การควบคุมย่านความยาวคลื่นและการลดทอนกำลังแสงในกระบวนการเขียนแบรกเกรตติงบนใยแก้วนำแสง

นางสาวธาศิรัตน์ ระวิวรรณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROLS OF WAVELENGTH BANDWIDTH AND ATTENUATION IN WRITING PROCESS ON FIBER BRAGG GRATING

Miss Thasirat Rawiwan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมย่านความยาวคลื่นและการลดทอนกำลังแสงในกระบวนการเขียนแบรกเกรตติงบนใยแก้วนำแสง
โดย	นางสาวธาศิรัตน์ ระวิวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีรง ปรีชานนท์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก)

Chulalongkorn University

ธาศิรัตน์ ระวิวรรณ : การควบคุมย่านความยาวคลื่นและการลดทอนกำลังแสงในกระบวนการเขียนแบรกเกรตติงบนใยแก้วนำแสง (CONTROLS OF WAVELENGTH BANDWIDTH AND ATTENUATION IN WRITING PROCESS ON FIBER BRAGG GRATING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร, 108 หน้า.

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงความสามารถของกระบวนการสร้างแบรกเกรตติงบนเส้นใยแก้ว ดำเนินการโดย (1) วัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในเส้นใยแก้วในรูปของค่าลดทอนของแสงที่ความยาวคลื่น 1240 nm เพื่อเทียบเคียงระยะเวลาจัดเก็บ(H_2) (2) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้วในช่วง 10, 20 และ 30 วัน กำลังของแสงเลเซอร์(HV) ที่ 19, 20 และ 21 kV และจำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์ต่อรอบการบำรุงรักษา(MN) ที่ 20 และ 40 ล้านครั้ง (3) ศึกษาผลกระทบของปัจจัยตอบสนอง ได้แก่ ค่าแบนด์วิดท์(BW), ค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง(CTW) และค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm และ (4) เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่า (1) ค่าลดทอนเนื่องจากการสูญเสียก๊าซไฮโดรเจนในเส้นใยแก้ว (H_2 loss: Y) มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนวันที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้ว(X) เพิ่มด้วยด้วยอัตรา 0.0365 dB/วัน ตามสมการ $Y = -0.0365X + 5.7941$ โดยมีค่า $R^2 = 87.56\%$ (2) ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วมีผลต่อการสูญเสียก๊าซไฮโดรเจนและค่าลดทอน (3) กำลังแสงเลเซอร์มีผลต่อค่า BW และ CTW แต่ไม่ส่งผลต่อค่าลดทอน โดยที่ปัจจัย MN ไม่มีผลต่อค่า BW และค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm แต่มีผลต่อค่า CTW (4) เงื่อนไขระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วที่ 10 วัน, กำลังของแสงเลเซอร์ 19 kV และจำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษาที่ 20 ล้านครั้ง ส่งผลทำให้โอกาสในการเกิดของเสียลดลงจากเดิม 21,500 ppm เหลือ 5,000 ppm คิดเป็น 76.7% และความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.59 เป็น 1.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2557		

5470948221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: FIBBER OPTICS / BANDWIDTH / FIBER BRAGG GRATING

THASIRAT RAWIWAN: CONTROLS OF WAVELENGTH BANDWIDTH AND ATTENUATION IN WRITING PROCESS ON FIBER BRAGG GRATING. ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, 108 pp.

The purpose of this research was to improved process capability on writing process of Fiber Bragg Grating. The study was to (1) measure Hydrogen gas (H_2) in fiber optics with the relation of attenuation at 1240 nm and storage period, (3) study the effect of storage period of fiber optics at 10, 20 and 30 days, power of laser at 19, 20 and 21 kV and laser pulses after machine maintenance at 20 and 40 million pulse, (3) study the response variable as Bandwidth (BW), Center wavelength (CTW) and attenuation at 1650 nm, and (4) compare before and after study results.

The results of the study were found that (1) attenuation at 1240 nm (Y) trend to decreased with day of storage period (X) increased as the equation Y = -0.0365X + 5.7941 and R^2 = 87.6%, (2) the storage period could affected on the H_2 loss in fiber optics (3) the laser power was significant on the bandwidth(BW) and Center wavelength(CTW) but insignificant on the attenuation loss, the laser pulses could not affected on BW and attenuation loss but affected on CTW, (4) the storage of 10 days, laser power of 19 kV and laser pulses of 20 million pulse could reduce the defect per million opportunity(DPMO) before and after study from 21,500 ppm to 5,000 ppm or 76.7% decreased, but could increase the process capability(C_p) from 0.59 to 1.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Industrial Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Industrial Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2014		

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ต้องขอขอบพระคุณสำหรับความเมตตา ทั้งความรู้ คำแนะนำ และข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรง ปรีชานนท์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ กรรมการสอบ รวมถึงท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณโรงงานตัวอย่าง ที่อำนวยความสะดวกในด้านข้อมูลการทดลอง วัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง 10

สารบัญรูปภาพ 12

บทที่ 1 บทนำ 15

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา 15

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 16

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย 16

1.4. แนวทางการศึกษา 16

1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ 16

1.6. แผนการดำเนินงานวิจัย 17

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 18

2.1. แนวคิดและทฤษฎี 18

2.2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเส้นใยแก้ว [1] 19

2.2.1. โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง 19

2.2.2. คุณสมบัติใยแก้วนำแสง 20

2.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 26

3.1. การศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน 26

3.1.1 สภาพปัญหาปัจจุบัน 26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.1.2. การศึกษาสภาวะปัญหาที่คัดเลือก.......... 28
3.1.3. วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.......... 31
3.1.4 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.......... 34
3.1.5 การกำหนดระดับของปัจจัย.......... 35
3.1.6 วัสดุและอุปกรณ์.......... 36
3.2. วิธีการศึกษา.......... 38
3.2.1 การกำหนดระยะเวลาสร้างเกรตติง.......... 38
3.2.2 การศึกษาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เหลือในเส้นใยแก้ว.......... 39
3.2.3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นและค่าลดทอน.......... 40
3.2.4 การประเมินความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง.......... 43
3.2.5 การประเมินขอบเขตของระยะเวลาการจัดเก็บ.......... 44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.......... 45
4.1. ผลความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเขียนต่อค่าลดทอน.......... 45
4.2. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เหลือในเส้นใยแก้ว.......... 50
4.3. ผลการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นและการลดทอนกำลังแสง.......... 54
4.3.1. ผลของปัจจัยที่มีอแบนด์วิดท์.......... 54
4.3.3. ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าลดทอนของแสง.......... 67
4.3.4. ผลจากการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 72
4.4 ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง.......... 73
4.5 การประเมินขอบเขตของระยะเวลาการจัดเก็บ.......... 86
4.5.1. ระยะเวลาการจัดเก็บที่มีต่ออัตราการเกิดของเสีย.......... 86
4.5.2. ระยะเวลาจัดเก็บที่มีต่อค่ากำลังแสงหลังผ่านกระบวนการเขียน.......... 91
4.6 การประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์.......... 94

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 95

5.1 สรุปผลการวิจัย 95

5.2. ข้อเสนอแนะ 97

5.3. อุปสรรคปัญหาในงานวิจัย 97

5.4. ข้อจำกัดในงานวิจัย 97

รายการอ้างอิง 98

ภาคผนวก ก ข้อมูลเกี่ยวกับบริษัทตัวอย่าง 99

ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง 105

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1. 1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงานวิจัย 17

ตารางที่ 3. 1 แสดงระดับปัจจัยที่จะทำการศึกษา 42

ตารางที่ 3. 2 แสดงเงื่อนไขการทดลอง 43

ตารางที่ 4. 1 ค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนกับระยะเวลาที่ใช้ในการเขียน 46

ตารางที่ 4. 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าลดทอนเมื่อระยะเวลาในการเขียนเปลี่ยนไป 48

ตารางที่ 4. 3 ผลการวัดค่าลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน 51

ตารางที่ 4. 4 ค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) ที่ได้จากกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้ว 55

ตารางที่ 4. 5 ค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง (CTW) ที่ได้จากกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้ว 61

ตารางที่ 4. 6 แสดงค่าลดทอนที่ได้จากกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้ว 67

ตารางที่ 4. 7 แสดงระดับของปัจจัยที่เหมาะสม 73

ตารางที่ 4. 8 ผลการควบคุมปัจจัยที่ระดับ HV = 19 kV, H_2 = 10 วัน และ MN = 20±5 ล้านครั้ง 74

ตารางที่ 4. 9 โอกาสที่จะเกิดของเสียเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย 84

ตารางที่ 4. 10 ผลของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง เมื่อควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนที่ 250 วินาที, HV = 19 kV, MN = 20±5 ล้าน และระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10 วัน 85

ตารางที่ 4. 11 ค่าลดทอนจากการควบคุมปัจจัยที่ระดับ HV = 19 kV และ MN = 20±5 ล้านครั้ง โดยพิจารณาที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยเส้นใยแก้ว 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 วัน 87

ตารางที่ 4. 12 โอกาสที่จะเกิดของเสีย(DPO) ในหน่วย ppm และ % ที่คำนวณได้จากแต่ละระดับของปัจจัยเนื่องจากระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว 90

ตารางที่ 4. 13 ค่าลดทอนโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กระบวนการเขียน 92

ตารางที่ 4. 14 ตารางแสดงต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตเส้นใยแก้วนำแสง 94

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5. 1 ผลของค่าลดทอน 105

ตารางที่ 5. 2 ผลของแบนด์วิดท์...... 106

ตารางที่ 5. 3 ผลของความยาวคลื่นกึ่งกลาง 107

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง 19

รูปที่ 2. 2 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล 21

รูปที่ 2. 3 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ 21

รูปที่ 2. 4 แสดงสเปกตรัมของการลดทอน 22

รูปที่ 2. 5 โครงสร้างของการยืดตัวเนื่องจากผลของแรงดึงบนเส้นไฟเบอร์ 23

รูปที่ 3. 1 แสดงข้อมูลสัดส่วนงานเสียโดยรวมเนื่องจากวัสดุ (FBG) ที่พบจากกระบวนการภายในของลูกค้าในช่วงกรกฎาคม - ธันวาคม 2555 27

รูปที่ 3. 2 แสดงสัดส่วนงานเสียในแต่ละลักษณะที่พบโดยเฉลี่ยในช่วงเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2555 27

รูปที่ 3. 3 โครงสร้างของเส้นใยแก้วก่อน (ก) และหลัง (ข) จากการเขียน 28

รูปที่ 3. 4 ลักษณะการเขียน 29

รูปที่ 3. 5 แสดงลักษณะสเปกตรัมของเกรตติงที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (ก) และไม่สมบูรณ์ (ข)........ 29

รูปที่ 3. 6 ลักษณะของเกรตติงที่ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจาก........ 30

รูปที่ 3. 7 แผนภาพก้างปลาแสดงสามารถการเกิด 1650 Isolation Loss ไม่ได้ตามข้อกำหนด...... 31

รูปที่ 3. 8 ลักษณะการติดตั้งเส้นใยแก้วเข้ากับฐานยึด........ 32

รูปที่ 3. 9 ความสามารถของกระบวนการเมื่อพิจารณาจากค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน 34

รูปที่ 3. 10 แสดงลักษณะของ (ก) ม้วนเส้นใยแก้ว (ข) เส้นใยแก้วเป็นเทป 8 เส้นที่ผ่านการปอกส่วนป้องกันออก 36

รูปที่ 3. 11 เครื่อง Excimer Laser 37

รูปที่ 3. 12 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (OSA)........ 37

รูปที่ 3. 13 แสดงโครงสร้างของระบบการวัดขณะที่ทำการเขียน 38

รูปที่ 3. 14 การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสงหลังผ่านกระบวนการอบก๊าซไฮโดรเจน 40

รูปที่ 3. 15 แสดงค่าที่สนใจเพื่อพิจารณาผลของค่าลดทอน 41

รูปที่ 3. 16 แสดงค่าที่สนใจเพื่อพิจารณาผลของความยาวคลื่น 42

รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนและค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน 47

รูปที่ 4. 2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าลดทอนเนื่องจากไฮโดรเจน (H_2 Loss).................... 52

รูปที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดทอนและระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้วหลังผ่านการบรรจุ.. 53

รูปที่ 4. 4 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของแบนด์วิดท์... 56

รูปที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการทดลองกับส่วนตกค้างของค่าแบนด์วิดท์......................... 57

รูปที่ 4. 6 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ของค่าแบนด์วิดท์ 57

รูปที่ 4. 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแบนด์วิดท์ 58

รูปที่ 4. 8 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อแบนด์วิดท์ 59

รูปที่ 4. 9 ผลการวิเคราะห์อัตรกิริยาระหว่างปัจจัย... 60

รูปที่ 4. 10 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความยาวคลื่นกึ่งกลาง... 62

รูปที่ 4. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการทดลองกับส่วนตกค้างของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง 63

รูปที่ 4. 12 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง 64

รูปที่ 4. 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความยาวคลื่นกึ่งกลาง 64

รูปที่ 4. 14 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อความยาวคลื่นกึ่งกลาง 65

รูปที่ 4. 15 ผลการวิเคราะห์อัตรกิริยาระหว่างปัจจัย 66

รูปที่ 4. 16 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าลดทอน... 68

รูปที่ 4. 17 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการทดลองกับค่าส่วนตกค้าง 69

รูปที่ 4. 18 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ของค่าลดทอน 70

รูปที่ 4. 19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล... 70

รูปที่ 4. 20 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อค่าลดทอน 71

รูปที่ 4. 21 ผลการวิเคราะห์อัตรกิริยาระหว่างปัจจัย 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4. 22 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากผลของค่าแบนด์วิดท์ (BW) 76

รูปที่ 4. 23 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากผลของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง (CTW)... 79

รูปที่ 4. 24 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากผลของค่าลดทอน (ISO)................ 82

รูปที่ 4. 25 ความสัมพันธ์ของค่า C_p กับระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว.. 88

รูปที่ 4. 26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วกับร้อยละของ 91

รูปที่ 4. 27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาจัดเก็บกับค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน 92

รูปที่ 5. 1 แผนผังกระบวนการผลิต.. 100

รูปที่ 5. 2 ลักษณะของม้วนเส้นใยแก้วเริ่มแรก และม้วนเส้นใยแก้วหลังจากทำการตัดแบ่ง 101

รูปที่ 5. 3 การจัดเรียงตัวของเส้นเส้นใยแก้ว 102

รูปที่ 5. 4 แสดงสเปกตรัมของชิ้นงานที่ได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเขียน. 103

รูปที่ 5. 5 แสดงสเปกตรัมของชิ้นงานที่ได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดที่กระบวนการตรวจสอบ 104

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเส้นใยแก้วนำแสงถือว่ายังไม่เป็นที่รู้จักมากนักในประเทศไทย เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตก็เป็นเรื่องค่อนข้างใหม่ เนื่องด้วยในอดีตประเทศไทยยังไม่ได้มีความต้องการเกี่ยวกับอุปกรณ์เส้นใยแก้วนำแสงมากนัก แต่การขยายของสังคมเมืองที่มากขึ้นและการปรับเปลี่ยนรูปแบบสังคมมนุษย์เข้าสู่ยุคของการสื่อสาร เหล่านี้ล้วนนำไปสู่ความต้องการทางด้านการสื่อสารที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคตจึงจำเป็นอย่างยิ่ง การได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องการผลิตของอุตสาหกรรมเส้นใยแก้วนำแสงจึงเป็นสิ่งใหม่ที่น่าสนใจและเป็นส่วนหนึ่งที่จะเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านการสื่อสารให้กับประเทศชาติได้ โครงข่ายคมนาคมที่มีการนำอุปกรณ์เส้นใยแก้วออฟ ติกมาใช้แทนสายโลหะเป็นส่วนใหญ่หรือทั้งหมดตั้งแต่เครือข่ายผู้ให้บริการจนถึงผู้ใช้งานหรือที่เรียกว่า Fiber to the home (FTTH) เทคโนโลยีเหล่านี้มีการใช้งานในหลายประเทศไม่ว่าจะเป็น อเมริกา เกาหลี จีน และญี่ปุ่นซึ่งมีการใช้งานมากที่สุด ในโซนประเทศแถบอาเซียนได้แก่ ไทย อินโดนีเซีย ก็เริ่มมีการติดตั้งระบบเส้นใยแก้วนำแสงและนำมาใช้จริงแล้วในปัจจุบัน

ผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้มีชื่อว่า Fiber Bragg Grating หรือ FBG เป็นตัวกรองแบบเกรตติงชนิดสะท้อนแสงทำให้แสงเกิดการกระจายตัวและสะท้อนกลับเป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณทางแสงและสะท้อนกลับความยาวคลื่นที่สนใจ(ความยาวคลื่นแบรก)กลับไปยังผู้ให้บริการ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ ตัวชี้วัดคุณภาพที่สนใจจึงเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการสะท้อนกลับความความยาวคลื่นเบรก เนื่องจากตัว FBG ทั้งในรูปของความยาวคลื่นและค่าลดทอนของสัญญาณแสงที่แสดงถึงความสมบูรณ์ของการสะท้อนกลับ ความแตกต่างของเทคโนโลยีที่เราเคยรู้จักกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงถือเป็นปัญหาสำคัญในการควบคุมคุณภาพ รวมทั้งพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องยากที่จะพิจารณาความเชื่อมโยงของผลจากแต่ละปัจจัย ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นในเรื่องของการหาสาเหตุที่แท้จริงเพื่อนำไปสู่การลดลงของปัญหางานเสียที่เกิดในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเส้นใยแก้วในส่วนของการสร้าง FBG รวมทั้งอธิบายพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพ และแนวทางในการแก้ไขเพื่อสามารถนำไปใช้ปฏิบัติจริง

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของ FBG ต่อค่าลดทอนเนื่องจากเกรตติงที่ความยาวคลื่น 1650 nm
2) เพื่อปรับปรุงความสามารถของกระบวนการโดยพิจารณาจากค่า C_p มากขึ้นกว่า 50%

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาเฉพาะเส้นใยแก้วแบบโหมดเดี่ยว
2) ศึกษาผลของช่วงความยาวคลื่นที่ระดับค่าลดทอน 24 dB เท่านั้น
3) ศึกษาเฉพาะผลกระทบต่อค่าทางแสงในส่วนของค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm
4) สำหรับการผลิตโดยใช้เครื่องเลเซอร์ชนิด Excimer Laser

1.4. แนวทางการศึกษา

1) ศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน และประเมินความสามารถของกระบวนการ
2) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
3) กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่สนใจเพื่อใช้ในการศึกษาแนวโน้มของผลกระทบ
4) ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design
5) ดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลตามแผนการทดลองที่วางไว้
6) อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
7) กำหนดแนวทางในการปฏิบัติ และการควบคุมกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ได้จริง
8) ดำเนินการตามแนวทางผลการวิจัย
9) เก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง และประเมินความสามารถของกระบวนการ
10) สรุปผลการศึกษา จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ

1) สามารถระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าลดทอนของกำลังแสงในย่านความยาวคลื่น 1650 nm (1650 Isolation Loss) ที่เหมาะสมได้
2) สามารถพัฒนาความสามารถของกระบวนการเขียน

โดยมีการปรับเพิ่มขึ้นของค่า C_p จากการประเมินกระบวนการในส่วนของค่าลดทอนกำลังแสงเนื่อง Fiber Bragg Grating หลังจากทำการปรับปรุงอย่างน้อย 50% จากเดิม 0.59 เป็น 1.14 หลังการปรับปรุง

1.6. แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1. 1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2555			2556											
		ต.ค	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย.	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค.
1	ศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน และประเมินความสามารถของกระบวนการ	■	■	■												
2	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย				■	■	■									
3	กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่สนใจเพื่อใช้ในการศึกษาแนวโน้มของผลกระทบ							■	■							
4	ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design								■							
5	ดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลตามแผนการทดลองที่วางไว้									■	■					
6	อภิปรายผลการทดลอง และสรุปผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง											■				
7	กำหนดแนวทางในการปฏิบัติ และการควบคุมกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ได้จริง											■				
8	ดำเนินการตามแนวทางผลการวิจัย												■			
9	เก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง และประเมินความสามารถของกระบวนการ													■	■	
10	สรุปผลการศึกษา จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													■	■	■

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1. แนวคิดและทฤษฎี

ความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้มีความต้องการในการแลกเปลี่ยนข่าวสารและข้อมูลเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการระบบสื่อสารด้วยแสง (Optical communication system) ซึ่งสามารถส่งข่าวสารและข้อมูลต่างๆ ได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกันจึงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบการสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารที่ใช้สายเคเบิลที่ทำด้วยโลหะแล้วมีข้อดีต่างๆ ที่เกิดจากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสง คือ

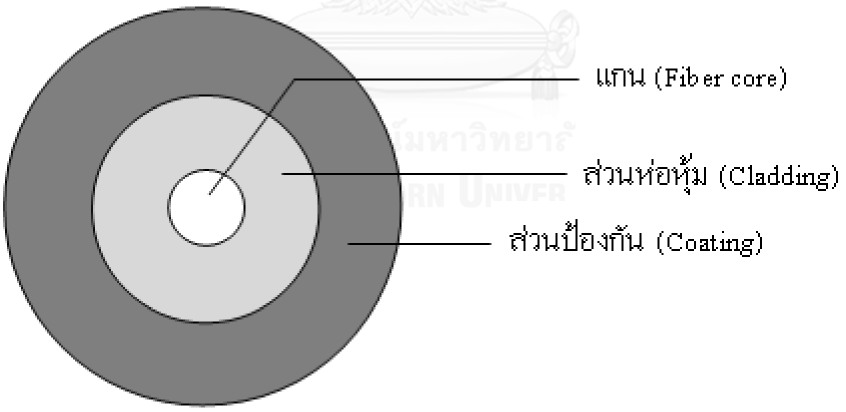
1) ให้แบนวิดท์ที่กว้าง สามารถรองรับสัญญาณที่มีความถี่สูงอยู่ในช่วง 10^{13} - 10^{14} ในขณะที่ความถี่ของคลื่นวิทยุ 10^{6} - 10^{9} จะเห็นได้ว่าแบนวิดท์ของสัญญาณกว้างขึ้นกว่า 1 ล้านเท่า
2) ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวสามารถแทนคู่สายทองแดงขนาดใหญ่แต่ละคู่ได้ เช่น สายเคเบิลทางโทรศัพท์ที่มี 1,000 คู่สาย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-10 เซนติเมตรจะสามารถใช้เคเบิลใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร แทนได้ในการส่งช่องสัญญาณจำนวนที่เท่ากัน
3) การสูญเสียต่ำ ใยแก้วนำแสงมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการลดทอนน้อยกว่าสายเกลียวคู่ (Twisted Pair) หรือหุ้มฉนวน (Coaxial Cable)
4) ไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากใยแก้วนำแสงไม่ได้สร้างจากเส้นลวดโลหะเหมือนสายเคเบิลโลหะแต่สร้างจากแก้ว (Glass) หรือซิลิคอน (Silicon) ดังนั้นจึงไม่ถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
5) คงทนและไม่ถูกรบกวนโดยสภาพดินฟ้าอากาศ แล้วหรือซิลิคอนมีความแข็งกว่าโลหะถึง 20 เท่า โดยที่ซิลิคอนหรือแก้วเป็นธาตุเฉื่อย ดังนั้นสภาพแวดล้อมจึงมีผลน้อยกว่าการใช้งานสายที่ทำด้วยโลหะ

6) มีความปลอดภัย ในระบบสายโลหะจำเป็นต้องป้องกันอันตรายให้กับอุปกรณ์หรือมนุษย์จากไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างสาย หรือระหว่างสายกับสายดิน ซึ่งเมื่อใช้เส้นใยแก้วนำแสงแล้วจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้
7) ราคาถูก ราคาของเส้นใยแก้วนำแสงในปัจจุบันมีราคาต่ำลงเรื่อยๆ ในขณะที่ราคาของสายโลหะมีราคาเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติราคาของการออกแบบระบบที่ใช้ใยแก้วนำแสงมีราคาต่ำกว่าระบบแบบใช้โลหะ

2.2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเส้นใยแก้ว [1]

2.2.1. โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง

ส่วนประกอบของใยแก้วนำแสงประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือส่วนที่เป็นแกนอยู่ตรงกลางหรือชั้นในแล้วหุ้มด้วยส่วนที่เป็นแคลด แล้วถูกหุ้มด้วยส่วนป้องกัน (Coating) โดยที่แต่ละส่วนนั้นทำด้วยวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้ก็เพราะต้องคำนึงถึงหลักการหักเหและสะท้อนกลับหมดของแสง



รูปที่ 2. 1 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสง

แกน : เป็นส่วนตรงกลางของเส้นใยแก้วนำแสง และเป็นส่วนนำแสง โดยดัชนีหักเหของแสงส่วนนี้ต้องมากกว่าของส่วนแคลดแล้วลำแสงที่ผ่านไปในแกนจะถูกขังหรือเคลื่อนที่ไปตามเส้นใยแก้วนำแสงด้วยขบวนการสะท้อนกลับหมดภายใน

ส่วนป้องกัน : เป็นชั้นที่ต่อจากแคลดเป็นที่กันแสงจากภายนอกเข้าเส้นใยแก้วนำแสง และกันแสงจากเส้นใยแก้วนำแสงออกข้างนอก และยังใช้ประโยชน์เมื่อมีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง โครงสร้างอาจจะประกอบไปด้วยชั้นของพลาสติกหลายๆ ชั้น นอกจากนั้นส่วนป้องกันยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการกระทำจากแรงภายนอกอีกด้วย ตัวอย่างของค่าดัชนีหักเหเช่น แกนมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.48 ส่วนของแคลดและส่วนป้องกันซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงจากแกนออกภายนอก และป้องกันแสงภายนอกรบกวนจะมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.46 และ 1.52 ตามลำดับ (P. 10 เครือข่ายใยแก้วนำแสง) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.2.2. คุณสมบัติใยแก้วนำแสง

<u>การลดทอน</u>

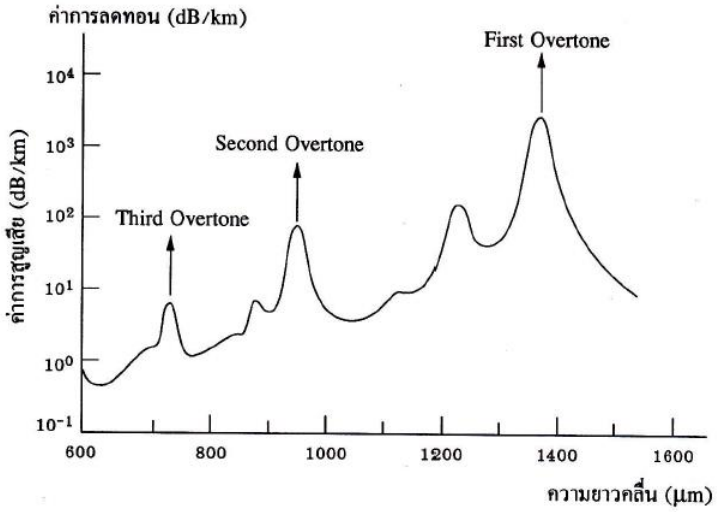
กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (P_i) ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงยาว L กิโลเมตร กำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง (P_o) เมื่อพิจารณาที่ $P_o < P_i$ โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient, α) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร แทนด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$\alpha L = -10 \text{ Log } \frac{P_o}{P_i} \quad \text{.. (1)}$$

การลดทอนกำลังของแสงที่เกิดขึ้นมีผลมาจากการดูดกลืนแสงในส่วนของแกนหรือแคลด, การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสง

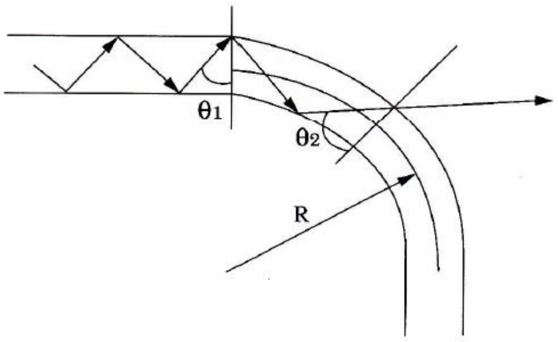
1) การดูดกลืนของวัสดุ แก้วซิลิการที่บริสุทธิ์จะดูดกลืนแสงน้อยอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.8 ถึง 1.6 ไมครอน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเลือกไปใช้งานทางด้านการสื่อสารการดูดกลืนแบบนี้จะมีค่ามากบริเวณความยาวคลื่นในช่วง อัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) และอินฟราเรด (Infrared, IR)
2) การสะท้อนเรย์ลี การดูดกลืนของใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งขึ้นอยู่กับการสะท้อนของแสงที่เกิดจากใยแก้วนำแสงที่มีค่าดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของ

การดูดกลืนชนิดเรย์ลี (Rayleigh, α_R) จะเท่ากับ 1/(4 ของค่ากำลังแสงที่เกิดจากการสะท้อนเรย์ลี ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล

