารถลดปริมาณงานเสียจากขนาดซับสเตรทที่ไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐานการส่งออกได้จากเดือนมกราคม 2554 ที่ 0.5X เหลือเพียงไม่เกิน 0.01X ที่เดือนกุมภาพันธ์ 2555 ดังรูป 4.39



รูป 4.37 ความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ



รูป 4.38 ความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ



รูป 4.39 อัตราส่วนงานเสียจากขนาดซับสเตรทที่ไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐานการส่งออกก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