3) การสูญเสียจากการโค้งงอ การสูญเสียแบบโค้งงอ (Bending Loss) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การโค้งงอชนิดมหภาคหรือแมคโครแบนด์ (Macrobend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งมากกว่า 10 มิลลิเมตร และการโค้งงอชนิดจุลภาคหรือไมโครเบนด์ (Microbend) ที่รัศมีส่วนโค้งน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ชนิดแมกโครเบรด์เกิดเมื่อเส้นใยแก้วม้วนอยู่รอบหลอดม้วน เนื่องมาจากการถูกโค้งงอตามมุมต่างๆ เกิดการสูญเสียในลักษณะที่ทำให้รังสีของแสงที่เคลื่อนที่ตรงบริเวณที่โค้งงอมีแสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างแกนและแคลดที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤตจึงทำให้รังสีของแสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้วนำแสง



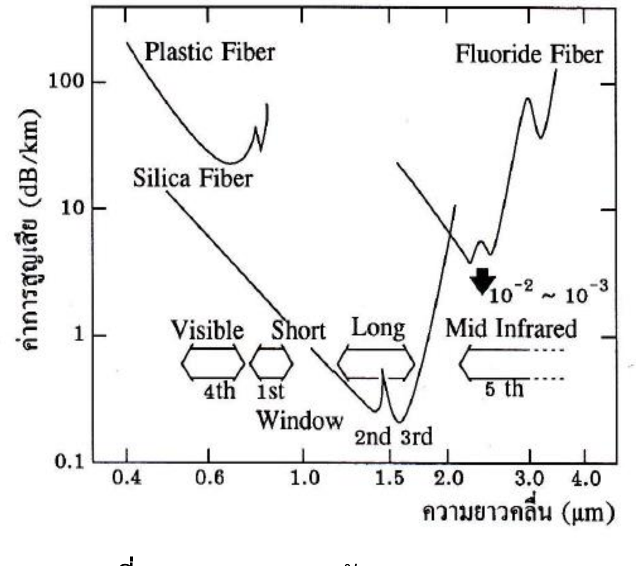
θ_1 และ θ_2 คือมุมตกกระทบของลำแสงภายในใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2. 3 แสดงทางเดินของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การลดทอนของสัญญาณแสงจะมีค่าต่ำสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ และถ้าผลต่างของดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลดมีค่ามากก็จะทำให้การสูญเสียมีค่าสูง เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวที่ทำงานที่ความยาวคลื่นยาวๆ จะไวต่อการสูญเสียจากการโค้งงอ และเส้นใยแก้วที่ถูกันอยู่รอบแกนม้วนที่รัศมี 10 เซนติเมตร สามารถแก้ไขได้ ส่วนการโค้งงอชนิดไมโครเบนด์เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างทางเรขาคณิตของเส้นใยแก้วนำแสงในกระบวนการผลิต เช่น รัศมีของแกน จุดต่อระหว่างแกน และแคลดที่ขรุขระ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต นอกจากนั้นการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้นก็ทำให้แสงบางส่วนกระจายออกมาจากเส้นใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน

4) สเปกตรัมของการลดทอน



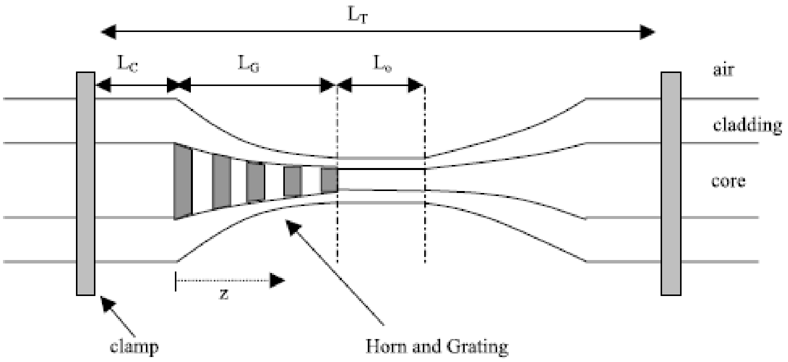
รูปที่ 2. 4 แสดงสเปกตรัมของการลดทอน

จากรูปแสดงที่ 2.4 ให้เห็นว่าช่วงความยาวคลื่นที่มีการสูญเสียต่ำจะมีอยู่ 3 ช่วงคือ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 850, 1300 และ 1550 นาโนเมตร ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างกัน คือที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรนั้นจะใช้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) และการตรวจวัด ส่วนที่ความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร จะใช้กับระบบเครือข่ายความเร็วสูง (High Speed LAN) และการสื่อสาร ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร จะใช้กับงานด้านการสื่อสาร

2.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tunable chirp in Bragg gratings written in tapered core fiber [2]

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอผลของแรงที่มีต่อการเลื่อนของความยาวคลื่นกลาง (λ_C) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Chirp grating (เกรตติงที่ระยะห่างระหว่างช่องเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากัน) ทำการทดลองโดยการให้แรงกับไฟเบอร์พบว่าเทคนิคของการให้แรงแก่เส้นไฟเบอร์สามารถใช้ในการปรับการกระจายของเกรตติงไฟเบอร์ได้ ซึ่งเป็นจริงตามทฤษฎีของพฤติกรรมไฟเบอร์ที่ว่าถ้ามีแรงเค้นดึงมากระทำต่อเส้นไฟเบอร์ ความเครียดจำนวนมากจะเกิดขึ้นในช่วงปลายของไฟเบอร์ที่หดเล็ก หลังจากนั้นความยาวคลื่น Bragg ในช่วงเล็กๆ ตอนปลายจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นมากชดเชยให้กับ index gradient ในแกนไฟเบอร์ นั่นคือค่าดัชนีหักเหของแสงในแกนไฟเบอร์จะลดลงเมื่อขนาดเส้นไฟเบอร์ลดลง โดยตัวแปรค่าดัชนีหักเหสามารถลดลง 0.1% เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นไฟเบอร์ลดลง 50% ดังแสดงในสมการที่ 2



รูปที่ 2. 5 โครงสร้างของการยืดตัวเนื่องจากผลของแรงดึงบนเส้นไฟเบอร์

$$\lambda_B(Z) = \lambda_B(0)$$

เมื่อ $\lambda_B(0)$ คือ ความยาวคลื่น Bragg

$n_{eff}(0)$ คือ ค่าดัชนีหักเหของเกรตติงเริ่มต้น $\lambda_B(0) = 2\Lambda n_{eff}(0)$

Λ คือ uniform period

$\lambda_B(Z)$ คือ ความยาวคลื่น Bragg หลังจากมีการให้แรงแก่ไฟเบอร์จนมียืดไปเป็นระยะ Z

$n_{eff}(Z)$ คือ ค่าดัชนีหักเหของเกรตติงเริ่มต้น

Analysis on the effect of UV beam intensity profile on the refractive index modulation in phase mask based fiber Bragg grating writing [3]

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาผลของรูปแบบความเข้มแสง UV ของการกระจายตัวบริเวณขอบและผลกระทบที่มีต่อการปรับเปลี่ยนดัชนีหักเหของ Fiber bragg grating(FBGs) โดยการใช้เทคนิคแบบช่องเปิดหลายช่อง สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าดัชนีหักเหบนเส้นไฟเบอร์ได้แก่

2) ดัชนีหักเหเฉลี่ย (n_avg) และการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห (n_mod) ที่ระยะห่างจาก phase mask ที่แตกต่างกันถือว่ามีความแตกต่างกันด้วย
3) รูปแบบของรังสี UV ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความแตกต่างของรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห (index modulation profile)
4) รูปแบบการสะท้อนกลับของ FBG (FBG reflection profile) มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของ n_mod และ n_avg

การจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลของโครงสร้างเส้นใยแก้วเกรตติ้งที่ถูกเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อความยาวคลื่นแบร็ก [4]

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอผลกระทบของโครงสร้างทางกายภาพต่อความยาวคลื่นแบร็กโดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอุปกรณ์ในเทอมของจุดกึ่งกลางความยาวคลื่นแบร๊กเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ อิเล็กโทรด(อะลูมิเนียม), ความหนาชั้นฟิล์มของซิงค์ออกไซด์, เส้นใยแก้ว และแบร็กเกรตติง

ผลการศึกษาพบว่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร็กมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ค่อยๆ ลดลงเนื่องจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนาของอิเล็กโทรดที่เป็นอะลูมิเนียมด้านในและด้านนอกเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.1 – 0.9 ไมโครเมตรพบว่าความหนาของอิเล็กโทรดด้านนอกมีอิทธพลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแบร็กมากกว่าเมื่อความหนาของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น สำหรับผลของความหนาของซิงค์ออกไซด์พบว่าอุปกรณ์ที่มีความหนาของซิงค์ออกไซด์ต่างกัน 2 กับ 4 ไมโครเมตรทำให้จุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร็กมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.7 ไมโครเมตร สำหรับผลของความยาวของตัวทรานสดิวเซอร์ที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 2 มม. – 50 มม. ให้ผลลัพธ์ของการเลื่อนจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร็กลดลงจาก 1556.5 nm เป็น 1552.25 nm อธิบายได้จากการเพิ่มความยาวทรานสดิวเซอร์เป็นการเพิ่มพื้นที่การแพร่กระจายคลื่นเสียง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคับปลิ้งพลังงานลดลง นั่นคือส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแบร็กลดลงด้วย และสุดท้ายในส่วนผลของรัศมีของเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 62.5 ไมโครเมตรทำให้จุดกึ่งกลางความยาวคลื่นแบร็กลดลงจาก 1557.25 เป็น 1554.75 นาโนเมตร ลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเส้นใยแก้วที่มี

ขนาดใหญ่ขึ้น โอกาสที่พลังงานจะถูกลดทอนลงตามระยะทางก็จะมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานรวมในส่วนของคอร์มีค่าลดลด เป็นต้นเหตุให้ความยาวคลื่นแบร็กลดลงไปด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

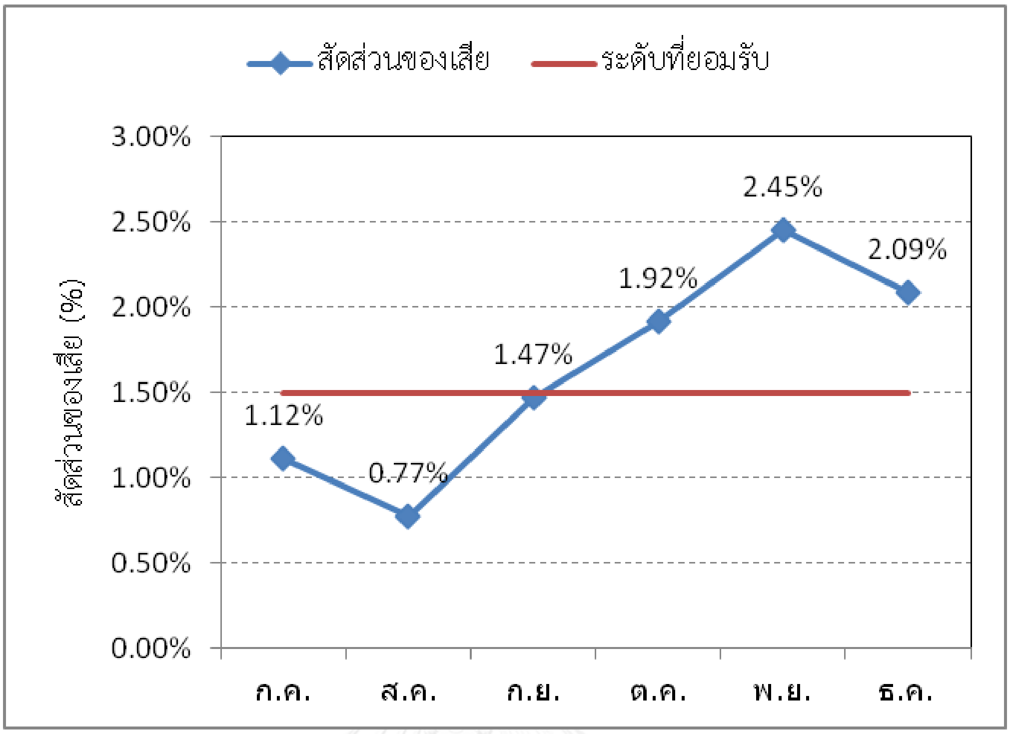
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้วนำแสงหรือ Fiber Bragg Grating (FBG) ที่มีต่อค่าทางแสงในส่วนของ 1650 Isolation Loss ภายใต้เงื่อนไขของปัจจัยที่แตกต่างกัน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วยในการศึกษาผลของแต่ละปัจจัย เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการ และลดข้อบกพร่องของชิ้นงานภายในกระบวนการ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1. การศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน

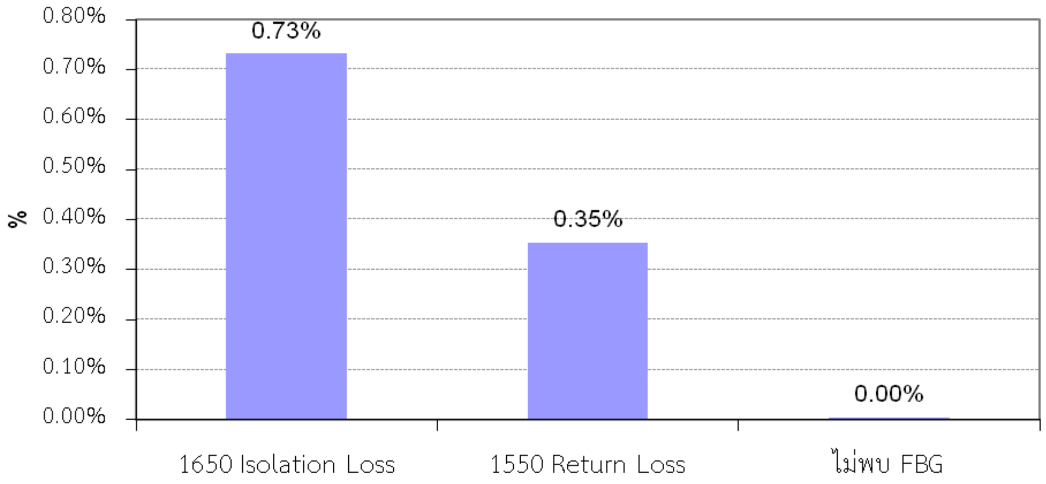
3.1.1 สภาพปัญหาปัจจุบัน

กระบวนการผลิต FBG ที่สนใจศึกษานี้เป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ปัญหาข้อบกพร่องหลักจึงเป็นในส่วนของค่าทางแสงไม่ได้ตามข้อกำหนดซึ่งจะพบได้ที่กระบวนการตรวจสอบ และเนื่องจากเป็นการสุ่มตรวจสอบจึงทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดถูกส่งไปยังลูกค้ามากเกินกว่าเปอร์เซ็นที่ลูกค้าสามารถยอมรับได้ ตามข้อกำหนดของลูกค้าโดยปกติจะสามารถยอมรับเปอร์เซ็นของเสียที่หลุดไปถึงได้ไม่เกิน 1.50 % แต่ปัญหาในปัจจุบันมีงานเสียจำนวนมากกว่าข้อกำหนดหลุดไปถึงลูกค้าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนตุลาคมเป็นต้นมา และเพิ่มสูงขึ้นถึง 2.45% ในเดือนพฤศจิกายน หรือเฉลี่ยในช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคมคิดเป็น 2.15% หรือคิดเป็นอัตราการเกิดของเสีย 21,500 ppm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความไม่พึงพอใจของลูกค้า



รูปที่ 3. 1 แสดงข้อมูลสัดส่วนงานเสียโดยรวมเนื่องจากวัสดุ (FBG) ที่พบจากกระบวนการภายในของลูกค้าในช่วงกรกฎาคม - ธันวาคม 2555

โดยปัญหาข้อบกพร่องที่ส่งผลกระทบหลักคือคุณลักษณะของค่าทางแสงไม่ได้ตามข้อกำหนด แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ ค่าลดทอนเนื่องจากการสะท้อนกลับของเกรตติงที่ความยาวคลื่น 1650 nm (1650 Isolation Loss), ค่าลดทอนเนื่องจากการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1550 nm(1550 Return Loss) และสำหรับกรณีที่ไม่พบ FBG ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 แสดงสัดส่วนงานเสียในแต่ละลักษณะที่พบโดยเฉลี่ยในช่วงเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2555

งานเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าทางแสงไม่ได้ตามกำหนดไม่สามารถแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนได้ จำเป็นต้องทำการแยกทิ้งเท่านั้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียค่าใช้จ่ายในช่วงเดือนกรกฎาคม-ธันวาคมคิดเป็น 464,400 บาท โดยประเภทงานเสียที่พบเป็นสัดส่วนสูงที่สุดคือ ค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm(1650 Isolation Loss) คิดเป็นร้อยละ 0.73 ของงานที่ผลิตทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงจะมุ่งเน้นในการแก้ปัญหาค่าทางแสงไม่ได้ตามข้อกำหนดในส่วนของค่า 1650 Isolation Loss

3.1.2. การศึกษาสภาวะปัญหาที่คัดเลือก

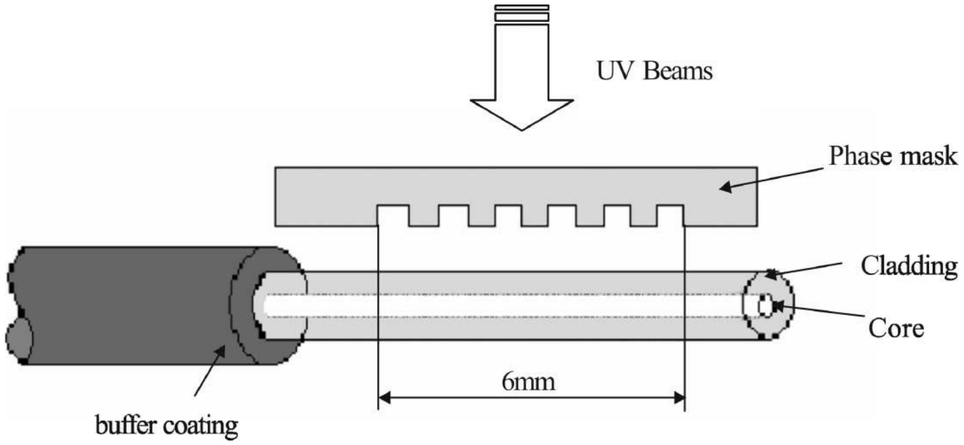
คุณสมบัติของแสงในส่วนของ 1650 Isolation Loss (1.65ISO) คือ ค่าการสูญเสียที่เกิดเนื่องจากการสะท้อนกลับของแสงในส่วนที่เป็นเกรตติงในช่วงความยาวคลื่น 1650±6 nm หรือที่เรียกว่า FBG ดังแสดงในรูปที่ 3.3. เป็นตัวบ่งบอกความสมบูรณ์ของตัวเกรตติงที่ถูกสร้างขึ้นในกระบวนการผลิต

(ก) (ข)

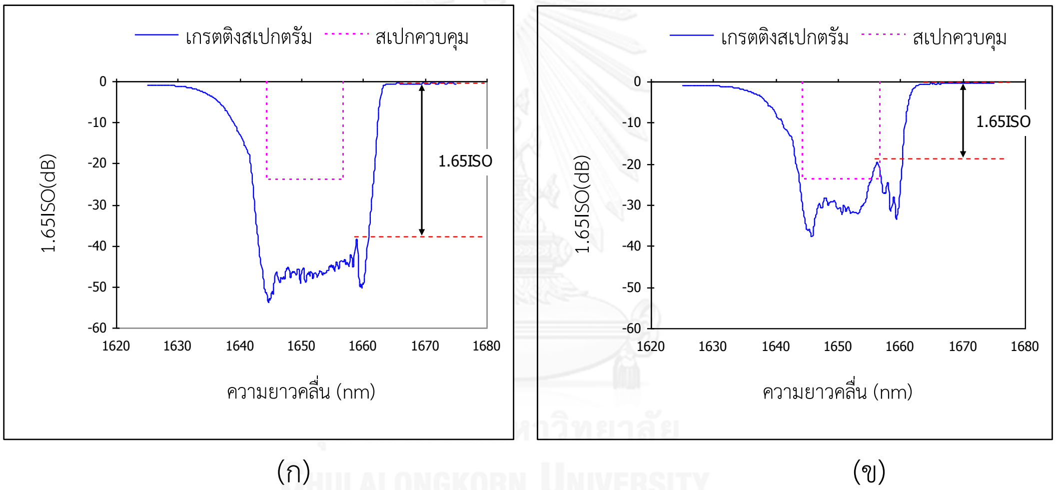
รูปที่ 3. 3 โครงสร้างของเส้นใยแก้วก่อน (ก) และหลัง (ข) จากการเขียน

ที่กระบวนการเขียนเส้นใยแก้วจะถูกนำมาติดตั้งเข้ากับฐานยึดที่ระดับเดียวกับตัวแม่แบบเกรตติง(Phase Mask) หลังจากนั้นจะทำการฉายแสงเลเซอร์ย่าน UV (UV Beam) กำลังสูงผ่านแม่แบบทำให้เกิดเกรตติงบนเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 14 ในขณะเดียวกันก็พิจารณาความสมบูรณ์ของตัวเกรตติงผ่านค่า 1.65ISO จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม และยุติกระบวนการเมื่อสเปกตรัมของเกรตติงครอบคลุมสเปกควบคุมสำหรับค่า 1.65ISO ดังแสดงในรูปที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

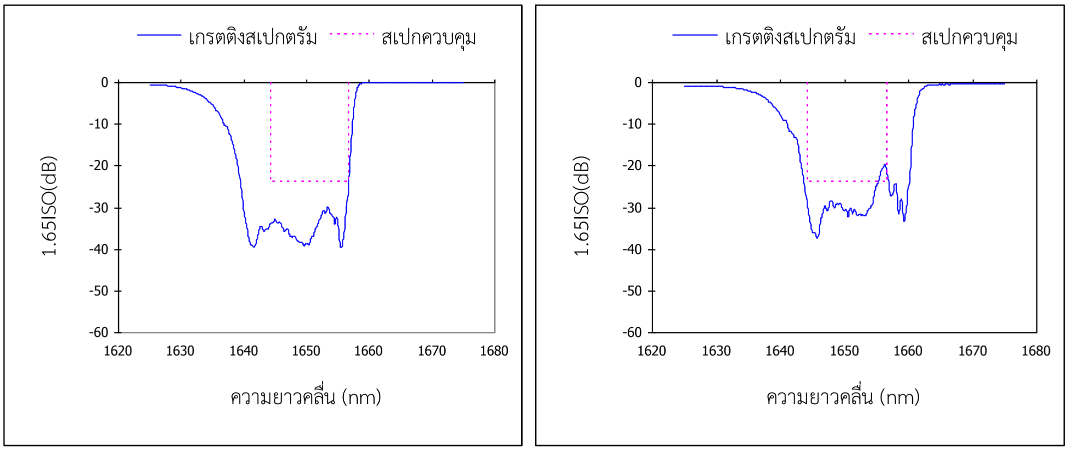


รูปที่ 3. 4 ลักษณะการเขียน



รูปที่ 3. 5 แสดงลักษณะสเปกตรัมของเกรตติงที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (ก) และไม่สมบูรณ์ (ข)

ค่าทางแสง 1.65ISO ได้จากการพิจารณาความลึกน้อยสุดของสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1650±6 nm โดยเกรตติงที่เกิดได้อย่างสมบูรณ์จะให้ค่า 1.65ISO > 33 dB สำหรับลักษณะของเกรตติงที่เกิดไม่สมบูรณ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะหลักๆ คือ การเลื่อนของกราฟผิดปกติ และค่า 1.65ISO ไม่ได้ตามข้อกำหนดดังแสดงในรูปที่ 3.6



(ก) (ข)

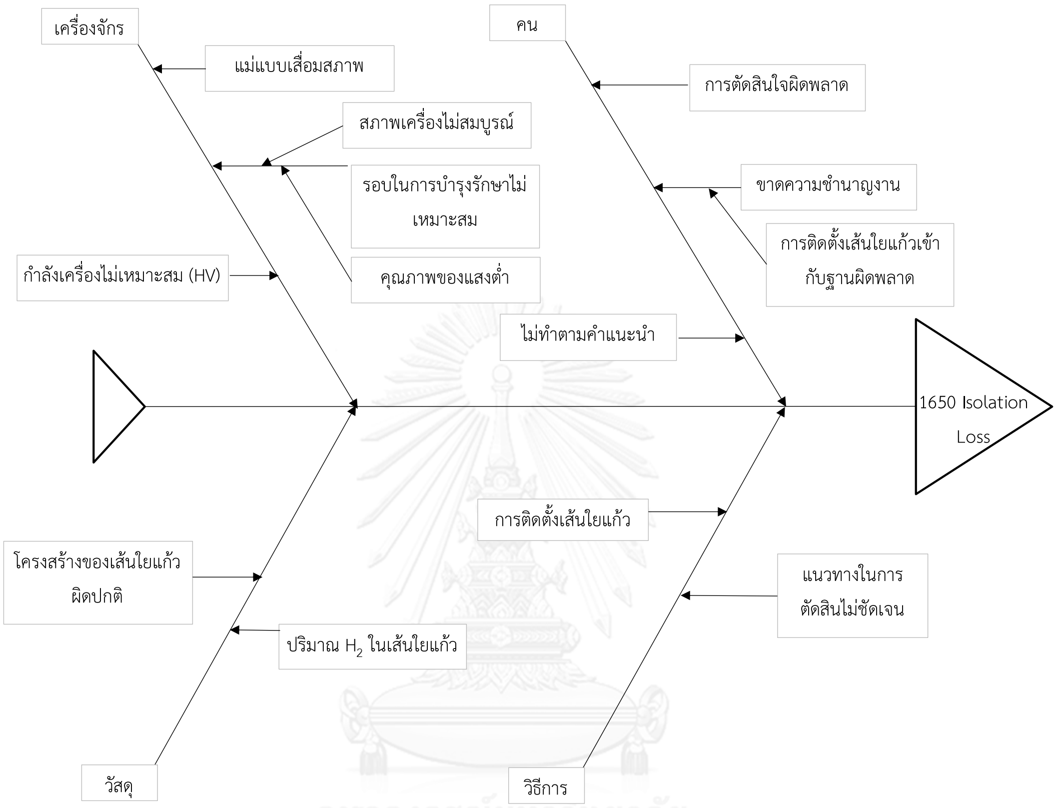
รูปที่ 3. 6 ลักษณะของเกรตติงที่ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจาก
(ก) การเลื่อนของกราฟผิดปกติ
(ข) ค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm ไม่ได้ตามข้อกำหนด

จากรูปที่ 3.6 แสดงลักษณะที่เกรตติงที่ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจาก 2 ลักษณะคือ รูป (ก) จะสังเกตเห็นเส้นกราฟทางด้านขวามือเลยเข้ามาในขอบเขตของสเปกควบคุมเป็นลักษณะของความกว้างกราฟไม่เพียงพอ ส่งผลต่อค่าทางแสง ความผิดพลาดในลักษณะอาจเกิดได้จากหลายปัจจัย ทั้งในด้านของเครื่องจักรไม่สมบูรณ์, พนักงานเลือกเวลาเขียนผิดพลาด เป็นต้น สำหรับของเสียในรูป (ข) เป็นลักษณะของความลึกของกราฟไม่ได้ตามข้อกำหนดสังเกตได้จากลักษณะของพีคสูงด้านขวามือล้ำเข้าไปในขอบเขตควบคุม ความผิดพลาดในลักษณะนี้อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ ทั้งในแง่ของแม่แบบเกรตติงผิดปกติ, ค่ากำลังของเครื่องจักรต่ำหรือสูงเกินไป หรืออาจเป็นผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่คงเหลือในเส้นใยแก้ว เป็นต้น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1.3. วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากลักษณะปัญหาที่พบในกระบวนการผลิต ทำการนำมาวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แผนภาพก้างปลา ดังรูปที่ 3.7



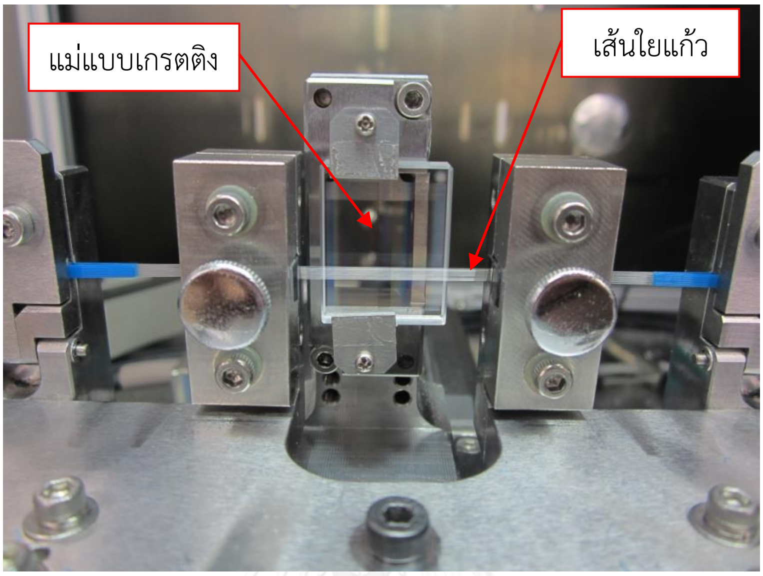
รูปที่ 3. 7 แผนภาพก้างปลาแสดงสามารถการเกิด 1650 Isolation Loss ไม่ได้ตามข้อกำหนด

พิจารณาจากแผนภาพก้างปลา สามารถอธิบายสาเหตุของการเกิดของเสียในส่วนของ 1650 Isolation Loss ไม่ได้ตามข้อกำหนด ได้ดังนี้

1) สาเหตุที่เกิดเนื่องจากคน ประกอบด้วย

1.1) การตัดสินใจผิดพลาด เนื่องมาจากที่กระบวนการเขียน ในแต่ละลอทการผลิตสามารถผลิตได้ลอทละ 16 เส้น แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของระบบการวัดค่าทางแสง ทำให้ตรวจสอบสเปกตรัมที่เกิดขึ้นได้เพียง 4 เส้นหรือคิดเป็น 25% ของแต่ละลอทการผลิต ทั้ง 4 เส้นไม่สามารถดูพร้อมกันได้ พนักงานต้องตัดสินใจเพื่อหยุดกระบวนการเขียนในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยไล่ลำดับให้ได้ตามข้อกำหนดให้ครบทั้ง 4 เส้นแล้วจึงหยุดการทำงานของเครื่องเลเซอร์ การตัดสินใจผิดพลาดที่จะหยุดก่อนหรือหลังเวลาที่เหมาะสมจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะ 1.65ISO

1.2) การติดตั้งเส้นใยแก้ว ก่อนเริ่มต้นกระบวนการเขียน พนักงานจะทำการติดตั้งเส้นใยแก้วเข้ากับฐานและยึดด้วยสกรู ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถ้าการติดตั้งทำให้เส้นใยแก้วไม่ขนานกับแม่แบบเกรตติง จะส่งผลต่อสเปกตรัมมีลักษณะผิดรูป และไม่สามารถได้ค่าเป้าหมายตามที่กำหนด



รูปที่ 3. 8 ลักษณะการติดตั้งเส้นใยแก้วเข้ากับฐานยึด

2) สาเหตุที่เกิดเนื่องจากเครื่องจักร ประกอบด้วย

2.1) รอบในการบำรุงรักษาไม่เหมาะสม ส่งผลให้คุณภาพของแสงเลเซอร์ต่ำ นั่นคือความเข้มแสงที่ออกมาจากเครื่องเลเซอร์ไม่สม่ำเสมอทำให้เส้นใยแก้วบางเส้นในแต่ละลอทการผลิตมีค่า 1.65ISO ต่ำกว่าค่าควบคุมที่กำหนด

2.2) แม่แบบเสื่อมสภาพ เนื่องจากแม่แบบที่ใช้ในการเขียนเป็นช่องสลิตขนาดเล็กกว่า 1 um เมื่อมีฝุ่นหรือวัสดุภายนอกไปสัมผัสจะทำให้แบบร่างในการเขียนคลาดเคลื่อน และส่งผลโดยตรงต่อการเขียนไม่สมบูรณ์ และค่า 1.65ISO

2.3) กำลังเครื่องไม่เหมาะสม กำลังของเครื่องจักรในที่นี้คือเครื่องเลเซอร์ที่ทำการฉายแสง UV เพื่อสร้างเกรตติงบนเส้นใยแก้ว ในกรณีที่กำลังของเครื่องจักรมากหรือน้อยเกินไปอาจส่งผลต่อความเสถียรของแสงเลเซอร์และประสิทธิภาพในการเขียน

3) สาเหตุที่เกิดเนื่องจากวัสดุ ประกอบด้วย

3.1) โครงสร้างของเส้นใยแก้วผิดปกติ เนื่องมาจากกระบวนการผลิตเส้นในแก้วในส่วนของคอร์ เกรตติงที่เกิดขึ้นในส่วนของคอร์ที่ผิดปกติ ส่งผลต่อค่าทางแสง 1.65ISO โดยตรง

3.2) ปริมาณไฮโดรเจนก๊าซ (H_2) ในเส้นใยแก้ว เส้นใยแก้วที่จะนำมาสร้างเกรตติงจำเป็นต้องเพิ่มความว่องไวต่อแสง UV โดยการอัดก๊าซไฮโดรเจนที่ความดันสูงหลังจากนั้น เส้นใยแก้วที่มี H_2 อยู่

จะถูกจัดเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิต่ำ 32.5±2.5 $^{\circ}C$ เพื่อลดอัตราการแพร่กระจายของโมเลกุล H_2 ระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บอาจส่งผลต่อปริมาณ H_2 ในเส้นใยแก้วและความว่องไวต่อแสง และมีผลต่อค่า 1.65ISO ในกระบวนการเขียน

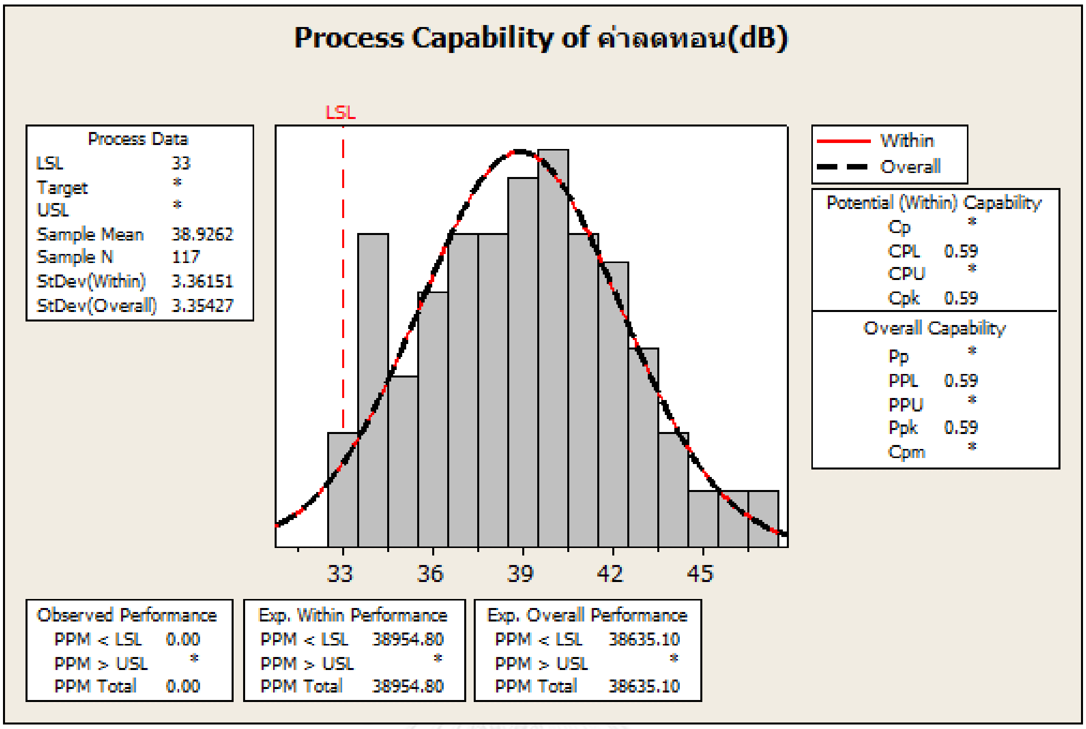
4) สาเหตุที่เกิดเนื่องจากวิธีการ ประกอบด้วย

4.1) แนวทางในการตัดสินไม่ชัดเจน เป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลต่อการตัดสินใจของพนักงานในการหยุดกระบวนการเขียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพนักงานที่ไม่มีความชำนาญการอาจทำให้เกิดการตัดสินใจผิดพลาดของพนักงานเพิ่มสูงขึ้น

4.2) วิธีการติดตั้งเส้นใยแก้ว วิธีการที่ใช้การยึดด้วยสกรูอาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการติดตั้ง ทำให้เส้นใยแก้วและแม่แบบอยู่ในตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเขียนและค่า 1.65ISO

จากการศึกษาสภาพปัจจุบันตัวอย่างข้อมูลจากเดือนธันวาคม 2555 พบว่า ค่ากำลังการลดทอนของสัญญาณแสง หรือ 1650 Isolation loss ที่กระบวนการเขียนมีความสามารถของกระบวนการต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีค่า C_{pk} เพียง 0.59 และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 38.92 dB พิจารณาจากรูปที่ 3.9 พบว่ามีข้อมูลกระจายตัวต่ำกว่าข้อกำหนด รวมทั้งการกระจายตัวที่ค่อนข้างกว้าง จำเป็นต้องทำการปรับปรุงกระบวนการในส่วนของการปรับลดการกระจายตัวของข้อมูลเป็นหลัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3. 9 ความสามารถของกระบวนการเมื่อพิจารณาจากค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน

3.1.4 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ในกระบวนการเขียนที่สนใจทำการศึกษา เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยแก้วโดยใช้เครื่องจักรที่มีการฉายแสงเลเซอร์ผ่านแม่แบบเกรตติง ลงบนเส้นใยแก้วที่ผ่านกระบวนการอัดก๊าซไฮโดรเจนเพื่อเพิ่มความว่องไวต่อแสง โดยพนักงานมีหน้าที่ในการติดตั้งเส้นใยแก้วเข้ากับฐานยึด จะเห็นได้ว่าปัจจัยในด้านพนักงานและวิธีการมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับตัวชิ้นงานน้อยมาก แต่ในส่วนของเครื่องจักรและวัสดุมีผลต่อตรงต่อค่าลดทอน(1.65ISO) ที่สนใจ โดยสามารถเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้โดยการพิจารณาจาก

1) สามารถปรับตั้งค่าและควบคุมโดยเครื่องจักรได้
2) สามารถทำการปรับเปลี่ยนและทดลองได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิต
3) สอดคล้องกับผังการวิเคราะห์แบบก้างปลา เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องที่สนใจ
4) สามารถเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยเหล่านั้นได้อย่างน้อย 2 ระดับ

ดังนั้นปัจจัยที่คัดเลือกจึงเป็นปัจจัยที่ใช้ในการปรับตั้งค่าเครื่องจักร คือ กำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) และระยะเวลาในการบำรุงรักษา รวมถึงปัจจัยในด้านของวัสดุ คือ ระยะเวลาการ

จัดเก็บเส้นใยแก้วหลังผ่านการอบก๊าซไฮโดรเจนที่ความดันสูง ซึ่งจะมีผลต่อการปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่บรรจุอยู่ในเส้นใยแก้ว โดยแต่ละปัจจัยสามารถจัดลำดังความสำคัญได้ดังนี้

1) กำลังของเครื่องเลเซอร์ (High voltage: HV) เนื่องจากเครื่องเลเซอร์ใช้ไฟฟ้ากำลังสูงเพื่อสร้างแสงเลเซอร์ การปรับเปลี่ยน HV จึงอาจส่งผลโดยตรงต่อกำลังของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้น กำลังของแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการเขียนโดยแสงเลเซอร์กำลังสูงมีโอกาสสร้างเกรตติงได้ดีกว่าแสงเลเซอร์ที่กำลังต่ำกว่า

2) ระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสง หรือปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เนื่องจากเส้นใยแก้วจำเป็นต้องมีความว่องไวต่อแสงเพียงพอที่จะสามารถใช้แสงเลเซอร์ในการเขียนบนเส้นใยแก้วได้ โดยในงานวิจัยนี้ทำการเพิ่มความว่องไวของแสงโดยการอัด H_2 ที่ความดันสูงแล้วจึงนำออกมาจัดเก็บในตู้เย็นที่ความดันบรรยากาศ นั่นคือก๊าซไฮโดรเจนมีโอกาสแพร่ออกจากเส้นใยแก้วได้มากขึ้นตามระยะเวลาในการจัดเก็บ ทำให้ความว่องไวต่อแสงของเส้นใยแก้วลดลง และส่งผลต่อความสามารถในการเกิดเกรตติง

3) ระยะเวลาในการบำรุงรักษา เนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ถูกฉายออกมาจากเครื่องจำเป็นต้องผ่านอุปกรณ์จำพวกเลนส์สะท้อนแสง บีบ และขยายเป็นจำนวนมาก การฉายแสงเป็นระยะเวลานานๆ ส่งผลให้อุปกรณ์เหล่านี้เกิดรอยไหม้เนื่องจากความร้อนจากแสงเลเซอร์เอง และสิ่งสกปรก ฝุ่น ผงต่างๆ อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการเขียนลดลงตามระยะเวลาการบำรุงรักษา ส่งผลต่อความสามารถในการเขียนบนเส้นใยแก้ว

3.1.5 การกำหนดระดับของปัจจัย

ปัจจัยที่สนใจนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น

1) ปัจจัยที่สามารถกำหนดได้โดยการตั้งค่าเครื่องจักร คือ กำลังของเครื่องเลเซอร์ (HV) พิจารณาจากข้อมูลเชิงเทคนิค และขอบเขตการใช้งานจากคู่มือเครื่องจักร โดยช่วงของค่า HV ตามที่คู่มือแนะนำให้ใช้งานอยู่ในช่วง 19-21 kV
2) ปัจจัยของอายุการใช้งานของเครื่องจักรและวัสดุ คือ ระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสง และระยะเวลาในการบำรุงรักษาตามลำดับ

- สำหรับระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสง พิจารณาจากข้อกำหนดของฝ่ายผลิต ซึ่งกำหนดอายุของเส้นใยแก้วที่มี H_2 อยู่ที่ไม่เกิน 30 วัน

- สำหรับระยะเวลาในการบำรุงรักษา พิจารณาจากขอบเขตของการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เนื่องจากในแต่ละผลิตและชุดใช้เวลาในการผลิตโดยเฉลี่ยประมาณ 5 นาที โดยใช้ความถี่ในการยิงแสงเลเซอร์ที่ระดับ 200 Hz คิดเป็น 60,000 ครั้งต่อการยิงในแต่ละลอท โดยเพื่อแบ่งระดับปัจจัยให้การผลิตห่างกันประมาณ 1-2 วัน จำเป็นต้องผลิตประมาณ 300-350 รอบ นั่นคือแต่ละระดับของ

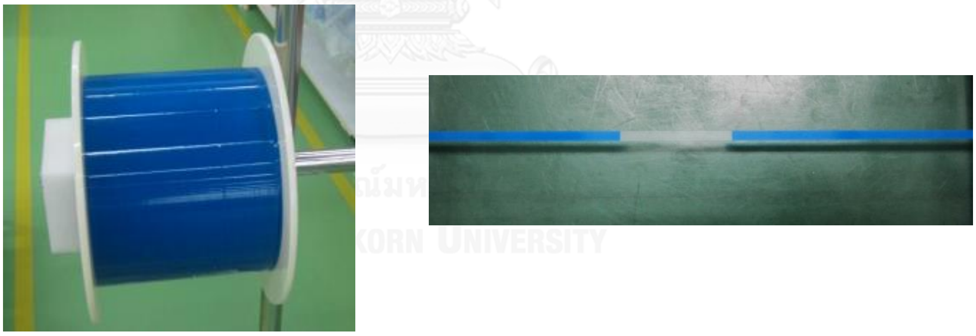
ปัจจัยควรห่างกันประมาณ 20 ล้านครั้งสำหรับการยิงแสงเลเซอร์ ดังนั้นจะพิจารณาจากจำนวนครั้งที่เครื่องเลเซอร์ยิงแสงที่ 20 และ 40 ล้านครั้ง

จากข้อมูลดังกล่าวจึงได้พิจารณาเลือกระดับของปัจจัยได้ดังนี้

1) กำลังของเครื่องเลเซอร์ แบ่งเป็น 3 ระดับคือ 19, 20 และ 21 kV
2) ระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้วหลังผ่านการอัด H_2 แบ่งเป็น 3 ระดับคือ 10, 20 และ 30 วัน
3) จำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา แบ่งเป็น 2 ระดับคือ 20±5 และ 40±5 ล้านครั้ง

3.1.6 วัสดุและอุปกรณ์

1) เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว(Single mode) เป็นเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นเทปเรียงกัน 8 เส้น ราคาต่อเทปคิดเป็นเมตรละ 32 บาทหรือคิดเป็นราคาต่อเส้นเมตรละ 4 บาท เส้นใยแก้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูงและถูกเก็บรักษาในตู้เย็นเพื่อลดอัตราการแพร่ออกของก๊าซไฮโดรเจน หลังจากนั้นเส้นใยแก้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการปอกส่วนป้องกัน (Coating) ออกโดยใช้ใบมีดขนาดเล็ก และเช็ดทำความสะอาดด้วยสารเคมี ดังแสดงในภาพที่ 3.10 (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 3. 10 แสดงลักษณะของ (ก) ม้วนเส้นใยแก้ว (ข) เส้นใยแก้วเป็นเทป 8 เส้นที่ผ่านการปอกส่วนป้องกันออก

2) เครื่อง Excimer Laser รุ่น LPX Pro 220F ผลิตแสงเลเซอร์ย่าน UV กำลังสูง มีการผลิตแสงเลเซอร์แบบไม่ต่อเนื่องที่ระดับความถี่ 200 Hz โดยใช้เป็นเครื่องจักรหลักที่กระบวนการเขียน ในแต่ละครั้งในการผลิตมีขนาด Batch size = 16 เส้น ถ้ากำหนดเวลาที่ใช้สร้างเกรตติง 250 วินาทีคิดเป็นการยิงแสงเลเซอร์จำนวน 50,000 ครั้งต่อแบตซ์ และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในส่วนของสาธารนูป

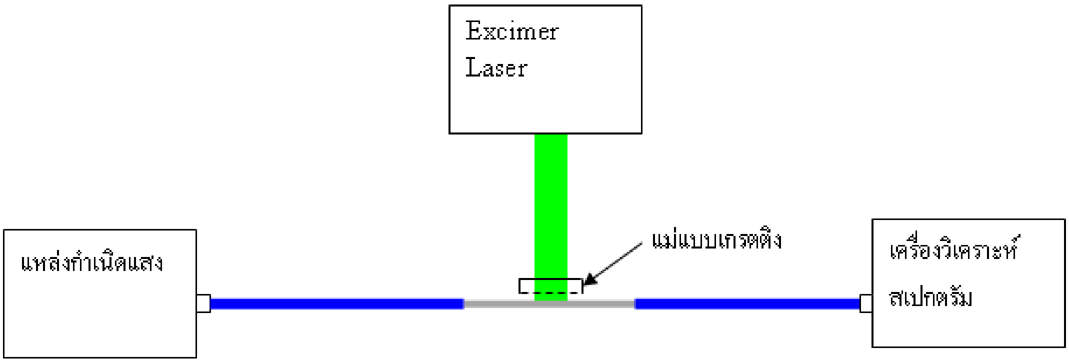
โภคทั้งในส่วนของการใช้ก๊าซ และค่าเสื่อมของเลนส์รวมคิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 575 บาทต่อแบตซ์ หรือคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยอยู่ที่ราคา 36 บาท

รูปที่ 3. 11 เครื่อง Excimer Laser

3) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Optical Spectrum Analyzer: OSA) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น AQ6370C ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสง

รูปที่ 3. 12 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (OSA)

4) แหล่งกำเนิดแสง ยี่ห้อ FIBER-LABS รุ่น SLD-1650-08-C ให้แสงที่ย่านความยาวคลื่น 1650 nm เพื่อใช้ในการส่งผ่านเส้นใยแก้วขณะทำการเขียนไปสู่การวิเคราะห์สเปกตรัมโดยใช้เครื่อง OSA



รูปที่ 3. 13 แสดงโครงสร้างของระบบการวัดขณะที่ทำการเขียน

5) แม่แบบเกรตติง เป็นลักษณะของแถบร่องสลิตซึ่งออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับสร้างเกรตติงบนเส้นใยแก้วนำแสง

3.2. วิธีการศึกษา

3.2.1 การกำหนดระยะเวลาสร้างเกรตติง

กระบวนการเขียนแบรกเกรตติงบนเส้นใยแก้วนำแสงเป็นการเขียนบนเส้นใยแก้วโดยการฉายแสงเลเซอร์ผ่านแม่แบบเกรตติงซึ่งสามารถควบคุมเวลาในการฉายแสงได้โดยพิจารณาจากค่าลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 1650 nm ซึ่งมีค่าเป้าหมายที่ ≥33 dB ทั้งนี้เพื่อการกำหนดระยะเวลาการเขียนที่เหมาะสม การทดลองนี้จะทำการเก็บข้อมูลจากสภาพปัจจุบันที่ระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วไม่เกิน 30 วัน, ระดับกำลังเครื่องเลเซอร์ 19 ถึง 21 kV และจำนวนครั้งในการยิงแสงเลเซอร์หลังจากผ่านการบำรุงรักษาไม่เกิน 40 ล้านครั้ง โดยทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ตามวิธีดังนี้

1) การเก็บข้อมูล

ดำเนินการเก็บค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm แบ่งตามระยะเวลาที่ใช้ในการเขียน 150, 200, 250,… ,450 กลุ่มละ 30 ตัวอย่าง

2) การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์แนวโน้มข้อมูลจากการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนที่เหมาะสมเพื่อจะทำให้ได้ค่าลดทอนมากกว่า 33 dB

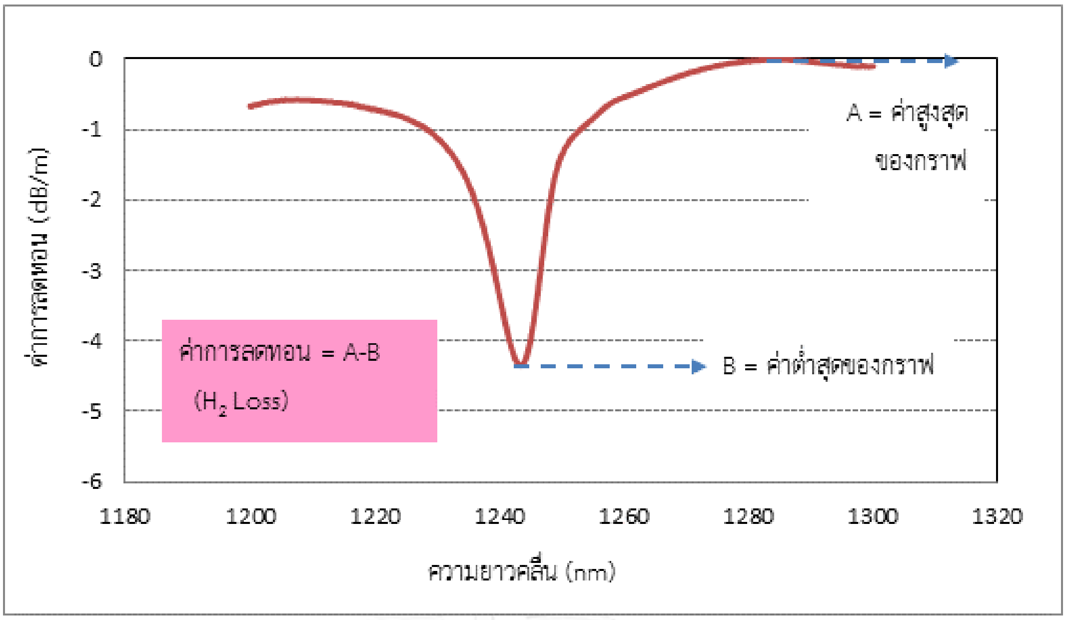
3.2.2 การศึกษาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เหลือในเส้นใยแก้ว

ในกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยแก้วโดยการเขียน เส้นใยแก้วจะต้องผ่านกระบวนการเตรียมวัสดุเพื่อเพิ่มความว่องไวต่อแสงโดยการอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูง และถูกนำมานำมาจัดเก็บไว้ในตู้เย็นที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ -30 ถึง -35 องศาเซลเซียส โดยอายุการใช้งานกำหนดที่ไม่เกิน 30 วัน นับจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบก๊าซไฮโดรเจน สำหรับในบางกรณีที่กระบวนการผลิตไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่องในกรณีที่มีการหยุดทำงานช่วงเทศกาล ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของเส้นใยแก้วหมดอายุ จำเป็นต้องกำจัดทิ้งไม่สามารถนำเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตได้ จึงต้องการทำการศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของเส้นใยแก้วเกินกำหนด โดยทำการทดลองดังนี้

1) ศึกษาพารามิเตอร์ทดแทนเพื่อใช้ในการอ้างอิงปริมาณไฮโดรเจนคงเหลือ

ในกระบวนการจริง ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการทำงานคือปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในเส้นใยแก้ว แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนทำให้ไม่สามารถทราบปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่แน่นอนได้ ทั้งนี้การอ้างอิงเวลาในการจัดเก็บถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาได้อย่างหยาบ แต่ยังไม่ละเอียดพอที่ยืนยันผลสำหรับกรณีที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วเกินกำหนด หรือการเกิดปัญหาในกรณีที่ในการจัดเก็บคลาดเคลื่อนจากข้อกำหนด เพื่อให้สามารถใช้พารามิเตอร์นี้ในยืนยันความสามารถของเส้นใยแก้วต่อการใช้งานได้ โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาค่าลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉพาะ (ค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1240 nm) ซึ่งเส้นใยแก้วที่ผ่านการอัดก๊าซไฮโดรเจนและถูกน้ำมาจัดเก็บไว้ในตู้เย็นโดยยังไม่ผ่านกระบวนการเขียน โดยพิจารณาค่าลดทอนดังแสดงในรูปที่ 3.14.

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงหลังจากผ่านกระบวนการอัดก๊าซไฮโดรเจนแล้ว จะมีค่าลดทอนเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 1240 nm เนื่องจากการเกิดของพันธะ OH^- เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน (H_2) สร้างพันธะกับเส้นใยแก้วนำแสง (SiO_2) ค่าลดทอนที่ได้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในช่วงความยาวคลื่น 1240 nm



รูปที่ 3. 14 การลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสงหลังผ่านกระบวนการอบก๊าซไฮโดรเจน

2) การออกแบบการทดลอง

เก็บผลของค่าลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน (H_2 Loss) ตามระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้ว โดยเก็บข้อมูลทุกวัน โดยทำ 4 ซ้ำ นำเส้นใยแก้วที่วัดค่าแล้วนำไปผ่านกระบวนการเขียน พิจารณาแนวโน้มของค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน(1650 Isolation Loss) เทียบกับ การลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน (H_2 Loss) ดูความสัมพันธ์และพิจารณาแนวโน้มที่เกิดขึ้นเพื่อหาระยะเวลาการจัดเก็บที่เป็นไปได้ซึ่งไม่กระทบต่อค่าลดทอนเนื่องจากเกรตติง โดยพิจารณาจากข้อกำจัดของลูกค้าที่ค่าลดทอน 1650 Isolation Loss ≥ 33 dB ที่กระบวนการเขียน

3.2.3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นและค่าลดทอน

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นและค่าลดทอน การทดลองนี้จะพิจารณาจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ค่ากำลังของเครื่องเลเซอร์, ผลของก๊าซไฮโดรเจนโดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้ว และผลของการบำรุงรักษาเครื่องจักรโดยพิจารณาจากจำนวนครั้งในการยิงแสงเลเซอร์(ล้านครั้ง) ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์และทำการออกแบบการทดลองดังนี้

1) การเตรียมเครื่องเลเซอร์

เครื่องเลเซอร์ที่ใช้ในการเขียนเป็นประเภท Excimer Laser รุ่น LPX Pro 220F ผลิตแสงเลเซอร์ย่าน UV แบบไม่ต่อเนื่อง โดยปล่อยแสงออกมาเป็นครั้งด้วยความถี่ที่ 200 Hzสามารถ

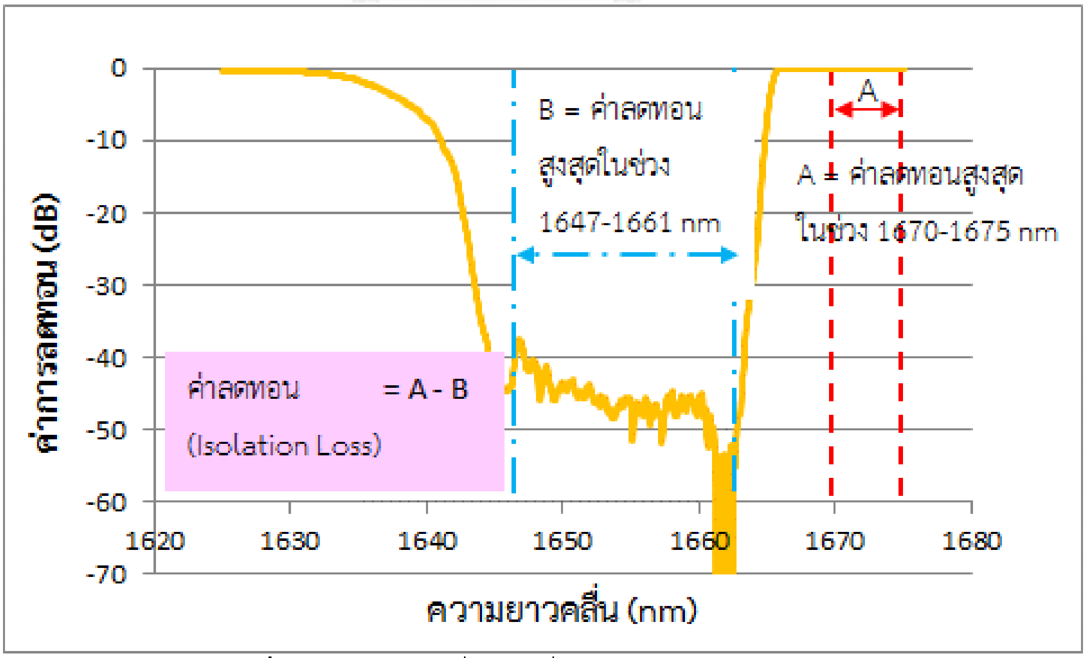
ปรับค่ากำลังของเครื่องได้ตั้งแต่ 19-22 kV โดยมีรอบในการบำรุงรักษาอย่างคร่าวๆ โดยพิจารณาจากสัดส่วนของเสียที่เพิ่มขึ้นที่กระบวนการผลิต ทั้งนี้สามารถวัดได้จากตัวนับครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิง ในการกำหนดระดับของผลการบำรุงรักษาเครื่องจักรจะพิจารณาจากจำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังจากทำการบำรุงรักษา โดยเริ่มนับ 0 ใหม่เมื่อมีการบำรุงรักษา

2) การเตรียมเส้นใยแก้วเพื่อใช้ในการทดสอบ

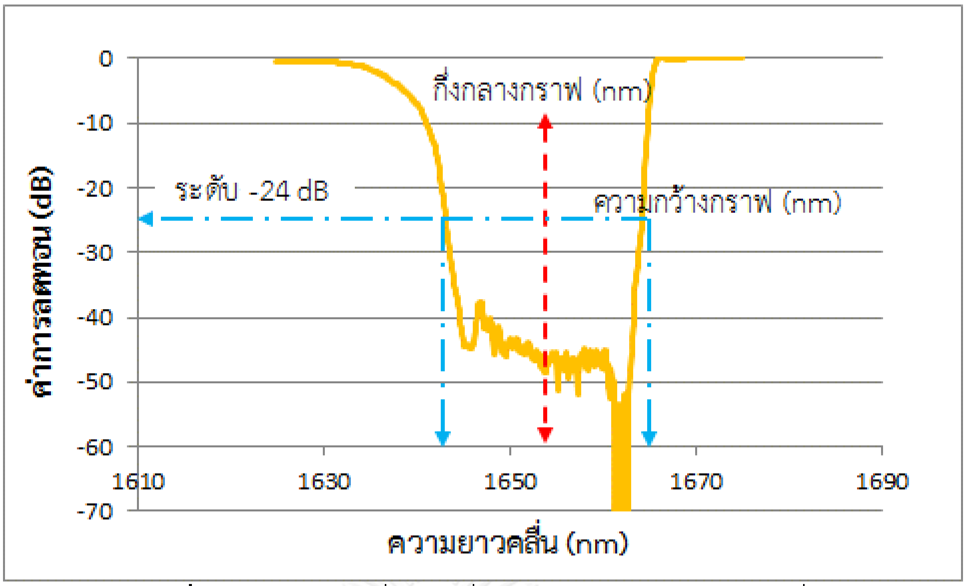
เส้นใยแก้วที่ผ่านการอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูงจะถูกนำมาจัดเก็บไว้ในตู้เย็นที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ -30 ถึง -35 องศาเซลเซียส เพื่อลดอัตราการแพร่ออกของก๊าซไฮโดรเจนออกจากเส้นใยแก้ว และกำหนดระยะเวลาในการจัดเก็บโดยนับจากวันที่เสร็จสิ้นกระบวนการอบ และถูกนำมาจัดเก็บในตู้เย็น โดยจะใช้เป็นระยะเวลาของเส้นใยแก้วที่ถูกจัดเก็บ เส้นใยแก้วที่ถูกจัดเก็บ ณ เวลาต่างๆ จะถูกนำออกมาสร้างเกรตติงโดยการฉายแสง UV ผ่านแม่แบบเกรตติง

3) วิธีการวัดและเก็บค่าตัวอย่าง

ในขณะที่แสงเลเซอร์กำลังฉายผ่านแม่แบบ จะค่อยๆ เกิดเกรตติงบนเส้นใยแก้ว โดยเกรตติงที่เกิดบนเส้นใยแก้วนี้จะทำหน้าที่สะท้อนกลับความยาวคลื่นในย่าน 1650 nm ทำให้เกิดค่าการสูญเสียกำลังของแสง หรือค่าลดทอนที่ความยาวคลื่นนั้นเรียกว่า ค่า 1650 Isolation Loss การพิจารณาความสมบูรณ์ของเกรตติงที่เกิดขึ้นจะพิจารณาได้จากเมื่อสเปกตรัมของค่าลดทอนครอบคลุมความยาวคลื่น 1650±6 nm ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และพิจารณาค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง และแบนด์วิดท์ที่ระดับค่าลดทอนที่ 24 dB ดังแสดงในดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3. 15 แสดงค่าที่สนใจเพื่อพิจารณาผลของค่าลดทอน



รูปที่ 3. 16 แสดงค่าที่สนใจเพื่อพิจารณาผลของความยาวคลื่น

4) ปัจจัยควบคุมอื่นๆ

ที่กระบวนการเขียน ค่าลดทอนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เลเซอร์ฉายแสง หรือที่เรียกว่า “เวลาในการเขียน” ดังนั้นจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยของเวลาการเขียนที่กระบวนการเขียนด้วย โดยในการทดลองนี้จะควบคุมเวลาที่ใช้ในการเขียนให้อยู่ที่ 250±10 วินาที

5) การออกแบบการทดลอง

เพื่อพิจารณาผลของแต่ละปัจจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design ตามระดับของปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3. 1 แสดงระดับปัจจัยที่จะทำการศึกษา

ปัจจัย	ระดับ	สัญลักษณ์	ต่ำ	กลาง	สูง
กำลังของเครื่องเลเซอร์ (kV)	3	HV	19	20	21
ระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	3	H_2	10	20	30
จำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา (ล้านครั้ง)	2	MN	20±5	-	40±5

ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขเพื่อยืนยันผลการทดลอง สามารถออกแบบการทดลองออกมาดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 แสดงเงื่อนไขการทดลอง

ลำดับ	ปัจจัยที่สนใจ		
	H_2 (วัน)	HV (kV)	MN (ล้านครั้ง)
1	10	19	20±5
2	10	19	40±5
3	10	20	20±5
4	10	20	40±5
5	10	21	20±5
6	10	21	40±5
7	20	19	20±5
8	20	19	40±5
9	20	20	20±5
10	20	20	40±5
11	20	21	20±5
12	20	21	40±5
13	30	19	20±5
14	30	19	40±5
15	30	20	20±5
16	30	20	40±5
17	30	21	20±5
18	30	21	40±5

3.2.4 การประเมินความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง

ประเมินความสามารถของกระบวนการโดยแยกพิจารณาตามผลของตัวแปรตาม แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ สำหรับข้อมูลที่มีข้อกำหนดด้านต่ำได้เดียวจะประเมินความสามารถของกระบวนการด้วยค่า C_{pl} ได้แก่ แบนด์วิดท์, และค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm สำหรับข้อมูลที่มีทั้งขอบเขตบนและล่างจะประเมินความสามารถของกระบวนการด้วยค่า C_p คือ ความยาวคลื่นกึ่งกลาง ตามสมการที่ (2) และ (3)

$$C_{pl} = \frac{\mu_x - LSL}{3\sigma_x} \quad \text{...(2)}$$

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad \text{...(3)}$$

3.2.5 การประเมินขอบเขตของระยะเวลาการจัดเก็บ

ศึกษาระยะเวลาการจัดเก็บที่เหมาะสมเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดของเสียโดยพิจารณาจากความสามารถของกระบวนการที่ทำให้พบโอกาสในการเกิดของเสียน้อยกว่าร้อยละ 1.5 รวมถึงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าลดทอนที่ค่าเป้าหมาย ≥33 dB

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิตสิ่งที่สำคัญที่สุดคือการควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อชิ้นงานและความสามารถของกระบวนการ และเมื่อเราทราบถึงปัจจัยที่มีหรือไม่มีผลกระทบแล้วก็จะทำให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การได้มาซึ่งปัจจัยที่มีผลนั้นต้องผ่านการทดลองเพื่อศึกษาอย่างละเอียด และในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลอง โดยเป็นการพิจารณาปัจจัยที่มีโอกาสส่งผลต่อค่าลดทอนของแสงเนื่องจากเกรตติงในช่วงความยาวคลื่น 1650 nm ทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2), กำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) และจำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา(MN) ผ่านการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการแบบ Full Factorial Design นอกเหนือจากนี้ยังศึกษาถึงข้อจำกัดของบางปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการในระยะยาวเพื่อประโยชน์ในการใช้งานจริง สามารถพิจารณาจากผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

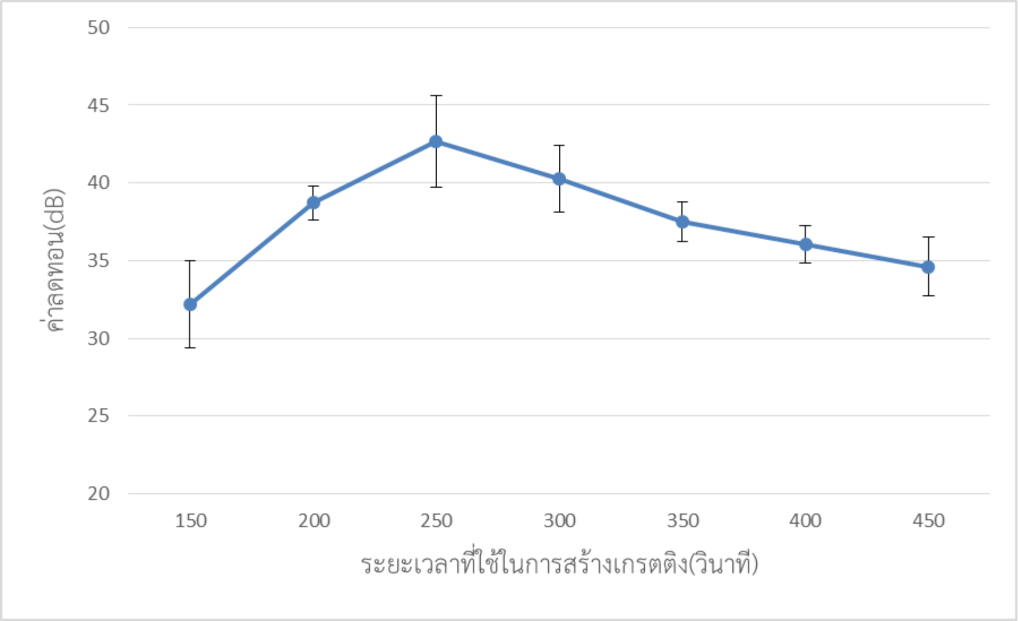
4.1. ผลความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการเขียนต่อค่าลดทอน

การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองสำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการทดลองถัดไป โดยจะทำการทดลองเพื่อดูผลของเวลาที่ใช้ในการเขียนที่มีต่อค่าลดทอนโดยมีขอบเขตของระยะเวลาการจัดเก็บ(H_2) น้อยกว่า 30 วัน, ระดับกำลังของเครื่องเลเซอร์ที่ 19 ถึง 21 kV และจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษาน้อยกว่า 40 ล้านครั้ง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1.

ตารางที่ 4. 1 ค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนกับระยะเวลาที่ใช้ในการเขียน

ลำดับ	ระยะเวลาที่ใช้ในการเขียน (วินาที)						
	150	200	250	300	350	400	450
1	32.43	38.25	41.73	39.55	36.91	35.51	33.87
2	32.00	38.89	42.87	40.18	37.70	36.23	34.87
3	31.13	38.22	41.46	39.41	36.81	35.45	33.53
4	33.00	39.18	43.82	41.29	37.93	36.54	35.25
5	30.26	38.43	41.89	39.73	37.40	35.90	34.37
6	32.24	38.91	42.93	40.25	37.74	36.24	34.94
7	33.37	39.36	44.88	41.33	38.04	36.70	35.43
8	31.85	38.77	42.37	39.96	37.58	35.99	34.66
9	33.45	38.12	41.40	39.40	36.71	35.44	33.40
10	32.15	38.43	41.87	39.65	37.20	35.84	34.30
11	31.85	38.70	42.36	39.94	37.55	35.97	34.62
12	30.12	38.25	41.68	39.52	36.87	35.46	33.58
13	31.42	38.58	42.10	39.79	37.50	35.91	34.47
14	32.58	38.96	43.31	41.08	37.85	36.41	35.19
15	32.46	38.95	43.12	41.00	37.80	36.40	35.18
16	33.18	39.26	44.01	41.30	37.94	36.58	35.37
17	33.42	38.39	41.81	39.59	36.93	35.66	34.08
18	32.75	38.99	43.76	41.15	37.86	36.46	35.20
19	32.73	38.36	41.74	39.58	36.91	35.60	33.98
20	31.45	38.68	42.15	39.79	37.55	35.94	34.56
21	31.91	38.88	42.62	40.18	37.67	36.09	34.77
22	30.36	38.23	41.54	39.50	36.85	35.45	33.54
23	32.76	39.00	43.79	41.18	37.88	36.48	35.24
24	33.31	39.26	44.27	41.30	37.95	36.60	35.41
25	32.60	38.41	41.86	39.61	37.11	35.83	34.17
26	31.16	38.50	42.03	39.73	37.44	35.91	34.43
27	32.43	38.92	42.96	40.48	37.77	36.24	34.96
28	33.31	39.28	44.48	41.30	37.96	36.63	35.41
29	32.45	38.93	43.08	40.96	37.78	36.31	35.13
30	31.88	38.86	42.47	40.10	37.62	36.05	34.70
ค่าเฉลี่ย	32.20	38.73	42.68	40.26	37.49	36.06	34.62
ค่าเบี่ยงเบน	0.93	0.36	0.99	0.72	0.42	0.40	0.63

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าลดทอนจากกระบวนการเขียนเมื่อเวลาที่ใช้ในการเขียนแตกต่างกันที่ระดับ 150, 200, 250, 300, 350, 400 และ 450 วินาที ทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในตารางส่วนล่าง นำค่าเฉลี่ยข้อมูลที่ไปได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการเขียนดังแสดงในรูปที่ 4.1

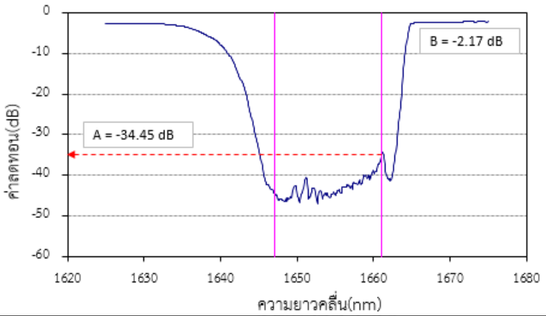
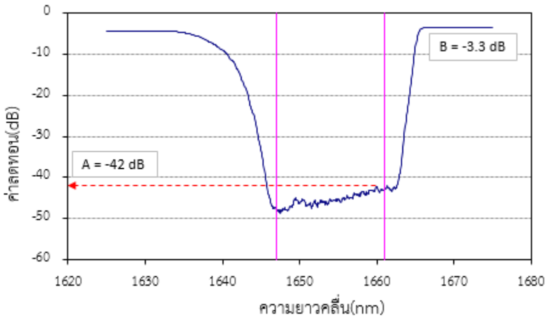
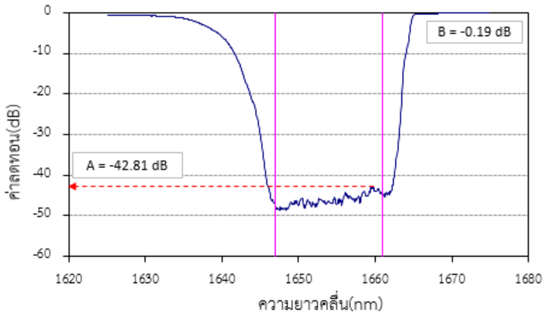
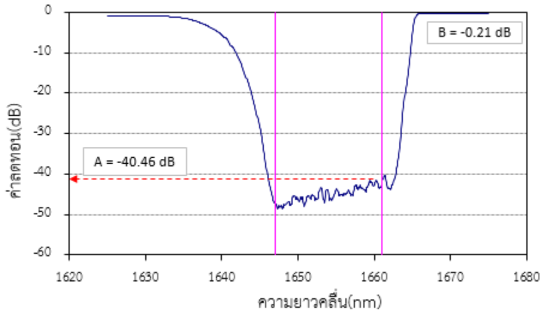


รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนและค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน

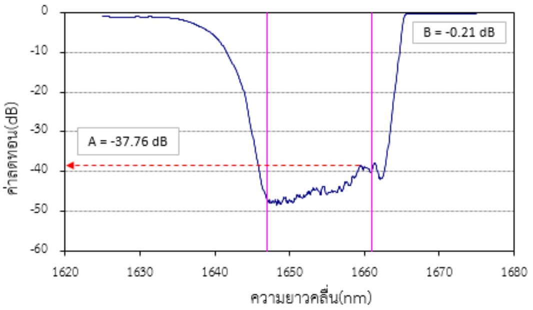
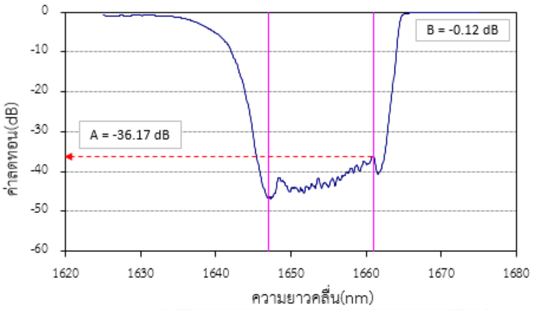
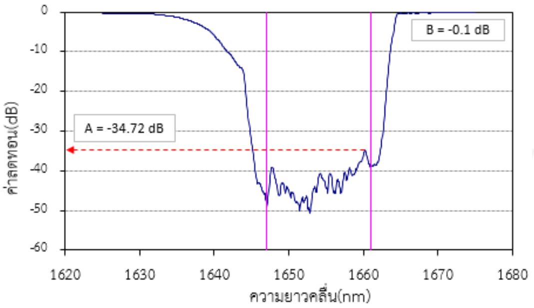
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.1 พบแนวโน้มของค่าลดทอนมีการเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นที่ระยะเวลาในการเขียนน้อยกว่า 250 วินาที และเริ่มมีแนวโน้มลดลงหลังจากนั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้เวลาในการเขียนที่นานขึ้นจนเกินจุดสมดุลของค่าลดทอน จะทำให้เกิดความไม่เสถียรในการเขียนและส่งผลให้ค่าลดทอนมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนที่เหมาะสมที่สุดคือ 250 วินาทีทำให้ได้ค่าลดทอนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 42.68 dB ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% สามารถแสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของค่าลดทอนได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าลดทอนเมื่อระยะเวลาในการเขียนเปลี่ยนไป

เวลาเขียน (วินาที)	ตัวอย่างกราฟ	ค่าลดทอนเฉลี่ย (dB)		
		A	B	ค่าลดทอน (A-B)
150		34.45	2.17	32.28
200		42.00	3.3	38.70
250		42.81	0.19	42.62
300		40.46	0.21	40.25

ตารางที่ 4.2(ต่อ) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าลดทอนเมื่อระยะเวลาในการเขียนเปลี่ยนไป

เวลาเขียน (วินาที)	ตัวอย่างกราฟ	ค่าลดทอนเฉลี่ย (dB)		
		A	B	ค่าลดทอน (A-B)
350		37.76	0.21	37.55
400		36.17	0.12	36.05
450		34.72	0.10	34.62

จากตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างค่าลดทอนที่ได้จากกระบวนการเขียนตามช่วงเวลาที่ใช้ในการเขียน ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามช่วงเวลาและมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.1 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงเริ่มต้นมีการเพิ่มขึ้นของค่าลดทอนอย่างต่อเนื่อง และจะเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานกว่า 250 วินาที ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าการใช้ระยะเวลาในการสร้างที่นานเกินไปทำให้เกิดความไม่เสถียรของเกรตติงบนเส้นใยแก้ว ทำให้ค่าลดทอนลดลงตามลำดับ

4.2. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เหลือในเส้นใยแก้ว

จากหลักการดูดกลืนของแสงทำให้เชื่อได้ว่าเส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดลองซึ่งทำมาจากวัสดุชนิดซิลิกอนออกไซด์(SiO_2) เมื่อถูกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จนอิ่มตัวทำให้มีโอกาสเกิดพันธะ OH^- ซึ่งดูดกลืนความยาวคลื่นในย่าน 1240 nm ก่อให้เกิดค่าลดทอนของกำลังแสง จึงมีความเป็นไปได้ว่าค่าลดทอนที่เกิดขึ้นแปรผันตามกันกับปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน นั่นคือเมื่อมีปริมาณของ H_2 น้อยลงโอกาสในการเกิดพันธะ OH^- ก็น้อยลงตามเช่นเดียวกัน ผลการวัดค่าลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนแสดงในตารางที่ 4.3

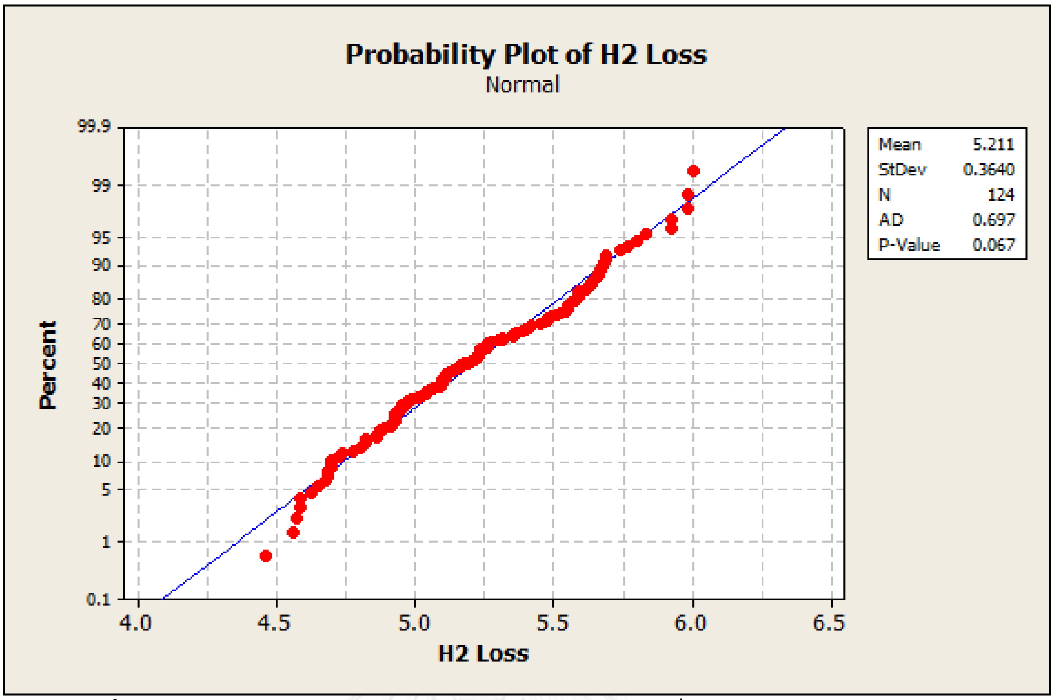
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 3 ผลการวัดค่าลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน

ระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	จำนวนตัวอย่าง ค่าลดทอนเนื่องจาก H_2 (dB/m)				ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4		
0	5.93	5.98	5.83	5.98	5.93	0.07
1	5.93	5.80	6.00	5.61	5.83	0.17
2	5.64	5.66	5.74	5.76	5.70	0.06
3	5.62	5.54	5.66	5.68	5.63	0.06
4	5.59	5.65	5.58	5.55	5.59	0.04
5	5.67	5.64	5.56	5.69	5.64	0.06
6	5.59	5.45	5.55	5.41	5.50	0.08
7	5.48	5.48	5.55	5.42	5.48	0.05
8	5.53	5.46	5.49	5.59	5.52	0.05
9	5.69	5.68	5.51	5.58	5.61	0.08
10	5.24	5.40	5.30	5.36	5.33	0.07
11	5.23	5.14	5.31	5.26	5.24	0.07
12	5.39	5.31	5.19	5.22	5.28	0.09
13	5.16	5.20	5.18	5.09	5.16	0.05
14	4.70	5.10	4.91	4.83	4.88	0.17
15	4.95	4.68	5.04	5.06	4.93	0.18
16	5.21	5.10	5.15	5.05	5.13	0.07
17	4.88	5.03	4.98	5.04	4.98	0.07
18	5.26	5.26	5.24	5.28	5.26	0.02
19	5.35	4.94	5.16	5.23	5.17	0.17
20	5.11	5.24	5.10	5.09	5.13	0.07
21	5.24	4.81	5.13	5.11	5.07	0.18
22	5.11	5.09	4.95	4.98	5.03	0.08
23	4.99	5.11	5.01	4.86	4.99	0.10
24	4.89	4.70	4.69	4.93	4.80	0.12
25	4.93	4.88	4.94	4.93	4.92	0.03
26	4.65	5.35	4.95	4.91	4.97	0.29
27	4.86	4.74	4.58	4.78	4.74	0.12
28	4.80	4.93	4.93	4.56	4.80	0.17
29	4.69	4.83	4.63	4.59	4.68	0.10
30	4.46	4.73	4.59	4.70	4.62	0.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

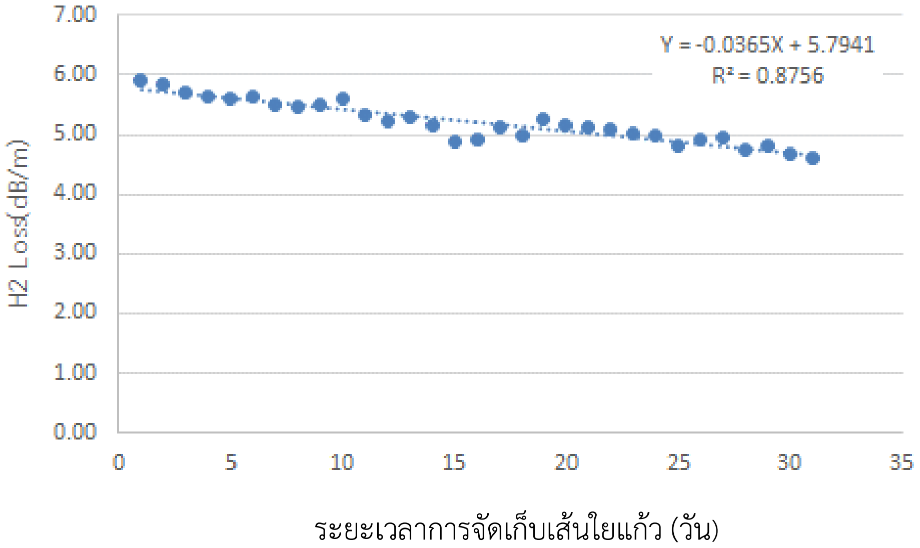
<u>การทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ</u>



รูปที่ 4. 2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าลดทอนเนื่องจากไฮโดรเจน (H_2 Loss)

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ พิจารณาได้จากค่า P-value = 0.067 ซึ่งมากกว่า α = 0.05 รวมถึงการจัดเรียงตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรงชัน 45° ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ

พิจารณาผลของของค่าการสูญเสียที่วัดได้พบว่ามีแนวโน้มลดลงโดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอายุการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงหลังจากผ่านกระบวนการอบก๊าซไฮโดรเจนที่ความดันสูง 65±2.5 MPa ดังแสดงในภาพที่ 4.3



รูปที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดทอนและระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้วหลังผ่านการบรรจุก๊าซไฮโดรเจน

จากรูปที่ 4.3 พบว่าระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้วในหน่วยของวันและค่าลดทอนมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงที่ระดับ R^2 = 87.56% ดังสมการที่ (3)

$$Y = -0.0365X + 5.7941 \qquad \text{.................................(3)}$$

เมื่อ Y ค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1240 nm (dB/m)

X ระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สมการนี้สามารถใช้อ้างอิงค่าลดทอนแสงอันเนื่องจากปริมาณการสูญเสียของก๊าซไฮโดรเจนในเส้นใยแก้วนำแสงได้ และการแทนค่าระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วหลังจากผ่านการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงเป็นเส้นตรงด้วยอัตรา 0.0365 dB/วัน หรือมีค่าลดลงจาก 5.79 เหลือ 4.69 dB/m ในระยะเวลา 30 วัน คิดเป็นลดลงร้อยละ 18.99

4.3. ผลการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นและการลดทอนกำลังแสง

ในการศึกษานี้จะพิจารณาผลของทั้ง 3 ปัจจัยในกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสง ได้แก่ ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2), กำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) และจำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา(MN) และดูผลกระทบที่มีต่อค่าลดทอนเนื่องจากเกรตติงที่กระบวนการเขียน และผลต่อความยาวคลื่นในลักษณะของ แบนด์วิดท์ และความยาวคลื่นกึ่งกลาง โดยมีนิยามของแต่ละปัจจัยดังนี้

1) ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) คือ ระยะเวลาหลังจากที่เส้นใยแก้วผ่านการอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูง และนำมาถูกจัดเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -30 ถึง -35 องศาเซลเซียส
2) กำลังของเครื่องเลเซอร์ (HV) คือ ระดับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องเลเซอร์ในหน่วยของกิโลโวลต์ (kV)
3) จำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา(MN) คือความสามารถของเครื่องจักรหลังจากผ่านการบำรุงรักษา

ผลการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อย่อย โดยพิจารณาแบ่งตามผลของแบนด์วิดท์, ความยาวคลื่นกึ่งกลาง และค่าลดทอนเมื่อผ่านกระบวนการเขียนที่ความยาวคลื่น 1650 nm ดังต่อไปนี้

4.3.1. ผลของปัจจัยที่มีอแบนด์วิดท์

ปัจจัยที่มีผลต่อแบนด์วิดท์ในหน่วยนาโนเมตร(nm) จากการทดลองที่มีการเก็บข้อมูลโดยพิจารณาค่าแบนด์วิดท์ที่ระดับค่าลดทอน -24 dB มีการเปลี่ยนระดับปัจจัยของระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) 3 ระดับคือ 10, 20 และ 30 วัน ปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) 3 ระดับคือ 19, 20 และ 21 กิโลโวลต์(kV) และปัจจัยของจำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์หลังจากผ่านการบำรุงรักษา(MN) 2 ระดับคือ 20±5 ล้านครั้ง และ 40±5 ล้านครั้ง สามารถพิจารณาผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.4

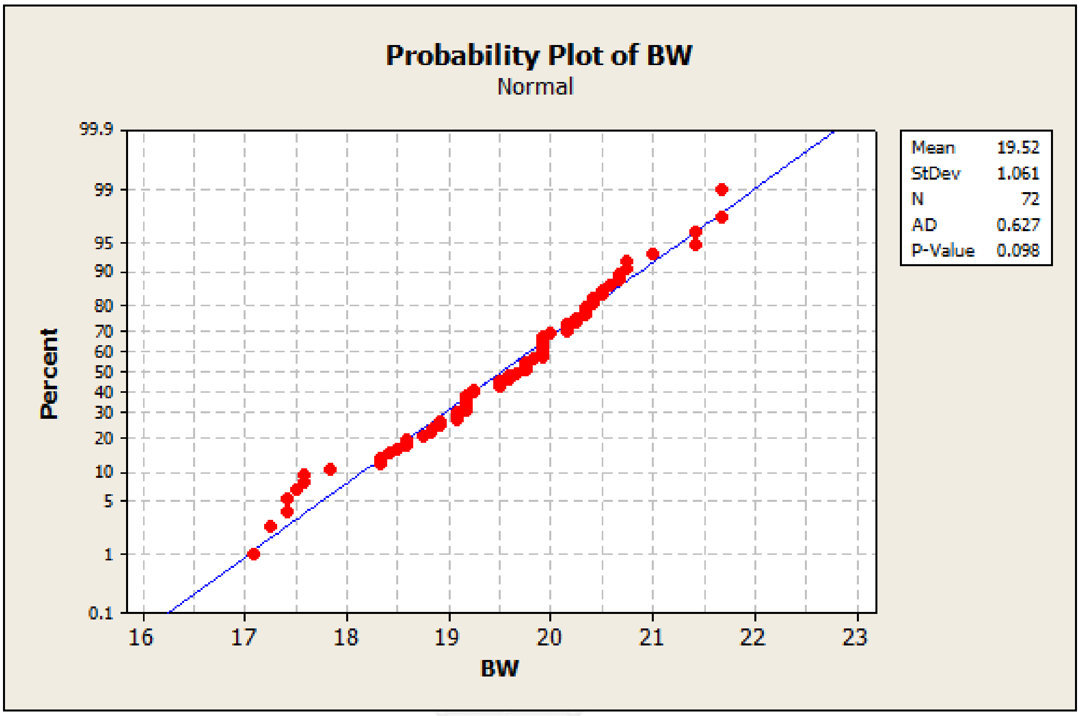
ตารางที่ 4. 4 ค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) ที่ได้จากกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้ว

ลำดับ	ปัจจัยที่ศึกษา			จำนวนตัวอย่าง แบนด์วิดท์ (nm)				ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	H_2 (วัน)	HV (kV)	MN (ล้านครั้ง)	1	2	3	4		
1	10	19	20±5	19.92	19.17	20.17	19.92	19.79	0.43
2	10	19	40±5	19.17	19.25	19.58	19.08	19.27	0.22
3	10	20	20±5	20.75	20.67	20.42	20.50	20.58	0.15
4	10	20	40±5	19.92	20.00	20.17	19.92	20.00	0.12
5	10	21	20±5	19.17	18.83	18.75	19.08	18.96	0.20
6	10	21	40±5	19.50	20.42	20.67	20.25	20.21	0.50
7	20	19	20±5	19.50	19.58	19.75	19.67	19.63	0.11
8	20	19	40±5	20.75	21.00	20.17	19.92	20.46	0.50
9	20	20	20±5	18.42	18.58	19.17	18.92	18.77	0.34
10	20	20	40±5	19.92	19.83	19.92	19.50	19.79	0.20
11	20	21	20±5	17.50	17.83	17.25	17.58	17.54	0.24
12	20	21	40±5	17.08	17.42	17.58	17.42	17.38	0.21
13	30	19	20±5	20.25	20.33	20.58	20.33	20.37	0.14
14	30	19	40±5	18.33	18.33	18.58	18.50	18.44	0.12
15	30	20	20±5	18.92	18.83	19.08	19.25	19.02	0.18
16	30	20	40±5	19.92	19.75	19.17	19.17	19.50	0.39
17	30	21	20±5	21.67	21.42	21.42	21.67	21.54	0.14
18	30	21	40±5	19.75	19.75	20.33	20.50	20.08	0.39

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากกระบวนการเขียนเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับของแต่ละปัจจัย แต่ละเงื่อนไขทำเก็บข้อมูลแบบสุ่มเงื่อนไขละ 4 ตัวอย่าง พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละเงื่อนไข

1) <u>การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูล</u>

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลสามารถทำได้โดยพิจารณาจากแผนภาพการกระจายแบบปกติ (Normal probability plot) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

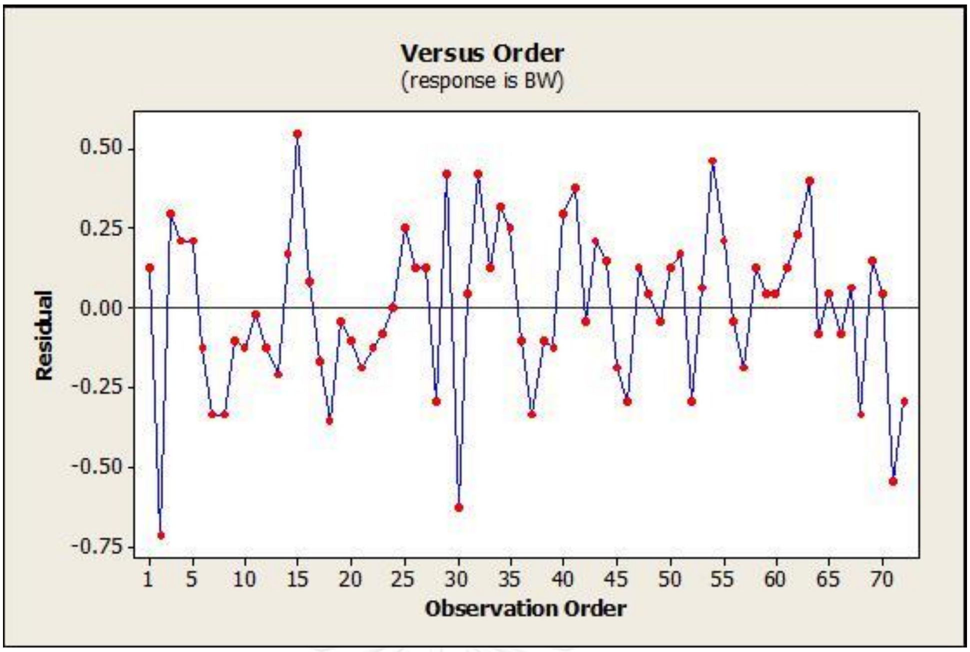


รูปที่ 4. 4 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของแบนด์วิดท์

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ พิจารณาได้จากค่า P-value = 0.098 ซึ่งมากกว่า α = 0.05 รวมถึงการจัดเรียงตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรงชัน 45° ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลแบนด์วิดท์มีการกระจายตัวแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลและสามารถยอมรับได้

2) <u>การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน</u>

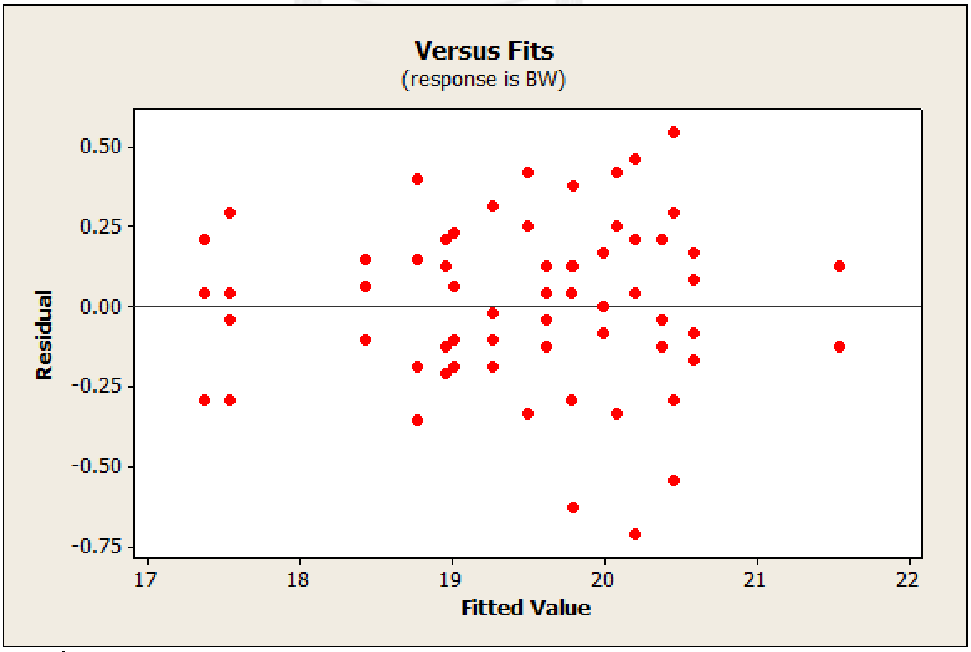
ความเป็นอิสระของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวระหว่างข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการทดลองกับส่วนตกค้างของค่าแบนด์วิดท์

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าไม่พบการกระจายของข้อมูลที่มีแบบแผน และข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ นั่นคือข้อมูลชุดนี้มีความเป็นอิสระ การทดลองแต่ละการทดลองไม่ส่งผลกระทบเชื่อมโยงกัน

3) <u>การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล</u>



รูปที่ 4. 6 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ของค่าแบนด์วิดท์

จากรูปที่ 4.6 พบว่าข้อมูลไม่มีแนวโน้มลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่พบลักษณะของข้อมูลที่เป็นรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และยังเป็นการบ่งบอกถึงปัจจัยที่เลือกมาใช้ในการศึกษามีผลต่อกระบวนการอย่างชัดเจน

ทำการศึกษาที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.7

Analysis of Variance for BW, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
H2	2	12.5955	12.5955	6.2977	76.63	0.000
HV	2	1.9940	1.9940	0.9970	12.13	0.000
MN	1	0.2616	0.2616	0.2616	3.18	0.080
H2*HV	4	40.8440	40.8440	10.2110	124.25	0.000
H2*MN	2	7.3213	7.3213	3.6606	44.54	0.000
HV*MN	2	2.1524	2.1524	1.0762	13.10	0.000
H2*HV*MN	4	10.3602	10.3602	2.5901	31.52	0.000
Error	54	4.4379	4.4379	0.0822		
Total	71	79.9670				

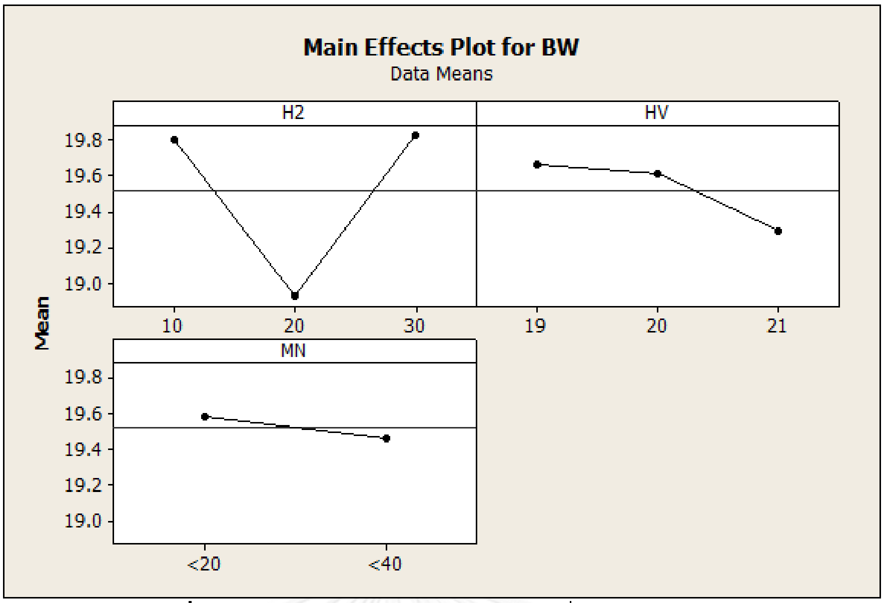
S = 0.286677   R-Sq = 94.45%   R-Sq(adj) = 92.70%

รูปที่ 4. 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแบนด์วิดท์

ค่า P-Value แสดงว่ามีปัจจัยหลักส่งผลต่อค่าแบนด์วิดท์ 2 ปัจจัยคือระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) และกำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) ในขณะที่จำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์หลังจากผ่านการบำรุงรักษาไม่ส่งผลต่อค่าแบนด์วิดท์ สำหรับผลของอันตรกิริยาพบว่าทุกความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยส่งผลต่อค่าแบนด์วิดท์ทั้งหมดที่ระดับความน่าเชื่อถือ 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

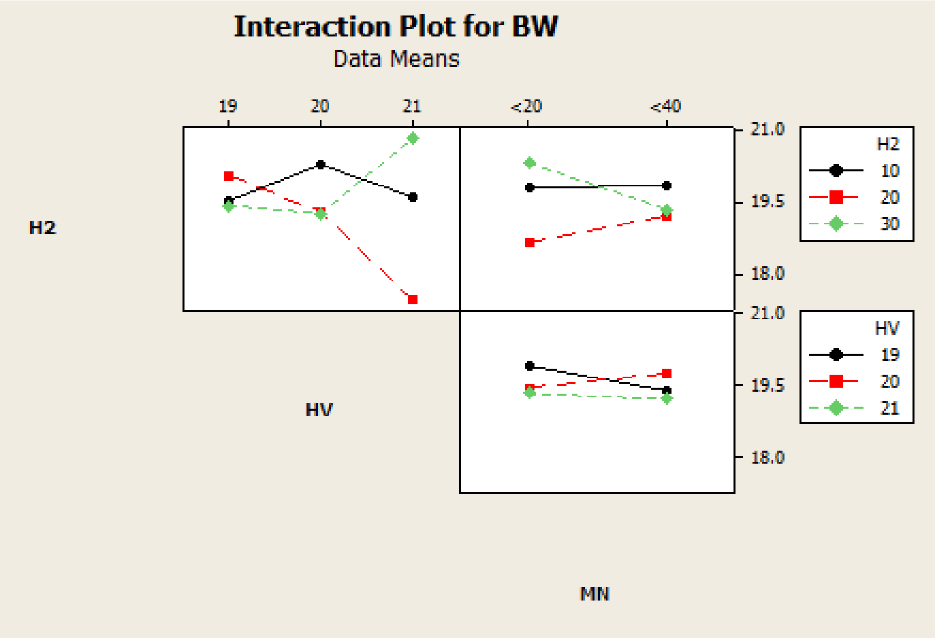
4) <u>การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา</u>



รูปที่ 4. 8 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อแบนด์วิดท์

เมื่อปัจจัยหลักส่งผลต่อค่าแบนด์วิดท์ พบว่าปัจจัยของระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (H_2) มีผลทำให้แบนด์วิดท์ต่ำที่สุดเมื่อเส้นใยแก้วมีระยะเวลาจัดเก็บ 20 วัน แต่ไม่พบความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นแนวโน้มดังแสดงในรูปที่ 4.8 และมีความไม่สอดคล้องกันของแต่ละระดับของปัจจัยในการพิจารณาผลของอัตรกิริยาในรูปที่ 4.9

ปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) พบว่าที่ระดับของกำลังเครื่องเลเซอร์ที่สูงขึ้นส่งผลให้แบนด์วิดท์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จาก กำลังของเครื่องจักรที่เพิ่มขึ้นกระตุ้นให้เครื่องผลิตเลเซอร์ที่มีกำลังสูง อาจส่งผลให้แสงมีการกระจายตัวมากกว่าปกติ เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านไปยังแม่แบบเกรตติงทำให้เกิดระยะพิทต์ที่ได้ลดลง เกรตติงที่เกิดบนเส้นใยแก้วจึงมีระยะของช่องเกรตติงลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้กราฟที่ได้มีแบนด์วิดท์ลดลง



รูปที่ 4. 9 ผลการวิเคราะห์อัตรกิริยาระหว่างปัจจัย

อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) และกำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) พบว่ามีแนวโน้มขัดแย้งกันของทั้ง 3 ระดับปัจจัย โดยที่ HV = 19 kV ระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้วที่มีผลทำให้แบนด์วิดท์สูงที่สุดคือเมื่อเส้นใยแก้วมีระยะเวลาจัดเก็บ 20 วัน ในขณะที่ HV = 20 kV จะได้กราฟที่มีความกว้างสูงที่สุดเมื่อระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้วอยู่ที่ 10 วัน และที่ HV = 21 kV จะได้กราฟที่มีความกว้างสูงสุดเมื่อระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้วอยู่ที่ 30 วัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าอาจมีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้วและกำลังของเครื่องเลเซอร์ที่ส่งผลต่อแบนด์วิดท์ทำให้มีเกิดความผันแปรของข้อมูลในลักษณะที่ไม่สอดคล้องกัน ทั้งนี้ผลของแบนด์วิดท์อธิบายได้จากระยะความยาวของเกรตติงบนเส้นใยแก้ว โดยความยาวของเกรตติงขึ้นกับความกว้างของแสงเลเซอร์ พบว่าที่กำลังของเครื่องเลเซอร์ระดับต่ำ 19 kV แบนวิดท์ที่ระยะเวลาจัดเก็บที่แตกต่างกันมีค่าแบนด์วิดท์ใกล้เคียงกันมากกว่าที่กำลังของเครื่องเลเซอร์ระดับสูง 21 kV พอสรุปได้ว่าที่กำลังของเลเซอร์ระดับต่ำทำให้ความกว้างของแสงเลเซอร์คงที่กว่าที่กำลังระดับสูงๆ

อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (H_2) และระยะเวลาหลังผ่านการบำรุงรักษา (MN) พบว่ามีเฉพาะระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วที่ 30 วันเท่านั้นที่ทำให้กราฟมีความกว้างลดลงเมื่อผ่านการบำรุงรักษาที่นานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมากจากผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนคงเหลือที่ต่ำที่สุดเมื่อเก็บไว้นานถึง 30 วันจึงอาจเป็นผลทำให้แบนด์วิดท์ลดลง

สำหรับในส่วนของผลอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) และระยะเวลาหลังผ่านการบำรุงรักษา (HV) พบว่าที่ HV ระดับต่ำเท่านั้นที่จะส่งผลให้แบนด์วิดท์ลดลงเมื่อเวลาในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น

4.3.2 ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง

ปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นกึ่งกลางในหน่วยนาโนเมตร(nm) จากการทดลองที่มีการเก็บข้อมูลโดยพิจารณาค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ระดับค่าลดทอน -24 dB มีการเปลี่ยนระดับปัจจัยของระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) 3 ระดับคือ 10, 20 และ 30 วัน ปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) 3 ระดับคือ 19, 20 และ 21 กิโลโวลต์(kV) และปัจจัยของจำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์หลังจากผ่านการบำรุงรักษา(MN) 2 ระดับคือ 20±5 ล้านครั้ง และ 40±5 ล้านครั้ง ดังตารางที่ 4.5

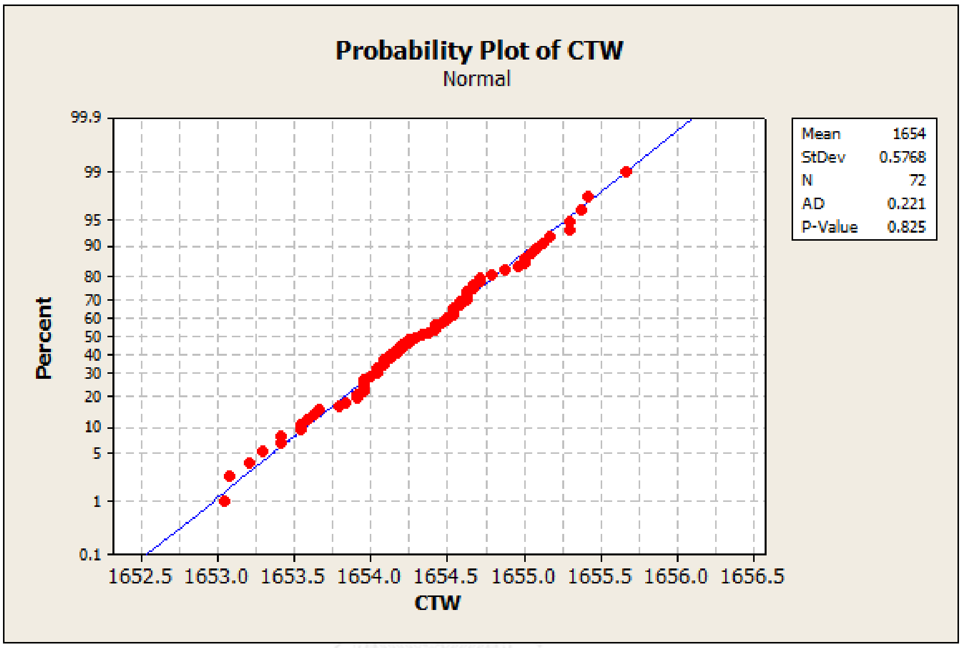
ตารางที่ 4. 5 ค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง (CTW) ที่ได้จากกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้ว

ลำดับ	ปัจจัยที่สนใจ			จำนวนตัวอย่าง ความยาวคลื่นกึ่งกลาง (nm)				ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	H_2 (วัน)	HV (kV)	MN (ล้านครั้ง)	1	2	3	4		
1	10	19	20±5	1653.96	1655.17	1653.92	1653.04	1654.02	0.87
2	10	19	40±5	1654.50	1655.29	1654.96	1654.21	1654.74	0.48
3	10	20	20±5	1653.29	1653.42	1653.54	1653.42	1653.42	0.10
4	10	20	40±5	1654.63	1655.67	1654.42	1654.13	1654.71	0.67
5	10	21	20±5	1654.08	1655.08	1654.88	1653.96	1654.50	0.56
6	10	21	40±5	1653.58	1654.13	1654.08	1653.79	1653.90	0.26
7	20	19	20±5	1654.42	1654.63	1653.63	1653.08	1653.94	0.71
8	20	19	40±5	1653.96	1654.08	1654.58	1654.71	1654.33	0.37
9	20	20	20±5	1654.21	1654.54	1654.67	1654.04	1654.36	0.29
10	20	20	40±5	1654.38	1654.58	1654.63	1654.00	1654.40	0.29
11	20	21	20±5	1654.42	1655.00	1654.79	1655.38	1654.90	0.40
12	20	21	40±5	1654.63	1655.29	1655.13	1654.54	1654.90	0.37
13	30	19	20±5	1653.96	1654.33	1654.46	1653.92	1654.17	0.27
14	30	19	40±5	1655.00	1655.42	1655.04	1654.67	1655.03	0.31
15	30	20	20±5	1653.96	1654.50	1654.04	1653.54	1654.01	0.39
16	30	20	40±5	1654.71	1654.54	1654.25	1653.83	1654.33	0.38
17	30	21	20±5	1654.17	1654.54	1654.29	1654.17	1654.29	0.18
18	30	21	40±5	1653.21	1654.04	1654.25	1653.67	1653.79	0.46

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ได้จากกระบวนการเขียนเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับของแต่ละปัจจัย แต่ละเงื่อนไขทำเก็บข้อมูลแบบสุ่มเงื่อนไขละ 4 ตัวอย่าง พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละเงื่อนไข

1) การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลโดยพิจารณาจากแผนภาพการกระจายแบบปกติ (Normal probability plot)

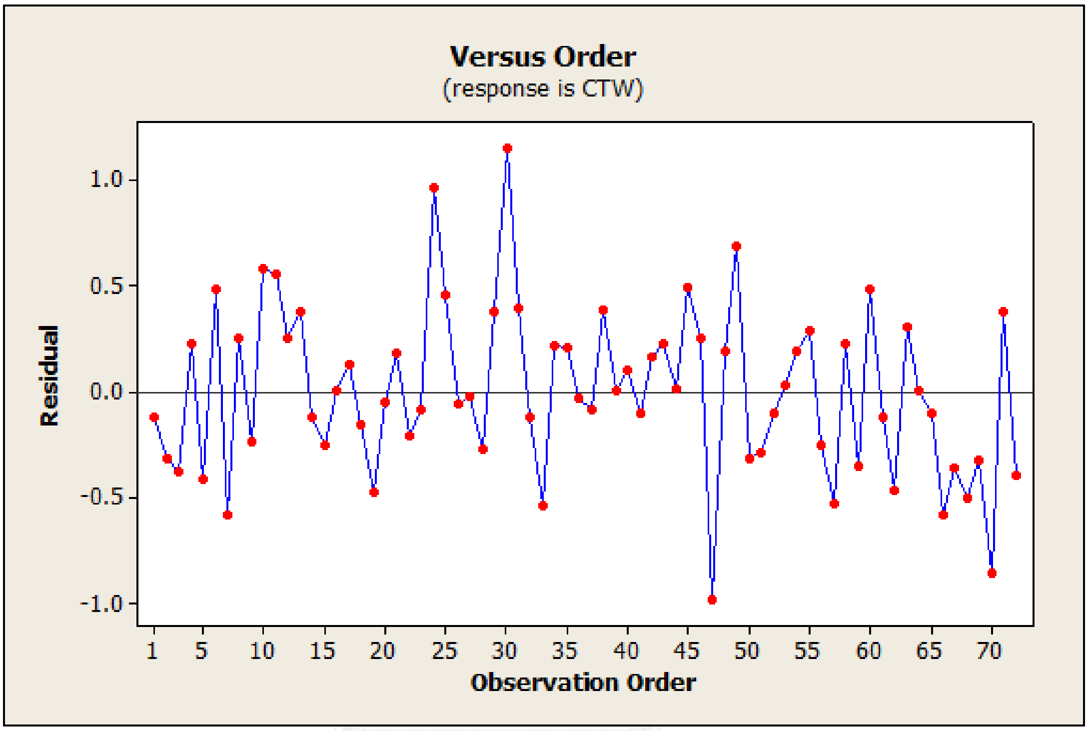


รูปที่ 4. 10 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความยาวคลื่นกึ่งกลาง

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ พิจารณาได้จากค่า P-value = 0.825 ซึ่งมากกว่า α = 0.05 รวมถึงการจัดเรียงตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรงชัน 45° ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลความยาวคลื่นกึ่งกลางมีการกระจายตัวแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความน่าเชื่อถือของข้อมูลและสามารถยอมรับได้

2) <u>การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน</u>

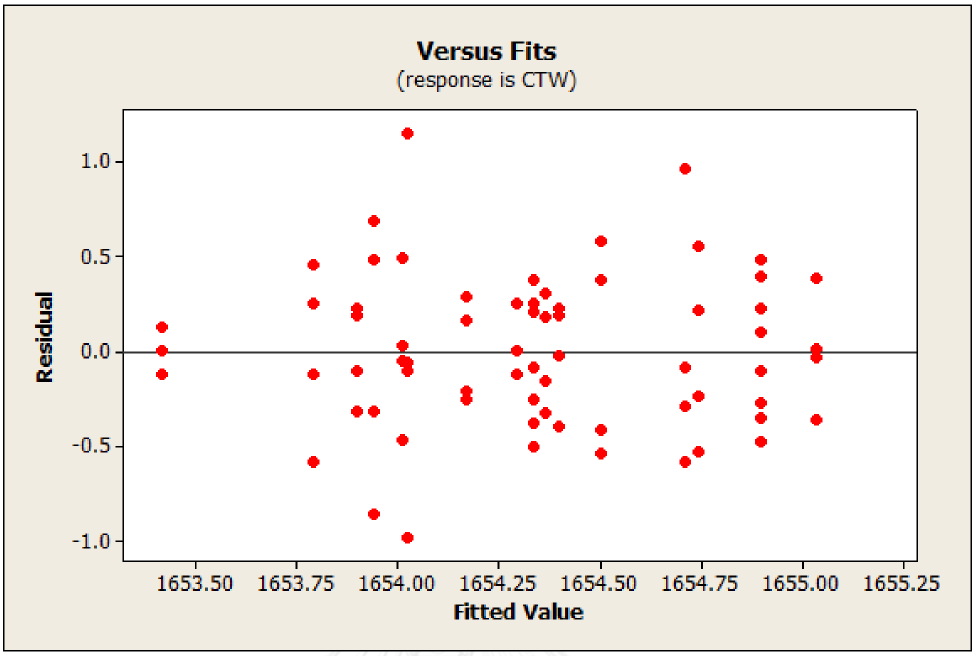
ความเป็นอิสระของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวระหว่างข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับการทดลอง



รูปที่ 4. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการทดลองกับส่วนตกค้างของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าไม่พบการกระจายของข้อมูลที่มีแบบแผน และข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ นั่นคือข้อมูลชุดนี้มีความเป็นอิสระ การทดลองแต่ละการทดลองไม่ส่งผลกระทบเชื่อมโยงกัน

3) <u>การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล</u>



รูปที่ 4. 12 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง

จากรูปที่ 4.12 พบว่าข้อมูลไม่มีแนวโน้มลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่พบลักษณะของข้อมูลที่เป็นรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และยังเป็นการบ่งบอกถึงปัจจัยที่เลือกมาใช้ในการศึกษามีผลต่อกระบวนการอย่างชัดเจน

ทำการศึกษาที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Analysis of Variance for CTW, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
H2	2	0.8731	0.8731	0.4365	2.15	0.126
HV	2	0.4635	0.4635	0.2318	1.14	0.327
MN	1	1.4123	1.4123	1.4123	6.96	0.011
H2*HV	4	3.7137	3.7137	0.9284	4.58	0.003
H2*MN	2	0.3431	0.3431	0.1716	0.85	0.435
HV*MN	2	3.8184	3.8184	1.9092	9.41	0.000
H2*HV*MN	4	2.0452	2.0452	0.5113	2.52	0.052
Error	54	10.9545	10.9545	0.2029		
Total	71	23.6238				

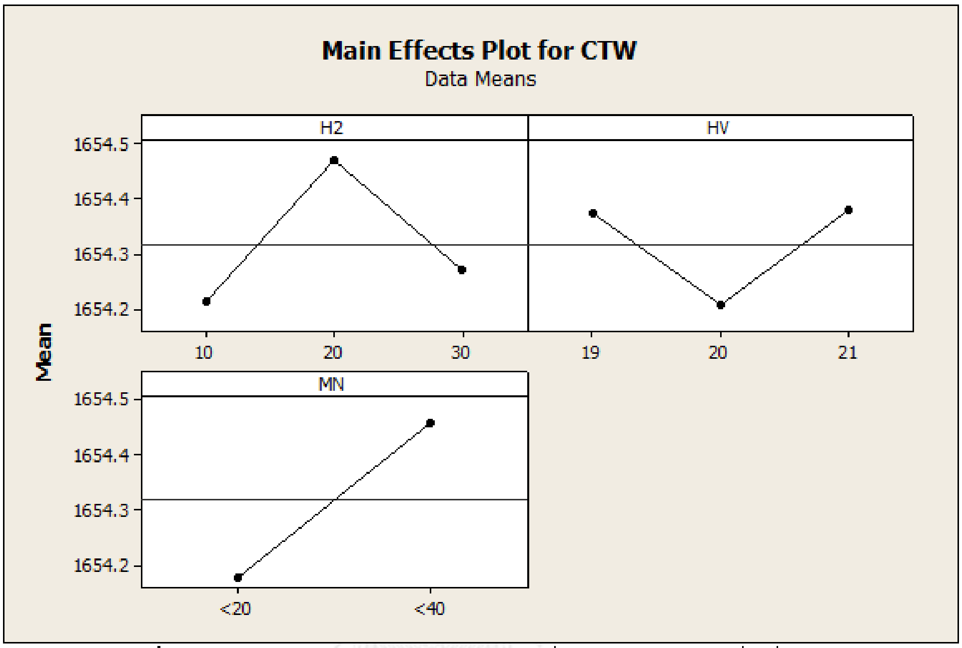
S = 0.450401   R-Sq = 53.63%   R-Sq(adj) = 39.03%

รูปที่ 4. 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความยาวคลื่นกึ่งกลาง

ค่า P-Value แสดงว่ามีปัจจัยหลักส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางเฉพาะปัจจัยเนื่องมาจากระยะเวลาหลังจากการบำรุงรักษาเท่านั้น และในส่วนผลของอันตรกิริยาพบว่าอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วและกำลังของเครื่องเลเซอร์(H_2-HV) และอันตรกิริยาระหว่างกำลัง

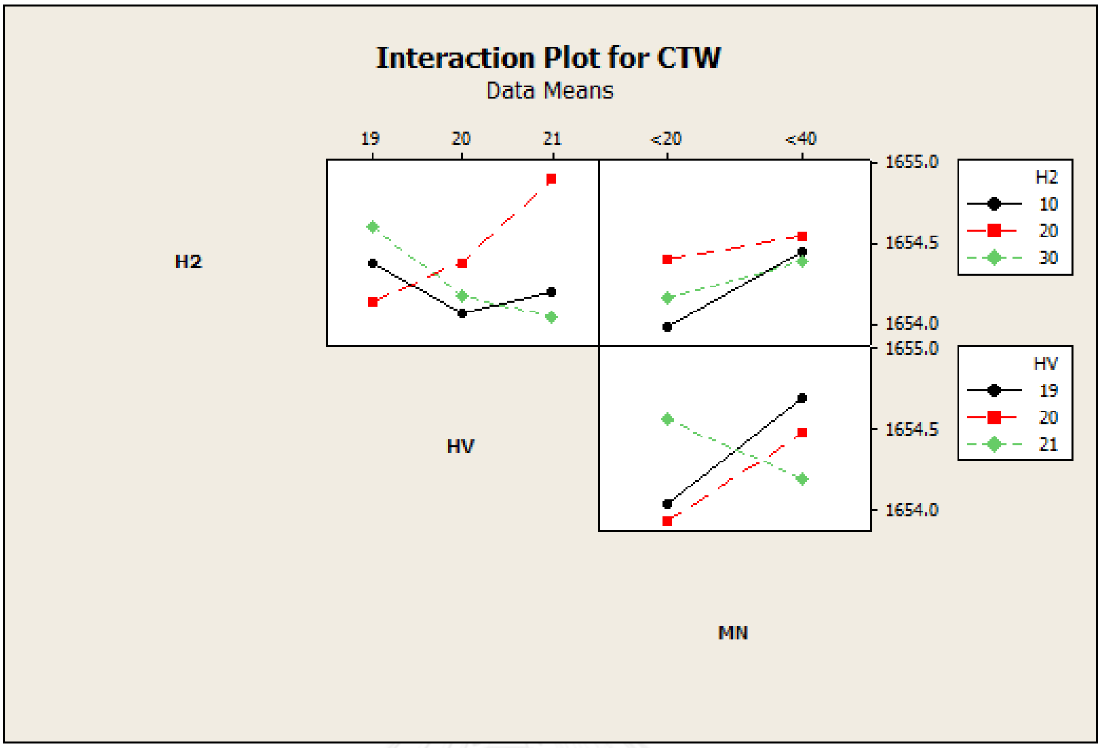
เครื่องเลเซอร์และระยะเวลาหลังจากการบำรุงรักษา(HV-MN) มีผลต่อค่าแบนด์วิดท์ ที่ระดับความน่าเชื่อถือ 95%

4) <u>การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา</u>



รูปที่ 4. 14 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อความยาวคลื่นกึ่งกลาง

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางซึ่งมีเฉพาะจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษาเท่านั้นที่มีผลต่อค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ระดับความน่าเชื่อถือ 95% จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษาเครื่องเลเซอร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4. 15 ผลการวิเคราะห์อัตรกิริยาระหว่างปัจจัย

ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (H_2) และกำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) พบว่ามีแนวโน้มขัดแย้งกันของทั้ง 3 ระดับปัจจัย โดยที่ HV = 19 kV ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วที่มีผลทำให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางมีค่าใกล้เคียงความยาวคลื่น 1653 nm มากที่สุดคือเมื่อเส้นใยแก้วมีระยะเวลาจัดเก็บ 20 วัน ในขณะที่ HV = 20 kV คือที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10 วัน และที่ HV = 21 kV คือที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 30 วัน

ผลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) และระยะเวลาหลังผ่านการบำรุงรักษา (HV) พบว่าที่ HV = 21 kV ระดับสูงเท่านั้นที่จะส่งผลให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางมีค่าใกล้เคียงความยาวคลื่น 1653 nm มากที่สุดเมื่อจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษา(MN) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งขัดแย้งกับ HV = 19 และ 20 kV ความยาวคลื่นกึ่งกลางมีค่าใกล้เคียงความยาวคลื่น 1653 nm มากที่สุดเมื่อจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษา(MN) สั้นๆ

4.3.3. ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าลดทอนของแสง

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าลดทอนในหน่วยเดซิเบล (dB) จากการทดลองที่มีการเก็บข้อมูลโดยพิจารณาค่าลดทอนในช่วงความยาวคลื่น 1647 – 1661 nm ทำการเปลี่ยนระดับปัจจัยของระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) 3 ระดับคือ 10, 20 และ 30 วัน ปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) 3 ระดับคือ 19, 20 และ 21 กิโลโวลต์(kV) และปัจจัยของจำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์หลังจากผ่านการบำรุงรักษา(MN) 2 ระดับคือ 20±5 ล้านครั้ง และ 40±5 ล้านครั้ง ดังตารางที่ 4.6

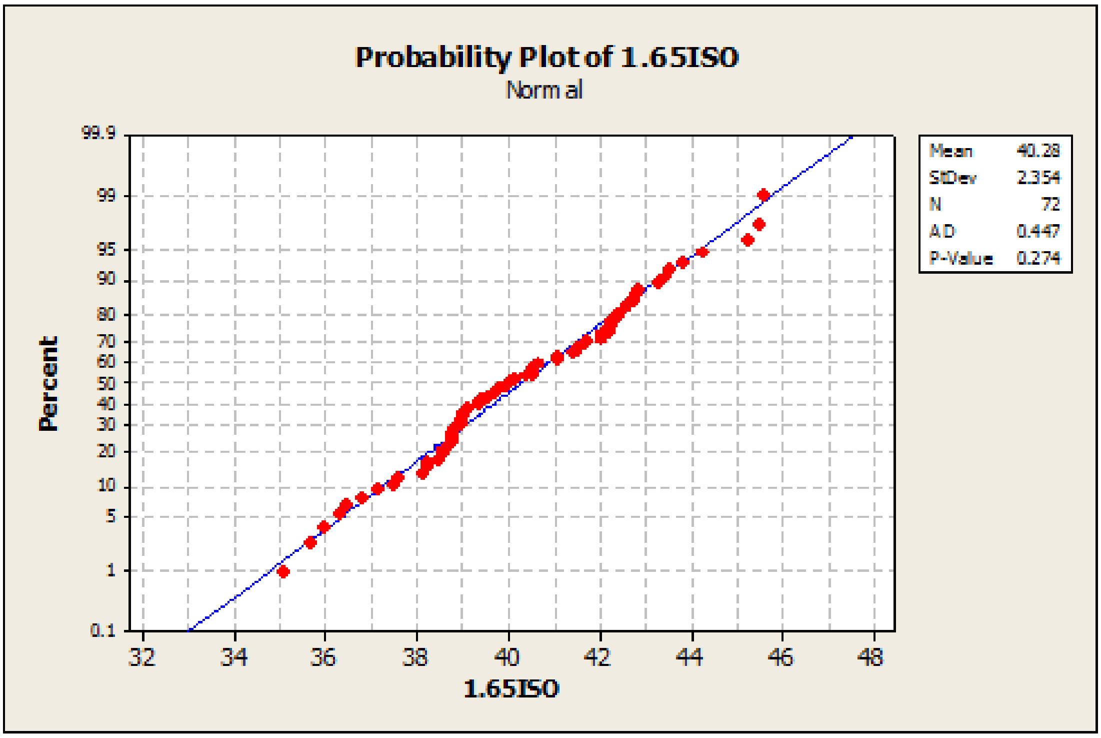
ตารางที่ 4. 6 แสดงค่าลดทอนที่ได้จากกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้ว

ลำดับ	ปัจจัยที่สนใจ			จำนวนตัวอย่าง ค่าลดทอนของแสง (dB)				ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	H_2 (วัน)	HV (kV)	MN (ล้านครั้ง)	1	2	3	4		
1	10	19	20±5	43.26	39.39	42.87	36.8	40.58	3.06
2	10	19	40±5	45.47	42.04	43.44	35.64	41.65	4.25
3	10	20	20±5	40.52	41.5	44.28	42.24	42.14	1.59
4	10	20	40±5	35.09	42.04	42.38	38.46	39.49	3.43
5	10	21	20±5	45.24	40.17	43.79	38.55	41.94	3.11
6	10	21	40±5	42.22	41.66	39.95	39.79	40.91	1.22
7	20	19	20±5	42.55	42.63	45.59	39.06	42.46	2.67
8	20	19	40±5	41.69	41.05	38.96	37.48	39.80	1.93
9	20	20	20±5	36.43	40.65	42.71	40.63	40.11	2.64
10	20	20	40±5	38.25	39.73	38.74	42.4	39.78	1.85
11	20	21	20±5	38.66	40.39	41.51	37.56	39.53	1.76
12	20	21	40±5	42.78	38.72	40.54	41.05	40.77	1.67
13	30	19	20±5	38.24	40.02	39.35	35.93	38.39	1.79
14	30	19	40±5	42.2	38.8	42.18	40.52	40.93	1.62
15	30	20	20±5	38.59	38.89	39.34	36.34	38.29	1.34
16	30	20	40±5	37.16	41.4	39	38.79	39.09	1.75
17	30	21	20±5	39.52	39	38.13	39.12	38.94	0.59
18	30	21	40±5	39.69	38.96	43.52	38.74	40.23	2.23

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าลดทอนที่ได้จากกระบวนการเขียนเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับของแต่ละปัจจัย แต่ละเงื่อนไขทำเก็บข้อมูลแบบสุ่มเงื่อนไขละ 4 ตัวอย่าง พร้อมทั้งแสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละเงื่อนไข

2) <u>การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูล</u>

ทดสอบการกระจายตัวแบบ Anderson-Darling เพื่อดูค่า P-value และการกระจายตัวของข้อมูล

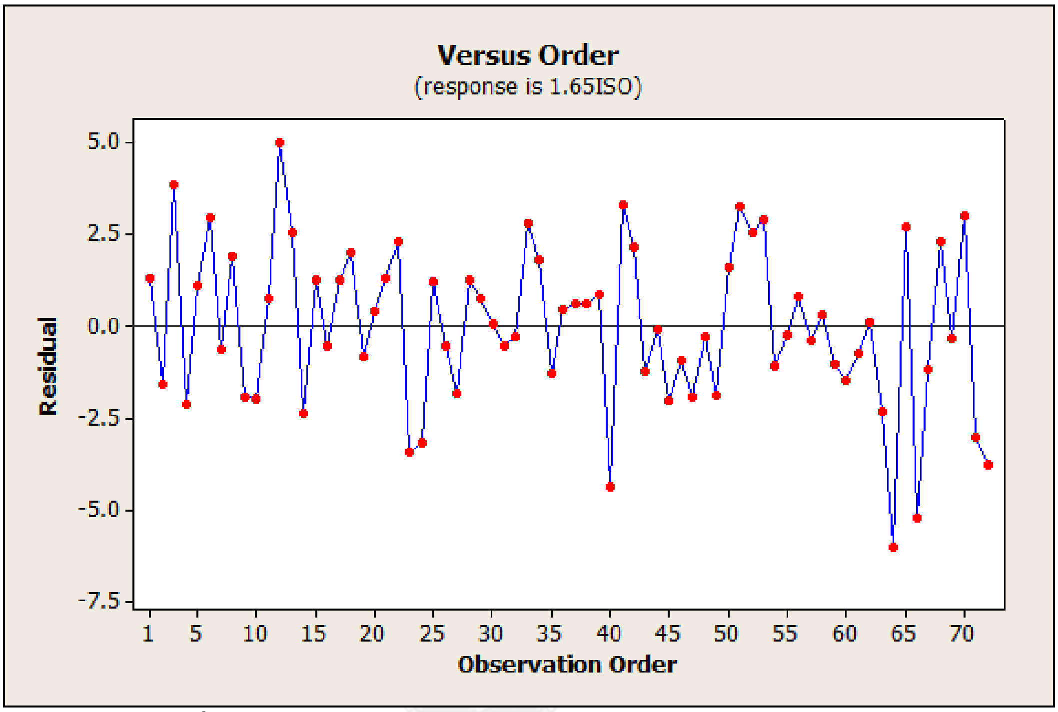


รูปที่ 4. 16 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าลดทอน

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ พิจารณาได้จากค่า P-value = 0.274 ซึ่งมากกว่า α = 0.05 รวมถึงการจัดเรียงตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรงชัน 45° ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลค่าลดทอนมีการกระจายตัวแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลและสามารถยอมรับได้

3) <u>การทดสอบความเป็นอิสระต่อกัน</u>

ความเป็นอิสระของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวระหว่างข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับการทดลอง

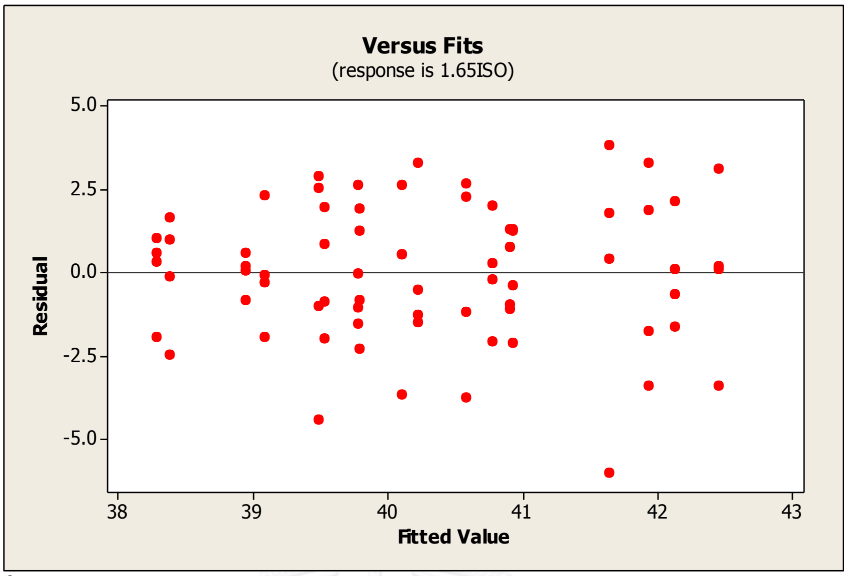


รูปที่ 4. 17 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการทดลองกับค่าส่วนตกค้าง

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าไม่พบการกระจายของข้อมูลที่มีแบบแผน และข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ นั่นคือข้อมูลชุดนี้มีความเป็นอิสระ การทดลองแต่ละการทดลองไม่ส่งผลกระทบเชื่อมโยงกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4) <u>การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล</u>



รูปที่ 4. 18 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ของค่าลดทอน

จากรูปที่ 4.18 พบว่าข้อมูลไม่มีแนวโน้มลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่พบลักษณะของข้อมูลที่เป็นรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และยังเป็นการบ่งบอกถึงปัจจัยที่เลือกมาใช้ในการศึกษามีผลต่อกระบวนการอย่างชัดเจน

ทำการศึกษาที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.19

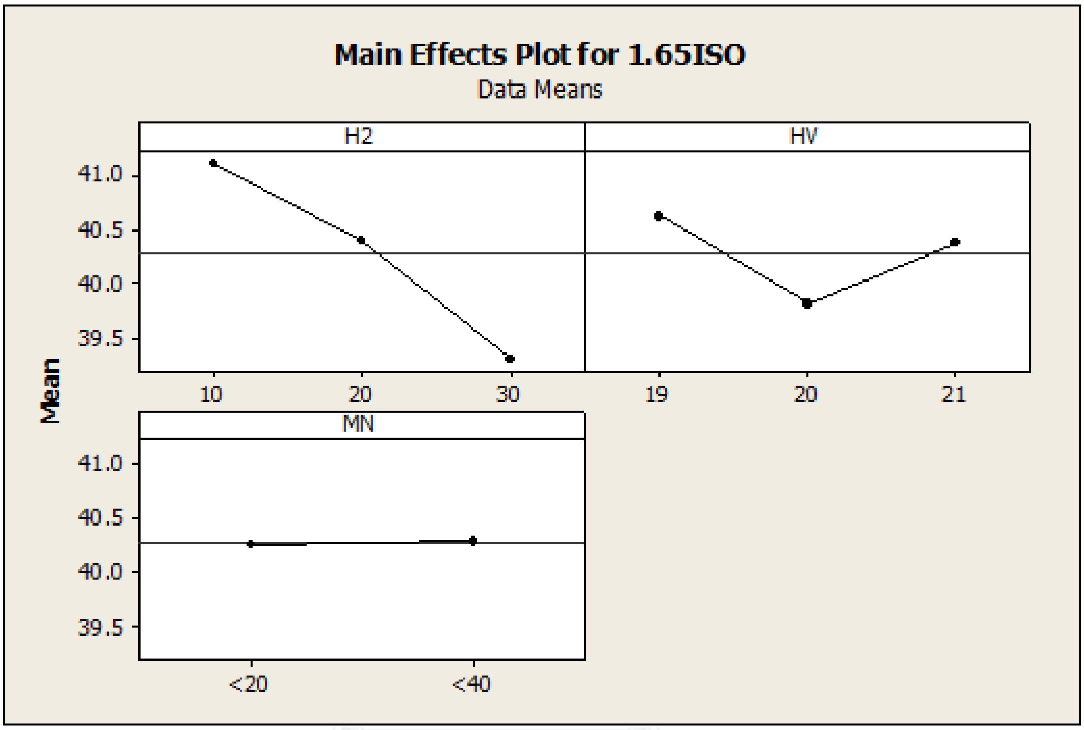
```
Analysis of Variance for 1.65ISO, using Adjusted SS for Tests

        Source     DF   Seq SS    Adj SS   Adj MS      F      P
        H2          2   39.769    39.769   19.885   3.73  0.030
        HV          2    8.426     8.426    4.213   0.79  0.459
        MN          1    0.016     0.016    0.016   0.00  0.956
        H2*HV       4    4.083     4.083    1.021   0.19  0.942
        H2*MN       2   20.792    20.792   10.396   1.95  0.152
        HV*MN       2    5.208     5.208    2.604   0.49  0.616
        H2*HV*MN    4   27.315    27.315    6.829   1.28  0.289
        Error      54  287.956   287.956    5.333
        Total      71  393.566

        S = 2.30923   R-Sq = 26.83%   R-Sq(adj) = 3.80%
```

รูปที่ 4. 19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่า P-Value แสดงว่ามีปัจจัยหลักส่งผลต่อค่าลดทอนเนื่องมากจากระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วเท่านั้นที่ส่งผลต่อค่าลดทอน(1.65ISO) ที่ระดับความน่าเชื่อถือ 95% เนื่องจากมี P-Value < 0.05 โดยไม่มีผลของอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยมาเกี่ยวข้อง

5) <u>การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา</u>



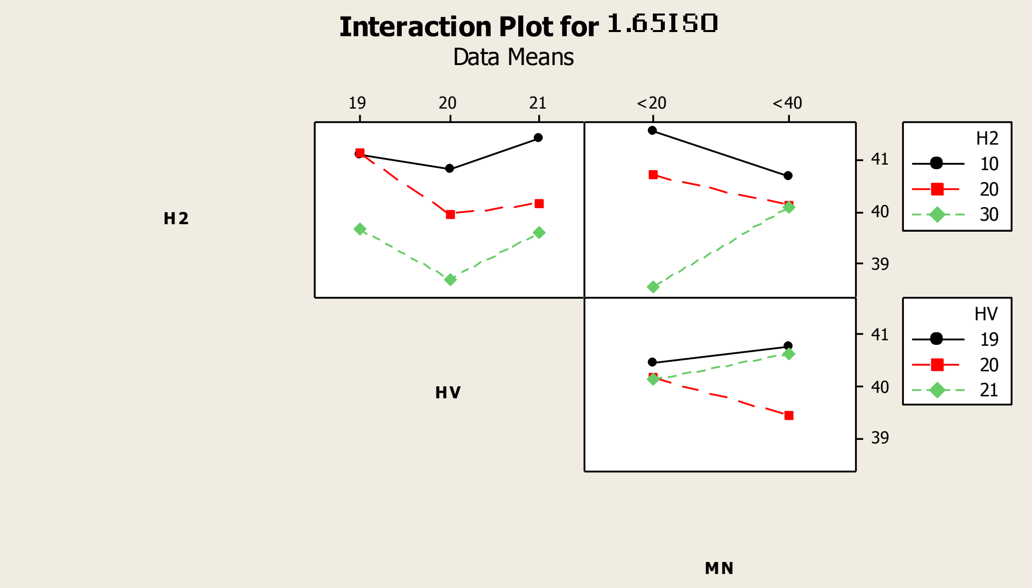
รูปที่ 4. 20 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อค่าลดทอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยของก๊าซไฮโดรเจน(H_2) เมื่อระยะเวลาในการจัดเก็บเพิ่มขึ้น มีผลโดยตรงต่อค่าลดทอนของกำลังแสง (1.65ISO) โดยมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บ สามารถอธิบายได้ว่าที่ระยะเวลาในการจัดเก็บนานขึ้นส่งผลให้ H_2 ที่ถูกอัดในเส้นใยแก้วนำแสงแพร่ออกมากขึ้น ปริมาณ H_2 ที่คงเหลือในเส้นใยแก้วขณะนำไปผ่านกระบวนการเขียนลดลงตามลำดับ นั่นคือเส้นใยแก้วมีความว่องไวต่อแสง UV ลดลงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเขียนลดลงตามไปด้วย ระยะเวลาการจัดเก็บที่ 10 วันทำให้ได้ค่าลดทอนสูงที่สุด

สำหรับปัจจัยของเครื่องในด้านของกำลังเครื่อง (HV) ระดับต่ำสุดให้ค่าลดทอนสูงสุด และไม่พบแนวโน้ม สามารถอธิบายได้ว่าที่ระดับของ HV 20 kV อาจมีผลของปัจจัยอื่นที่ส่งผลให้การลดทอนที่ระดับนี้มีค่าต่ำกว่าปกติ ซึ่งจะพิจารณาถัดไปในเชิงของอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย

สำหรับปัจจัยในส่วนของระยะเวลาหลังจากผ่านการรอบการบำรุงรักษา ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าลดทอน



รูปที่ 4. 21 ผลการวิเคราะห์อัตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 4.21 พิจารณากราฟแสดงอันตรกิริยาระหว่าง HV และ MN พบว่าที่ระดับของ HV=20 kV มีแนวโน้มของค่าลดทอนลดลงเมื่อระยะเวลาในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าในตอนเริ่มต้นของการบำรุงรักษาสามารถใช้กำลังของเครื่อง 20 kV ได้ แต่เมื่อระยะเวลาในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นไม่ควรใช้กำลังของเครื่องที่ 20 kV

สำหรับอันตรกิริยาระหว่าง H_2 และ HV มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันนั่นคือ มีค่าต่ำสุดที่ระดับของ HV=20 kV สำหรับทุกๆ ระดับของ H_2

จากผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยจะเห็นได้ว่า กำลังของเครื่องจักรที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าลดทอนดีที่สุดอยู่ที่ระดับของ HV = 19 kV และระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสงที่มี $H_2 < 10$ วัน โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลของระยะเวลาในการบำรุงรักษาเครื่องจักร

4.3.4. ผลจากการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลของการวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแบนด์วิดท์(BW), ค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง (CTW) และค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm (1.65ISO) สามารถระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการพิจารณาค่าปัจจัยหลัก และผลของอันตรกิริยาได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4. 7 แสดงระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัย	ตัวแปรตาม			
	BW	CTW	1.65ISO	โดยรวม
กำลังของเครื่องเลเซอร์ (kV)	19	19, 20, 21	-	19 kV
ระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	10, 30	10, 20, 30	10	10 วัน
จำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา (ล้านครั้ง)	-	20±5	-	20±5

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อแบนด์วิดท์ทำให้กราฟที่ได้มีความกว้างมากที่สุดที่ระดับของปัจจัยในส่วนของกำลังเครื่องเลเซอร์ (HV) ที่ 19 กิโลโวลต์ และระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้ว (H_2) ที่ 10 และ 30 วัน

ในส่วนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ทำให้มีค่าใกล้เคียง 1653 nm มากที่สุดคือ ที่ทุกระดับของปัจจัยในส่วนของกำลังเครื่องเลเซอร์ (HV) และระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (H_2) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยในส่วนของจำนวนครั้งที่แสงเลเซอร์ถูกยิงหลังผ่านการบำรุงรักษา(MN) ที่ระดับ 20±5 ล้านครั้งที่ทำให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ 1653 nm มากที่สุด

สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าลดทอนมีผลจากเพียงปัจจัยเดียวคือปัจจัยของระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) โดยระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm คือเมื่อเก็บเส้นใยแก้วไว้ที่ 10 วัน

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้ได้ค่าแบนด์วิดท์(BW) ที่กว้างที่สุด และความยาวคลื่นกึ่งกลางเข้าใกล้ 1654 nm มากที่สุด และทำให้ค่าลดทอนสูงที่สุด คือเมื่อปัจจัยของกำลังเครื่องเลเซอร์(HV) เป็น 19 kV และระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้วนำแสง(H_2) 10 วัน และระยะเวลาหลังจากทำการบำรุงรักษาที่ 20±5 ล้านครั้ง

4.4 ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง

จากนั้นนำค่าของปัจจัยทั้งหมดไปควบคุมและใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อพิจารณาความสามารถของกระบวนการได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4. 8 ผลการควบคุมปัจจัยที่ระดับ HV = 19 kV, H_2 = 10 วัน และ MN = 20±5 ล้านครั้ง

ลำดับ	BW (nm)	CTW (nm)	ISO (dB)	ลำดับ	BW (nm)	CTW (nm)	ISO (dB)
1	19.2	1653.6	44.1	23	18.6	1654.3	41.8
2	19.9	1654.8	42.6	24	19.1	1655.3	43.3
3	20.1	1654.8	41.7	25	19.0	1655.2	42.7
4	20.0	1654.3	40.2	26	18.9	1654.5	36.4
5	19.8	1654.7	46.2	27	18.6	1654.0	42.5
6	19.3	1654.2	39	28	19.5	1655.0	41.5
7	18.8	1653.9	43.3	29	19.4	1654.9	46.1
8	19.4	1655.0	42.7	30	19.5	1654.5	35.5
9	19.6	1655.0	39.9				
10	19.6	1654.5	41				
11	19.0	1654.1	41.5				
12	19.7	1654.8	48				
13	19.8	1654.8	39.1				
14	19.5	1654.3	42.9				
15	19.6	1654.4	41.4				
16	19.6	1655.3	45.9				
17	20.0	1654.4	40.7				
18	19.6	1653.9	44.1				
19	18.9	1654.2	42.6				
20	19.2	1655.2	41.7				
21	19.2	1655.2	44.2				
22	18.9	1654.2	43.7				
				ค่าเฉลี่ย	**19.36**	**1654.56**	**42.2**
				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	**0.41**	**0.46**	**2.7**

จากตารางที่ 4.8 ทำการประเมินความสามารถของกระบวนการแยกตามตัวแปรที่สนใจ คือ แบนด์วิดท์, ความยาวคลื่นกึ่งกลาง และค่าลดทอน รวมทั้งการประเมินโอกาสที่จะเกิดของเสียโดยพิจารณาผลของการเลื่อนค่าเฉลี่ยร่วมด้วย ที่ระดับ Mean shift = 0, 1.2 และ 1.5 ระดับ 0 และ 1.5 อ้างอิงจากการศึกษาโดยทั่วไป และที่ระดับ 1.2 อ้างอิงจากข้อมูลของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง (CTW) ซึ่งมีค่าเป้าหมายอยู่ที่ความยาวคลื่น 1654 nm แต่จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายไป 0.56 nm ในขณะที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.46 nm ดังนั้น Mean shift โดยประมาณ คือ 0.56/0.46 คิดเป็น 1.2σ

1) ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าแบนด์วิดท์(BW) หลังปรับปรุง

วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการโดยพิจารณาจากผลของแบนด์วิดท์(BW) และเนื่องจากค่าเป้าหมายของ BW มีค่าควบคุมเฉพาะขอบล่างด้านเดียว คือต้องมีค่าความกว้างอย่างน้อย 14 nm(1647-1661 nm) จึงพิจารณาได้ตามสมการที่ (5) ดังนี้

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \quad \text{.................................(5)}$$

$$C_{pk} = C_{pl}$$

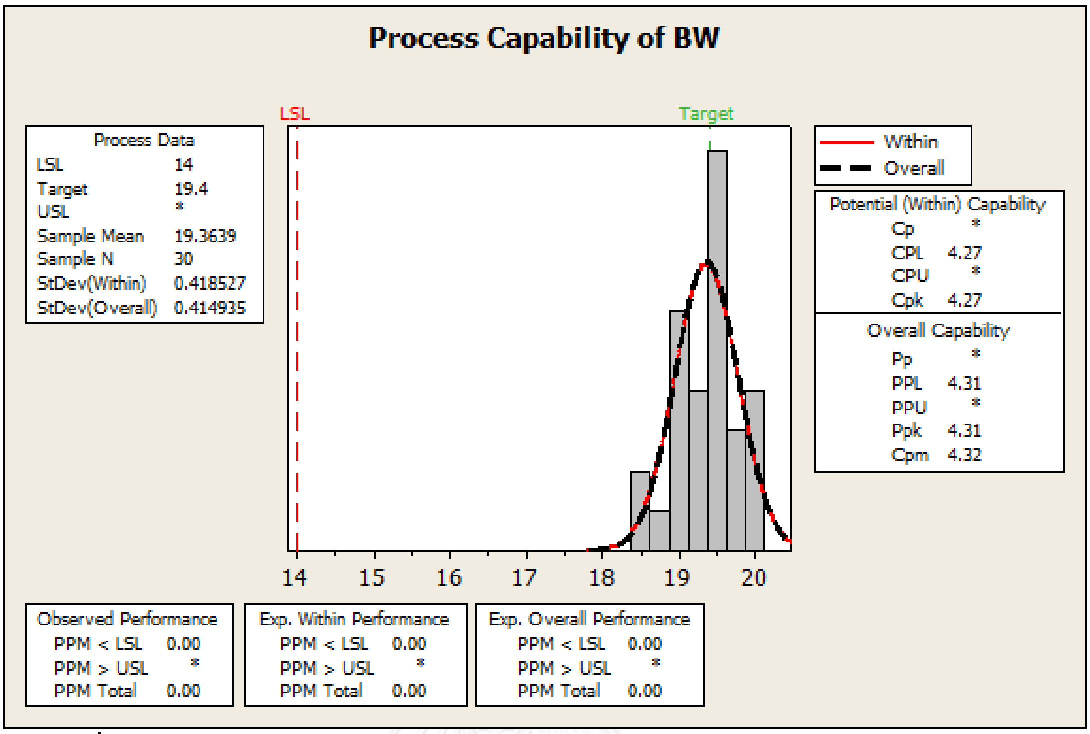
$$C_{pl} = \frac{\mu_x - LSL}{3\sigma_x} \quad \text{.................................... (6)}$$

สามารถแทนค่าและคำนวณได้ดังแสดง

$$C_{pl} = \frac{19.36 - 14}{3(0.41)}$$

$$C_{pl} = 4.31$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 22 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากผลของค่าแบนด์วิดท์ (BW)

สำหรับพิกัดข้อกำหนดเฉพาะแบบด้านต่ำด้านเดียว(C_{pl}) ของแบนด์วิดท์สามารถคำนวณได้ 4.5 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ดีสูงกว่าข้อกำหนด โดยตามมาตรฐานขั้นต่ำสำหรับกระบวนการต้องมีค่า C_{pl} ที่ 1.13

ความสามารถของกระบวนการที่ได้สามารถพิจารณาได้ในเชิงของโอกาสที่จะเกิดของเสียในหน่วย PPM หรือ หนึ่งในล้านส่วน สำหรับค่าแบนด์วิดท์ที่กระบวนการเขียนมีข้อกำหนดด้านเดียว คือ แบนด์วิดท์ ≥14 nm สามารถพิจารณาในเชิงอัตราการเกิดของจากการคำนวณหา Z_1 ได้ดังนี้

โอกาสที่จะเกิดของเสีย = f(Z_1) สำหรับส่วนที่น้อยกว่า LSL

$$Z_1 = \frac{LSL - \mu}{\sigma}$$

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.8 มีแบนด์วิดท์ที่กระบวนการเขียนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ μ = 19.36 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ = 0.41 โดยพิจารณาที่การเลื่อนของค่าเฉลี่ยระดับต่างๆ ดังนี้

Mean shift = 0σ

$$Z_1 = \frac{14 - 19.36}{0.41}$$

$$Z_1 = -13.07$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -13.07) < 0.00099 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลง 0σ

Mean shift = 1.2σ

$$Z_1 = \frac{14 - (19.36-(1.2 \times 0.41))}{0.41}$$

$$Z_1 = -11.87$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -11.87) < 0.00099 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.2σ

Mean shift = 1.5σ

$$Z_1 = \frac{14 - (19.36-(1.5 \times 0.41))}{0.41}$$

$$Z_1 = -10.57$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -10.57) < 0.00099 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.5σ

2) ผลของปัจจัยต่อค่าความความยาวคลื่นกึ่งกลาง(CTW) หลังปรับปรุง

ทำการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการโดยพิจารณาจากผลของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง(CTW) และเนื่องจากค่าเป้าหมายของ CTW มีค่าเป้าหมายที่ความยาวคลื่น 1654 nm โดยพิจารณาควบคุมความผันแปรที่ ±2.0 nm หรือ 1652-1656 nm สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (7) ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \qquad \text{.............................(7)}$$

สามารถแทนค่าและคำนวณได้ดังนี้

$$C_p = \frac{1656 - 1652}{6(0.46)}$$

$$C_p = 1.44$$

สำหรับ C_{pk} สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (8)

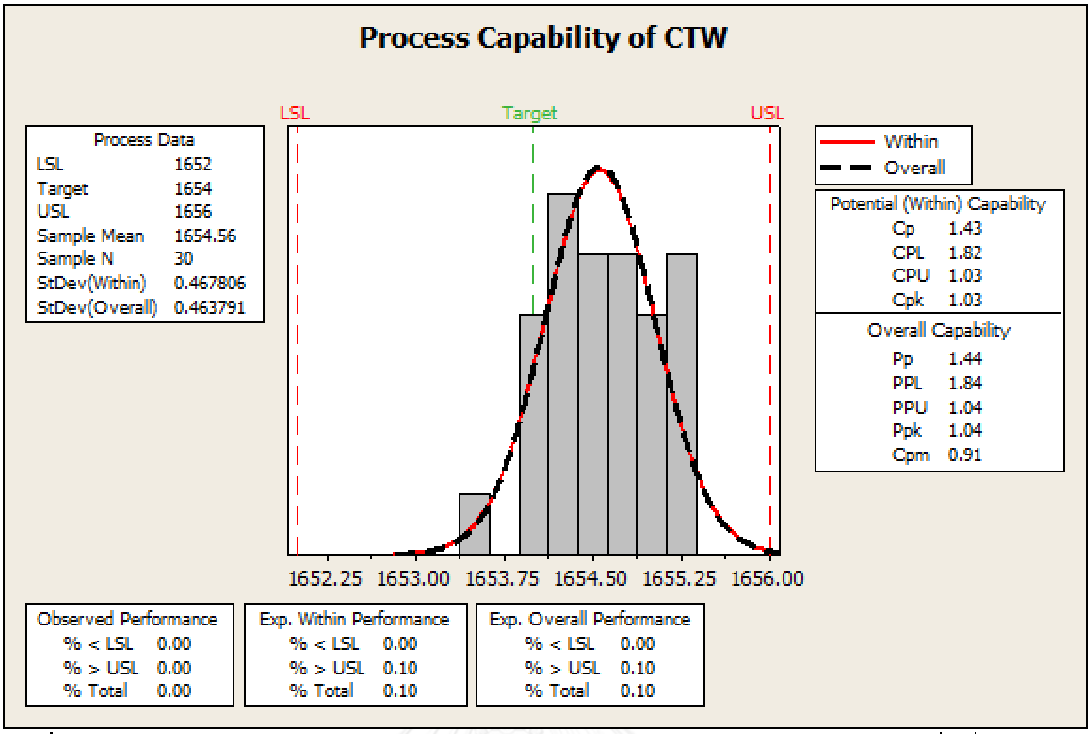
$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl})$$

$$C_{pk} = \min\left(C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma_{within}}, C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma_{within}}\right)$$

$$C_{pk} = \min\left(C_{pu} = \frac{1656 - 1654.56}{3(0.46)}, C_{pl} = \frac{1654.56 - 1652}{3(0.46)}\right)$$

$$C_{pk} = \min(1.04, 1.85)$$

$$C_{pk} = 1.04$$



รูปที่ 4. 23 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากผลของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลาง (CTW)

สำหรับพิกัดข้อกำหนดเฉพาะแบบสองด้าน (C_p) ของค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางสามารถคำนวณได้ 1.44 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดีสูงกว่าข้อกำหนด โดยตามมาตรฐานขั้นต่ำสำหรับกระบวนการต้องมีค่า C_p ที่ 1.33 ในขณะที่ C_{pk} คำนวณได้ 1.04 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์พอใช้

ความสามารถของกระบวนการที่ได้สามารถพิจารณาได้ในเชิงของโอกาสที่จะเกิดของเสียในหน่วย PPM หรือ หนึ่งในล้านส่วน สำหรับค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางที่กระบวนการเขียนมีข้อกำหนด 2 ด้าน โดยมีค่าเป้าหมายอยู่ที่ 1654±2 nm สามารถพิจารณาในเชิงอัตราการเกิดของจากการคำนวณหา $Z_{total} = Z_1 + Z_2$ ได้ดังนี้

โอกาสที่จะเกิดของเสีย = [f(Z_1) สำหรับส่วนที่น้อยกว่า LSL] + [f(Z_2) สำหรับส่วนที่มากกว่า USL]

$$Z_1 = \frac{LSL - \mu}{\sigma}$$

$$Z_2 = \frac{\mu - USL}{\sigma}$$

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.8 มีค่าความยาวคลื่นกึ่งกลางที่กระบวนการเขียนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ μ = 1654.56 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ = 0.46 โดยพิจารณาที่การเลื่อนของค่าเฉลี่ยที่ระดับต่างๆ ดังนี้

Mean shift = 0σ

$$Z_1 = \frac{1652 - 1654.56}{0.46}$$

$$Z_1 = -5.57$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย $f(Z_1 = -5.57) = 0.00119$ ppm

$$Z_2 = \frac{1654.56 - 1656}{0.46}$$

$$Z_2 = -3.13$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย $f(Z_2 = -3.13) = 870$ ppm

ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดของเสียโดยรวม คิดเป็น 870.00119 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลง 0σ

Mean shift = 1.2σ

$$Z_1 = \frac{1652 - (1654.56+(1.2\times0.46))}{0.46}$$

$$Z_1 = -6.76$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย $f(Z_1 = -6.76) < 0.00099$ ppm

$$Z_2 = \frac{(1654.56+(1.2\times0.46)) - 1656}{0.46}$$

$$Z_2 = -1.93$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย $f(Z_2 = -1.93) = 26,800$ ppm

ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดของเสียโดยรวม คิดเป็น 26,800.001 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.2σ

<u>Mean shift = 1.5σ</u>

$$Z_1 = \frac{1652 - (1654.56+(1.5x0.46))}{0.46}$$

$$Z_1 = -7.06$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย $f(Z_1 = -7.06) < 0.00099$ ppm

$$Z_2 = \frac{(1654.56+(1.5x0.46)) - 1656}{0.46}$$

$$Z_2 = -1.63$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย $f(Z_2 = -1.63) = 51,550$ ppm

ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดของเสียโดยรวม คิดเป็น 51,550.001 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.5σ

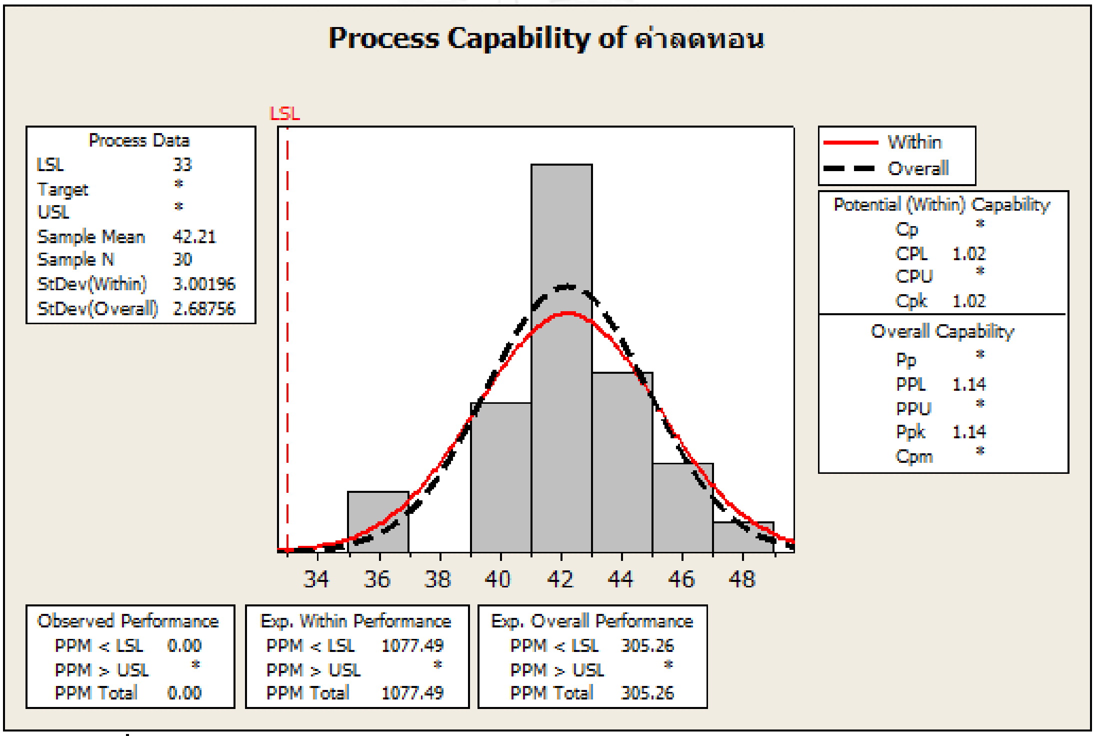
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) <u>ผลของปัจจัยที่มีค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน หลังปรับปรุง</u>

ทำการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการโดยพิจารณาจากผลของค่าลดทอน (ISO) และเนื่องจากค่าเป้าหมายของค่าลดทอนมีค่าควบคุมเฉพาะขอบล่างด้านเดียว คือต้องมีค่าลดทอนอย่างน้อย 33 nm สามารถคำนวณค่า C_p และ C_{pk} ได้ตามสมการที่ (5) และ (6) สามารถแทนค่าและคำนวณได้ดังนี้

$$C_{pl} = \frac{42.3 - 33}{3(2.7)}$$

$$C_{pl} = 1.14$$



รูปที่ 4. 24 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจากผลของค่าลดทอน (ISO)

สำหรับพิกัดข้อกำหนดเฉพาะแบบด้านต่ำด้านเดียว(C_{pl}) ของค่าลดทอนสามารถคำนวณได้ 0.88 ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าความสามารถของกระบวนการอยู่ในเกณฑ์ที่แย่ โดยตามมาตรฐานขั้นต่ำสำหรับกระบวนการต้องมีค่า C_{pl} ที่ 1.13

ความสามารถของกระบวนการที่ได้สามารถพิจารณาได้ในเชิงของโอกาสที่จะเกิดของเสียในหน่วย PPM หรือ หนึ่งในล้านส่วน สำหรับค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm ในกระบวนการ

เขียนมีข้อกำหนดด้านเดียว คือ ค่าลดทอน ≥33 dB สามารถพิจารณาในเชิงอัตราการเกิดของจากการคำนวณหา Z_1 ได้ดังนี้

โอกาสที่จะเกิดของเสีย = $f(Z_1)$ สำหรับส่วนที่น้อยกว่า LSL

$$Z_1 = \frac{LSL - \mu}{\sigma}$$

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.8 มีค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ $\mu = 42.46$ nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma = 3.57$ โดยพิจารณาที่การเลื่อนของค่าเฉลี่ยระดับต่างๆ ดังนี้

<u>Mean shift = 0σ</u> $$Z_1 = \frac{33 - 42.46}{3.57}$$

$$Z_1 = -2.65$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -2.65) = 4,020 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลง 0σ

<u>Mean shift = 1.2σ</u> $$Z_1 = \frac{33 - (42.46-(1.2 \times 3.57)}{3.57}$$

$$Z_1 = -1.45$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -1.45) = 75,350 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.2σ

<u>Mean shift = 1.5σ</u> $$Z_1 = \frac{33 - (42.46-(1.5 \times 3.57)}{3.57}$$

$$Z_1 = -1.15$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติ พบว่าโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -1.15) = 125,070 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.5σ

เมื่อค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงทำให้โอกาสที่จะเกิดของเสียเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทั้งนี้สามารถพิจารณาโอกาสที่จะเกิดของเสียเมื่อค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มคลาดเคลื่อนที่ระดับ 0σ, 1.2σ และ 1.5σ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4. 9 โอกาสที่จะเกิดของเสียเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย

ตัวแปรตาม	C_p	**โอกาสที่จะเกิดของเสีย (PPM)**		
		0σ	**1.2σ**	**1.5σ**
BW	4.31	<0.00099	<0.00099	<0.00099
CTW	1.44	870	26,800	51,550
ค่าลดทอน	0.88	4,020	75,350	125,070

จากตารางที่ 4.9 พบว่าตัวแปรตามที่มีผลต่อโอกาสที่จะเกิดของเสียมากที่สุดคือ ค่าลดทอน โดยมีโอกาสเกิดของเสียสูงถึง 125,070 ppm เมื่อค่าเฉลี่ยมีความคลาดเคลื่อนที่ระดับ 1.5σ แต่ในส่วนของ BW เนื่องจากความสามารถของกระบวนการค่อนข้างสูงมาก C_p = 4.31 จึงทำให้มีโอกาสในการเกิดของเสียน้อยกว่า 0.00099 ppm สำหรับตัวแปรในส่วนของ CTW ที่ระดับความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย 1.5σ มีโอกาสที่จะเกิดของเสีย 51,550 ppm ทั้งนี้สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนและหลังการปรับปรุงได้ตามตารางที่ 4.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 10 ผลของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง เมื่อควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนที่ 250 วินาที, HV = 19 kV, MN = 20$\pm$5 ล้าน และระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10 วัน

รายการ		ค่าเป้าหมาย (1)	ก่อนปรับปรุง (2)	หลังปรับปรุง (3)	หลังปรับปรุงเทียบกับ ค่าก่อนปรับปรุง (3)-(2)		หลังปรับปรุงเทียบกับ ค่าเป้าหมาย (3)-(1)	
แบนด์วิดท์ : BW (nm)	$\overline{X}$	≥14	19.31	19.36	+0.05	O	+5.36	O
	SD	-	0.60	0.41	-0.19	O	-	-
	C_p	1.13	2.97	4.31	+1.34	O	+2.98	O
	DPO	-	<0.00099	<0.00099	0	-	-	-
ความยาวคลื่นกึ่งกลาง : CTW (nm)	$\overline{X}$	1654	1653.89	1654.56	+0.67	O	+0.56	O
	SD	-	0.58	0.46	-0.12	O	-	-
	C_p	1.33	1.15	1.44	+0.29	O	+0.11	O
	C_{pk}	1.33	1.09	1.04	-0.05	X	-0.29	X
	DPO	-	429,100	870	-428,230	O	-	-
ค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm (dB)	$\overline{X}$	≥33	38.93	42.46	+3.53	O	+9.46	O
	SD	-	3.35	3.57	+0.22	X	-	-
	C_p	1.13	0.59	1.14	+0.55	O	+0.01	O
	DPO	-	38,360	4,020	-34,340	O	-	-

เมื่อ O หมายถึง กระบวนการดีขึ้น และ X หมายถึงกระบวนการแย่ลง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับกระบวนการที่ปรับปรุงแล้วมีค่าที่ดีขึ้นยกเว้น C_{pk} ของความยาวคลื่นกึ่งกลางที่พบว่ากลังการปรับปรุงมีการเลื่อนไปห่างจากค่าเป้าหมายมากกว่าก่อนปรับปรุง ทำให้ค่า C_{pk} ลดลดจากกระบวนการเดิม 0.05 นอกจากนั้นก็ยังพบในส่วนของค่าการกระจายตัวของค่าลดทอนที่กระบวนการหลังปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้นจาก 3.35 เป็น 3.57 แต่เนื่องจากหลังปรับปรุงสามารถพัฒนาค่าเฉลี่ยได้ดีขึ้นทำให้ C_p โดยรวมของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้นหลังการปรับปรุง

4.5 การประเมินขอบเขตของระยะเวลาการจัดเก็บ

4.5.1. ระยะเวลาการจัดเก็บที่มีต่ออัตราการเกิดของเสีย

เนื่องจากการควบคุมกระบวนการให้ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วคงที่ 10 วันนั้นค่อนข้างเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากจำเป็นต้องปรับจำนวนเส้นใยแก้วสำหรับเตรียมอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูงจำนวนน้อยลงมากเพื่อให้พอดีกับระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วสำหรับวันที่ต้องการผลิต เป็นการเพิ่มความถี่และความยากลำบากในขั้นตอนการเตรียม เพื่อให้เกิดความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติจึงจะเป็นไปในลักษณะที่เป็นการควบคุมเชิงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาจัดเก็บ ดังนั้นเพื่อพิจารณาความสามารถของกระบวนการในเชิงปฏิบัติจึงได้ทำการพิจารณาสามารถของกระบวนการตามระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้วโดยตรง เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(H_2) กับความสามารถของกระบวนการ เมื่อกำลังของเครื่องเลเซอร์(HV) เป็น 19 kV และระยะเวลาหลังจากทำการบำรุงรักษาเป็น 20±5 ล้านครั้ง ดังนี้

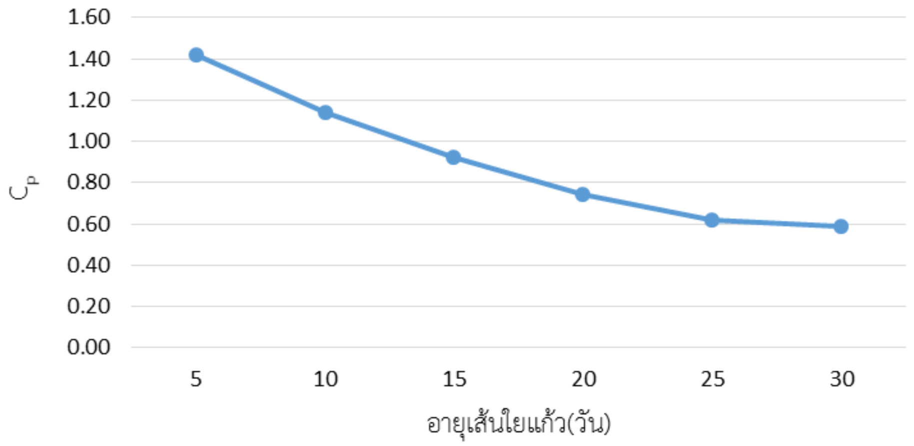
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 11 ค่าลดทอนจากการควบคุมปัจจัยที่ระดับ HV = 19 kV และ MN = 20±5 ล้านครั้ง โดยพิจารณาที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยเส้นใยแก้ว 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 วัน

ลำดับ	ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว(วัน)					
	5	10	15	20	25	30
1	42.5	44.1	49.2	38.2	37.4	38.4
2	47.4	42.6	42.7	38.9	39.5	35.4
3	43.8	41.7	43.8	35.9	39	39.3
4	45.1	40.2	39.1	43.2	40.4	39.4
5	46.6	46.2	44.9	40.2	35.9	43.1
6	39.2	39	43	42.6	39.6	43
7	40.8	43.3	38.7	37.8	37.7	43.1
8	45.7	42.7	36.9	42	29.3	36.8
9	44.8	39.9	44.4	39.2	38.5	44
10	44.4	41	40.6	44.5	38.3	41.2
11	42.3	41.5	45.6	40	35	42.1
12	46.1	48	37	42.4	42.1	40.4
13	45.2	39.1	39.4	39.7	39.9	35.1
14	38	42.9	39.9	35.9	37.6	37.8
15	48.3	41.4	42.2	36.9	40.2	39.2
16	42	45.9	40.6	38.7	36.4	37.7
17	45.4	40.7	40.4	34.7	45.6	41.5
18	42.5	44.1	42.5	49.2	38.4	37.4
19	47.4	42.6	44.5	42.7	35.4	39.5
20	43.8	41.7	43.8	43.8	39.3	39
21	45.1	44.2	43.1	39.1	39.4	42.4
22	46.6	43.7	40.6	44.9	43.1	35.9
23	39.2	41.8	39.2	43	43	39.6
24	40.8	43.3	40.8	38.7	43.1	37.7
25	45.7	42.7	45.7	36.9	36.8	29.3
26	44.8	36.4	35.9	44.4	44	36.4
27	44.4	42.5	36.9	40.6	41.2	38.3
28	42.3	41.5	40.3	45.6	42.1	32
29	46.1	46.1	41	37	40.4	42.1
30	45.2	35.5	45.2	39.4	35.1	39.9
ค่าเฉลี่ย	**44.05**	**42.21**	**41.60**	**40.54**	**39.12**	**38.90**
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	**2.60**	**2.69**	**3.11**	**3.39**	**3.30**	**3.32**
C_p	**1.42**	**1.14**	**0.92**	**0.74**	**0.62**	**0.59**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.11 สามารถพิจารณาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บที่เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าเมื่อระยะเวลาในการจัดเก็บที่ 5 และ 10 วัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 2.6 และเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันที่ระยะเวลาในการจัดเก็บ 15, 20, 25 และ 30 วัน นำค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มาพิจารณาหาค่า C_p พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการจัดเก็บ ซึ่งสามารถเห็นแนวโน้มของการลดลงได้อย่างชัดเจนเมื่อนำมาพิจารณาในลักษณะของกราฟเส้นที่แต่ละระยะเวลาจัดเก็บดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4. 25 ความสัมพันธ์ของค่า C_p กับระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว

จากรูปที่ 4.25 วิเคราะห์ค่า C_p แบ่งตามระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วพบว่ามีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บ ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า เมื่อเส้นใยแก้วที่ถูกเก็บไว้นานขึ้นสิ่งที่ส่งผลโดยตรงคือปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในเส้นใยแก้วนำแสง ยิ่งเก็บไว้นานปริมาณก๊าซไฮโดรเจนยิ่งลดลง ทำให้ที่กระบวนการเขียนเกรตติงที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนน้อยได้ค่าลดทอนต่ำลงตามลำดับ ส่งผลโดยตรงต่อค่าเฉลี่ยของค่าลดทอนมีค่าต่ำลง นอกจากนั้นเวลาที่จัดเก็บที่นานขึ้นอาจส่งผลให้การแพร่ออกของก๊าซไฮโดรเจนของแต่ละเส้นใยแก้วไม่สม่ำเสมอกัน ส่งผลต่อการกระจายตัวของข้อมูลมีแนวโน้มกระจายตัวมากขึ้น ทำให้ความสามารถของกระบวนการลดลงตามลำดับ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพิจารณาความสามารถของกระบวนการซึ่งขึ้นกับระยะเวลาในการจัดเก็บได้ เพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคต

สำหรับค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนมีข้อกำหนดด้านเดียว คือ ค่าลดทอน $\geq$33 dB สามารถพิจารณาในเชิงโอกาสที่จะเกิดของเสีย(DPO) ในหน่วย PPM(หนึ่งในล้านส่วน) จากการคำนวณหา Z_1 ได้ดังนี้

โอกาสที่จะเกิดของเสีย(DPO) = $f(Z_1)$ สำหรับส่วนที่น้อยกว่า LSL

$$Z_1 = \frac{LSL - \mu}{\sigma}$$

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.11 โดยพิจารณาที่ระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วที่ 5 วัน มีค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ μ = 44.05 dB และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ = 2.60 โดยพิจารณาที่การเลื่อนของค่าเฉลี่ยระดับต่างๆ ดังนี้

<u>Mean shift = 0σ</u>

$$Z_1 = \frac{33 - 44.05}{2.60}$$

$$Z_1 = -4.25$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -4.25) = 10.70 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลง 0σ หรือคิดเป็นโอกาสที่จะเกิดของเสีย 0.00107%

<u>Mean shift = 1.2σ</u>

$$Z_1 = \frac{33 - (44.05-(1.2x2.60)}{2.60}$$

$$Z_1 = -3.05$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -3.05) = 1,140 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.2σ หรือคิดเป็นโอกาสที่จะเกิดของเสีย 0.114%

<u>Mean shift = 1.5σ</u>

$$Z_1 = \frac{33 - (44.05-(1.5x2.60)}{2.60}$$

$$Z_1 = -2.75$$

จากตารางการกระจายตัวแบบปกติ พบว่าโอกาสที่จะเกิดของเสีย f(Z = -2.75) = 2,980 ppm เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง 1.5σ หรือคิดเป็นโอกาสที่จะเกิดของเสีย 0.298%
คำนวณหาโอกาสที่จะเกิดของเสียด้วยวิธีการเดียวกันนี้ที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วระดับอื่นๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.12

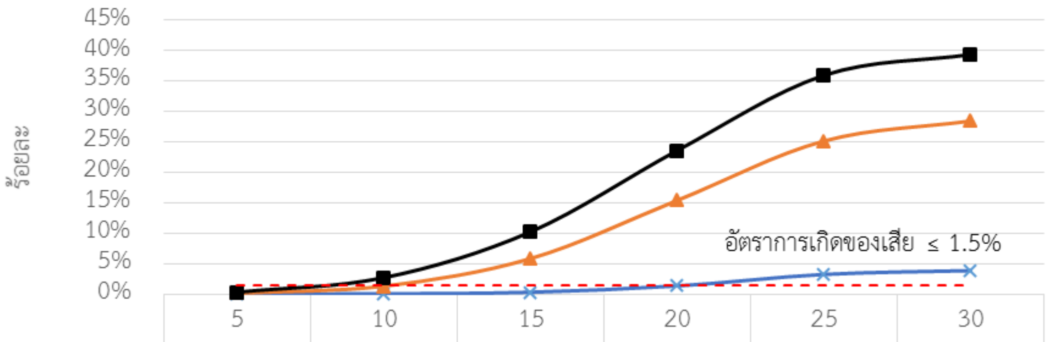
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 12 โอกาสที่จะเกิดของเสีย(DPO) ในหน่วย ppm และ % ที่คำนวณได้จากแต่ละระดับของปัจจัยเนื่องจากระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว

ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	C_p	**DPO**					
		0σ		**1.2σ**		**1.5σ**	
		ppm	%	ppm	%	ppm	%
5	1.42	10.7	0.00%	1,140	0.11%	2,980	0.30%
10	1.14	300	0.03%	12,870	1.29%	26,800	2.68%
15	0.92	2,800	0.28%	58,210	5.82%	102,040	10.20%
20	0.74	13,210	1.32%	153,860	15.39%	235,760	23.58%
25	0.62	32,160	3.22%	251,430	25.14%	359,420	35.94%
30	0.59	38,360	3.84%	284,340	28.43%	393,580	39.36%

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่า C_p ที่ลดลงทำให้โอกาสที่จะเกิดของเสียเพิ่มขึ้น โดยอัตราของเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการจัดเก็บเส้นใยแก้ว ที่ระยะเวลาการจัดเก็บต่ำที่สุดที่ 5 วันมีโอกาสที่จะเกิดของเสียเพียง 10.7 ppm ในขณะที่เมื่อจัดเก็บในระยะที่นานขึ้นถึง 30 วัน พบว่ามีโอกาสที่จะเกิดของเสียมากที่สุด 38,360 ppm หรือ 3.84% จากการผลิตทั้งหมดเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลง (0σ) โอกาสที่จะเกิดของเสียแตกต่างจากที่ระยะเวลาการจัดเก็บ 5 วันโดยเพิ่มขึ้นประมาณ 38,350 ppm สำหรับในกรณีที่พบว่ามีการเลื่อนของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2σ และ 1.5σ พบว่าของเสียมีโอกาสเกิดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



	5	10	15	20	25	30
0σ	0.00%	0.03%	0.28%	1.32%	3.22%	3.84%
1.2σ	0.11%	1.29%	5.82%	15.39%	25.14%	28.43%
1.5σ	0.30%	2.68%	10.20%	23.58%	35.94%	39.36%
Target	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%

รูปที่ 4. 26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการจัดเก็บเส้นใยแก้วกับร้อยละของโอกาสที่จะเกิดของเสีย

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่จะเกิดของเสียเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลง (0σ) พบว่าสามารถประเมินขอบเขตระยะเวลาในการจัดเก็บเพื่อควบคุมไม่ให้พบงานเสีย ≥1.5% ได้เมื่อจัดเก็บเส้นใยแก้วในช่วงเวลาไม่เกิน 20 วัน แต่หากค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนไป 1.2σ และ 1.5σ ต้องจัดเก็บในช่วงเวลาไม่เกิน 10 และ 5 วันตามลำดับ

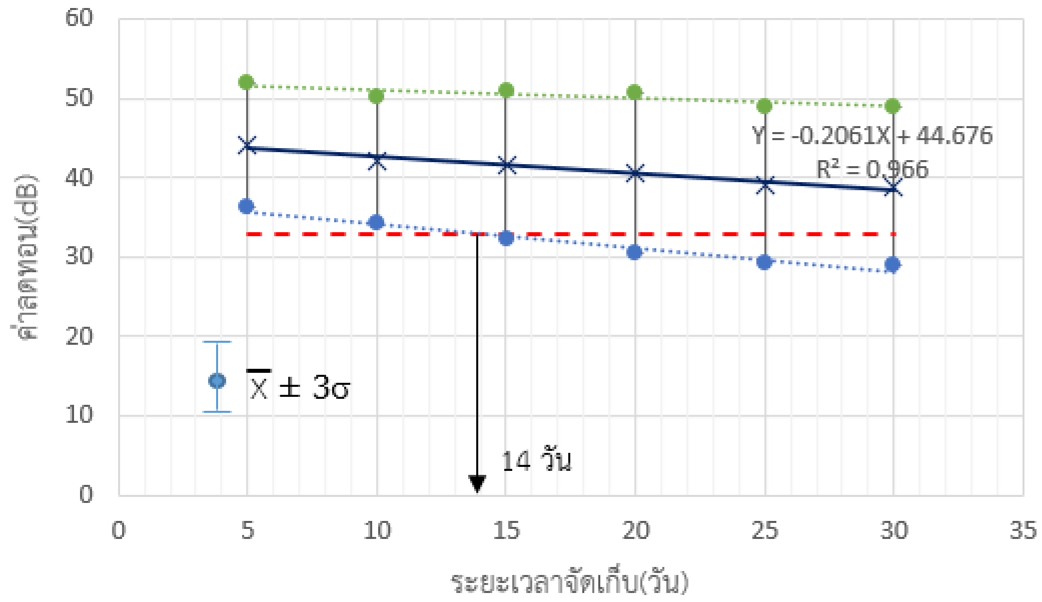
4.5.2. ระยะเวลาจัดเก็บที่มีต่อค่ากำลังแสงหลังผ่านกระบวนการเขียน

นอกจากการประเมินระยะเวลาการจัดเก็บจากร้อยละของโอกาสที่จะเกิดของเสียแล้วยังสามารถพิจารณาได้จากข้อกำหนดในส่วนของค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนต้อง ≥33 dB โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 99% (±3σ) นำข้อมูลบางส่วนเฉพาะค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าลดทอนหลังผ่านกระบวนการเขียนจากตารางที่ 4.11 มาวิเคราะห์แนวโน้มเทียบกับระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4. 13 ค่าลดทอนโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กระบวนการเขียน

ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	ค่าลดทอน (dB)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	44.05	2.60
10	42.21	2.69
15	41.60	3.11
20	40.54	3.39
25	39.12	3.30
30	38.90	3.32

จากตารางที่ 4.13 พบว่าค่าลดทอนโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการจัดเก็บเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าเป้าหมายของค่าลดทอน $\geq$ 33 dB มาพิจารณาร่วมกับค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถระบุแนวโน้มของงานเสียที่จะเกิดขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4. 27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาจัดเก็บกับค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน

จากรูปที่ 4.27 พบว่าค่าลดทอนโดยเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาจัดเก็บในหน่วยของวันที่ระดับ R^2 = 0.966 โดยมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (7)

$$Y = -0.21X + 44.68 \quad \text{................................(7)}$$

เมื่อ Y ค่าลดทอนที่กระบวนการเขียน (dB)

X ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)

ดังนั้นเราสามารถพิจารณาข้อจำกัดของระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วได้จากค่าลดทอนที่กระบวนการเขียนต้องมากกว่า 33 dB สามารถแทนสูตรได้ดังนี้

$$(33) = -0.21X + 44.68$$

$$X = 55.60$$

เพราะฉะนั้น สามารถบอกได้ว่าเส้นใยแก้วที่ผ่านการอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูง สามารถจัดเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -30 ถึง -35 องศาเซลเซียสได้นานมากที่สุดถึง 55 วัน แต่หากพิจารณาร่วมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 99% จากรูปที่ 4.27 พบว่าระยะเวลาจัดเก็บที่จะเริ่มส่งผลต่อโอกาสในการเกิดของเสียคือที่ระยะเวลาจัดเก็บ 14 วัน

นำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานจริงได้โดยกำหนดให้จัดเก็บเส้นใยแก้วน้อยลงกว่า 14 วันโดยลดจำนวนการผลิตต่อ Batch ที่กระบวนการอัดก๊าซไฮโดรเจนลง และกำหนดให้ใช้กำลังเครื่องจักรอยู่ที่ระดับเดียวกันคือ 19 kV และควบคุมการบำรุงรักษาให้อยู่ภายใต้จำนวนครั้งในการยิงแสงเลเซอร์ไม่เกิน 20 ล้านครั้ง และทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเพื่อลดโอกาสในการเกิดชิ้นงานเสีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.6 การประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์

กระบวนการผลิตแบรกเกรตติงบนเส้นใยแก้วนำแสงเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยแก้วไม่มีกระบวนการประกอบชิ้นส่วนอื่นๆ ลักษณะของกระบวนการจึงมีต้นทุนด้านวัสดุชนิดเดียว คือ เส้นใยแก้ว 4 บาทต่อเส้น สำหรับต้นทุนส่วนอื่นๆ จะเป็นต้นทุนมากจากค่าเครื่องจักรเฉลี่ย 36 บาทต่อเส้น และค่าแรงและวัสดุสิ้นเปลืองประมาณ 5 บาทต่อเส้น รวมคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยประมาณ 45 บาท นำข้อมูลการเกิดของเสียมาประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์โดยพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยก่อนและหลังการปรับปรุงสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4. 14 ตารางแสดงต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตเส้นใยแก้วนำแสง

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรังปรุง	ผลการปรับปรุง
1) ปัจจัย			
- ระยะเวลาจัดเก็บโดยเฉลี่ย (วัน)	25	10	
- กำลังเครื่องเลเซอร์ (kV)	19-21	19	
- จำนวนครั้งในการยิงแสงเลเซอร์(ล้านครั้ง)	ไม่มีการควบคุม	0-40	
2) สัดส่วนของเสียที่พบโดยเฉลี่ย (%)	2.15%	0.5%	-1.65%
- คิดเป็นร้อยละ (%) ลดลง			23%
3) แผนการผลิตต่อปี (ชิ้น)	960,000		
4) จำนวนของเสียต่อปี (ชิ้น)	20,640	4,800	15,840
5) ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิต(บาทต่อเส้น)	45		
6) มูลค่าการสูญเสีย (บาท)	928,800	21,600	712,800
- คิดเป็นร้อยละ (%) ลดลง	100%	23%	-77%

จากตารางที่ 4.14 แสดงข้อมูลของการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่าหลังปรับปรุงสามารถลดสัดส่วนของเสียลงเหลือโดยเฉลี่ยประมาณ 0.5% หรือลดลงจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 23 ในการผลิตต่อปีพิจารณาที่กำลังการผลิตราว 960,000 ชิ้นต่อปี สามารถลดค่าใช้จ่ายเนื่องจากของเสียคิดเป็นเงิน 712,800 บาทต่อปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเล่มนี้ได้ศึกษากระบวนการเขียนบนเส้นใยแก้วนำแสง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าลดทอนที่ความยาวคลื่น 1650 nm (1650 Isolation Loss : 1.65ISO) โดยปัจจัยที่ส่งผลประกอบด้วย ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสงโดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสงที่มีก๊าซ H_2 , กำลังของเครื่องเลเซอร์ (HV) และ ระยะเวลาหลังจากการบำรุงรักษา ผลการวิเคราะห์ทำให้สรุปได้ว่าที่กำลังของเครื่องเลเซอร์ 19 kV ,ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10 วัน และจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษา 20±5 ล้านครั้งทำให้ความสามารถของกระบวนการดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่าลดทอน

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ Full factorial design สามารถสรุปผลที่ได้จากการศึกษา ดังนี้

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการเขียนที่เหมาะสม เมื่อเส้นใยแก้วถูกจัดเก็บน้อยกว่า 30 วัน, กำลังเครื่องจักรที่ใช้อยู่ในช่วง 19 ถึง 21 kV และจำนวนครั้งที่ยิงแสงเลเซอร์น้อยกว่า 40 ล้านครั้งหลังผ่านการบำรุงรักษาเพื่อให้ได้ค่าลดทอนสูงที่สุด คือ ใช้เวลาเขียน 250 วินาที
2. ในการพิจารณาตัวแปรทดแทนสำหรับใช้ในการศึกษาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าลดทอนเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน(H_2 loss: Y) กับวันที่ใช้ในการจัดเก็บ(X) โดย $Y = -0.0365X + 5.7941$
3. จากการศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อแบนด์วิดท์ พบว่าปัจจัยที่ทำให้แบนด์วิดท์มีค่ามากที่สุดเมื่อระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วที่ 10 และ 30 วัน และที่กำลังของเครื่องเลเซอร์ 19 kV โดยไม่มีผลของปัจจัยในส่วนของจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษา
4. จากการศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อความยาวคลื่นกึ่งกลาง พบว่าปัจจัยที่ทำให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ความยาวคลื่น 1654 nm มากที่สุดคือที่ทุกระดับปัจจัยของระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10, 20 และ 30 วัน และกำลังของเครื่องเลเซอร์ที่ 19 และ 20

kV โดยมีผลเนื่องจากอันตรกิริยาโดยที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10 วันจะให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดเมื่อใช้ HV = 20 kV, ที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 20 วันจะให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดเมื่อใช้ HV = 19 kV, ที่ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 30 วันจะให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดเมื่อใช้ HV = 21 kV และมีผลของจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษาที่ 20±5 ล้านครั้งทำให้ความยาวคลื่นกึ่งกลางใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากที่สุด

5. จากการศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อค่าลดทอนเนื่องจากเกรตติง พบว่ามีเพียงปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อค่าลดทอนคือระยะเวลาจัดเก็บของเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ระยะเวลาการจัดเก็บ 10 วันจะให้ค่าการสดทอนสูงที่สุด
6. การวิเคราะห์แบบ Full factorial design สามารถช่วยในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อการปรับปรุงกระบวนการ โดยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลทำให้ความสามารถของกระบวนการดีที่สุดคือกำลังของเครื่องเลเซอร์ 19 kV, ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว 10 วัน และจำนวนครั้งที่ยิงด้วยแสงเลเซอร์หลังผ่านการบำรุงรักษา 20±5 ล้านครั้งทำให้ความสามารถของกระบวนการดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่าลดทอนและลดลงตามระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสง
7. การศึกษาขอบเขตของการจัดเก็บเส้นใยแก้วโดยพิจารณาร่วมกันจาก 2 ข้อจำกัด คือ
    a. ข้อจำกัดในส่วนของโอกาสในการเกิดของเสีย ≤1.5% เมื่อคิดที่ค่าเฉลี่ยไม่มีความคลาดเคลื่อน (0σ), ค่าเฉลี่ยมีความคลาดเคลื่อน 1.2σ และ 1.5σ การจัดเก็บที่เหมาะสมต้องจัดเก็บต้องน้อยกว่า 20 วัน, น้อยกว่า 10 วัน และน้อยกว่า 5 วัน ตามลำดับ
    b. ข้อจำกัดในส่วนของค่าลดทอนหลังผ่านการเขียนเกรตติงต้องมากกว่า 33 dB

    สามารถบอกได้ว่าเส้นใยแก้วที่ผ่านการอัดก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูง สามารถจัดเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -30 ถึง -35 องศาเซลเซียสได้นานมากที่สุดถึง 55 วัน เมื่อพิจารณาเฉพาะจากค่าเฉลี่ยโดยไม่คำนึงถึงอัตราการเกิดของเสีย หากพิจารณาร่วมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าสามารถจัดเก็บได้ 14 วัน โดยไม่พบของเสียที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. หลังการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดโอกาสในการเกิดของเสียลงได้ 23% จากเดิม 21,500 ppm เหลือ 5,000 ppm คิดเป็นยอดเงินที่สามารถลดได้ 712,800 บาท และความสามารถของกระบวนการดีขึ้นจากเดิม C_p = 0.59 เป็น 1.14

5.2. ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อพิจารณาคุณภาพของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการเขียนไม่สามารถกำหนดจากการปรับตั้งเครื่องได้ ควรจะมีเครื่องมือวัดที่สามารถระบุคุณภาพของแสงก่อนผ่านแม่แบบเกรตติง

2. การจัดเก็บเส้นใยแก้วที่ผ่านการอัดก๊าซ H_2 ควรมีการบรรจุในวัสดุเก็บความเย็นอีกชั้นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะมีการเปิด-ปิดตู้เย็นเพื่อนำของออก

5.3. อุปสรรคปัญหาในงานวิจัย

1. เพื่อควบคุมปัจจัยในส่วนของระยะเวลาในการจัดเก็บ ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง อาจมีผลเนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องจักรทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน

2. ในส่วนของปัจจัยของระยะเวลาที่ใช้ในการบำรุงรักษา เนื่องจากไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาในแต่ละครั้งให้มีความเท่าเทียมกันได้ จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อน

5.4. ข้อจำกัดในงานวิจัย

เนื่องจากกลไกในการเกิดค่า 1650 Isolation Loss เป็นความรู้ค่อนข้างเฉพาะทาง ทำให้การหาปัจจัยที่อาจส่งผลมาจากประสบการณ์ของผู้วิจัยและเจ้าหน้าที่เกี่ยวข้องเท่านั้น จึงสามารถระบุผลที่เกิดจากการปัจจัยเหล่านั้นได้ แต่ไม่ยังไม่สามารถกลไกที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแต่ละปัจจัยเหล่านี้ว่าส่งผลต่อค่าทางแสงที่เราสนใจได้อย่างไร

รายการอ้างอิง

1. รศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน, เครือข่ายใยแก้วนำแสง. 2541: สำนักพิมพ์ บริษัท ส. เอเชียนเพรส จำกัด.
2. Mora, J., et al., *Tunable chirp in Bragg gratings written in tapered core fibers.* Optics Communications, 2002. 210: p. 51-55.
3. n, R.M., et al., *Analysis on the effect of UV beam intensity profile on the refractive index modulation in phasemask based fiber Bragg grating writing.* Optics Communications, 2012. 285: p. 5351–5358.
4. วัชราภรณ์ พรพานิช and อ. ฤกษบุตร, การจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลของโครงสร้างเส้นใยแก้วเกรตติ้งที่ถูกเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อความยาวคลื่นแบร็ก. Songklanakarin J. Sci. Technol., 2546. 25(6): p. 730-741.

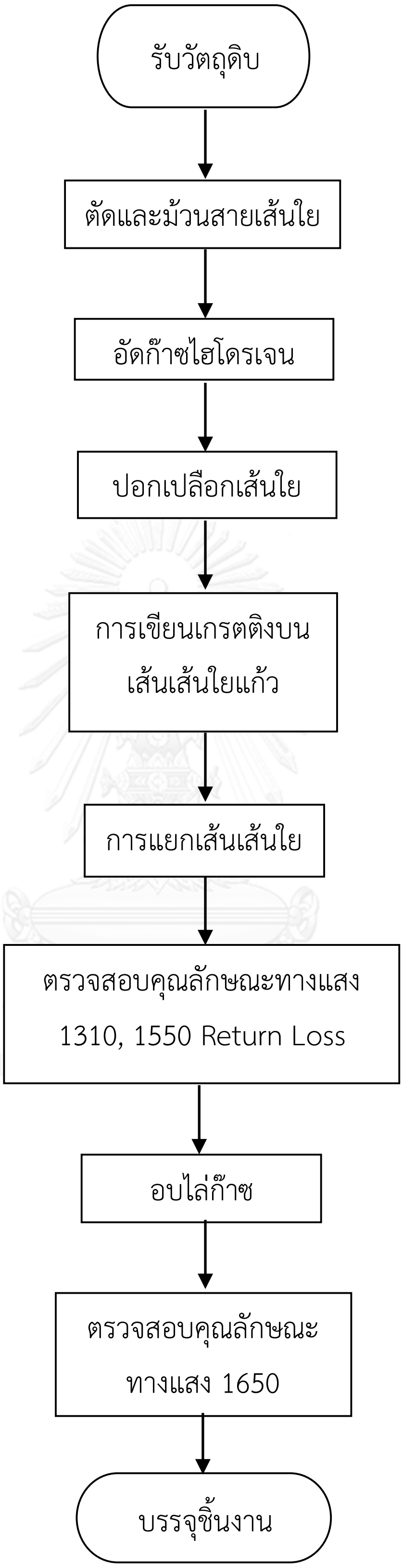
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ข้อมูลเกี่ยวกับบริษัทตัวอย่าง

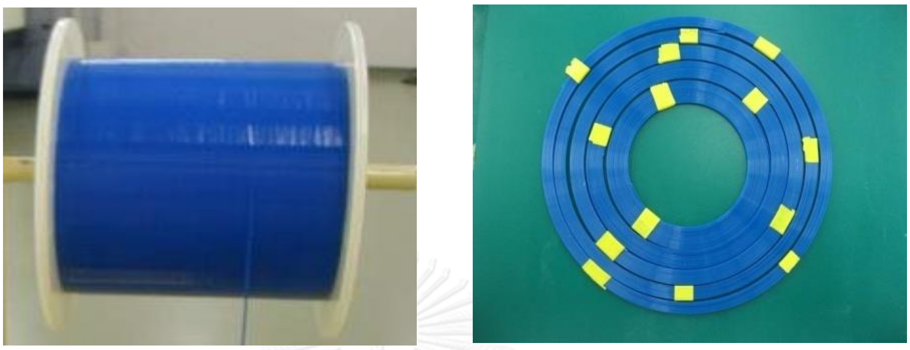
ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างเป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนกลับ (Reflection Index) จากการเขียนเกรตติงลงบนเส้นเส้นใยแก้วโดยใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นแสงตามความยาวคลื่นที่ต้องการ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พิจารณาจากค่าสูญเสียของกำลังแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับที่ความยาวคลื่นนั้นๆ ต้องมากเพียงพอตามที่ลูกค้ากำหนด มีการตรวจสอบชิ้นงานแบบสุ่มตรวจสอบขั้นสุดท้ายประมาณ 5% จากจำนวนงานที่ผลิตทั้งหมด หลังจากนั้นเส้นเส้นใยแก้วจะถูกส่งไปยังลูกค้าภายในซึ่งจะนำเส้นเส้นใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัตินี้ไปทำการประกอบเป็นหัวเชื่อมต่อ(Connecter) นำไปใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางแสงที่ต้องการ ทั้งนี้ปัญหาที่พบหลังจากส่งเส้นใยแก้วไปให้ลูกค้าคือ เปอร์เซ็นงานเสียที่หลุดไปจากการสุ่มตรวจสอบมีปริมาณมากกว่าที่ลูกค้ากำหนดบ่อยครั้ง รายละเอียดของกระบวนการผลิตโดยสังเขปแสดงในแผนผังกระบวนการผลิตรูปที่ 5.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5. 1 แผนผังกระบวนการผลิต

วัตถุดิบที่ได้รับมาในตอนเริ่มแรกจะมีลักษณะเป็นเทปเส้นใยแก้ว เกิดจากการเรียงต่อกันของเส้นเส้นใยแก้ว 8 เส้น ซึ่งถูกยึดโดยมีพลาสติกใสห่อหุ้มทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นแพ การตรวจสอบจะเป็นไปในลักษณะของการใช้สายตาตรวจสอบลักษณะภายนอก และจดบันทึกข้อมูลของเส้นใยแก้วแต่ละม้วน ถัดมาเทปเส้นใยแก้วจะถูกนำมาตัดแบ่งให้มีความยาวเส้นละ 8 เมตรและม้วนแบ่งออกเป็น 5 ขนาด

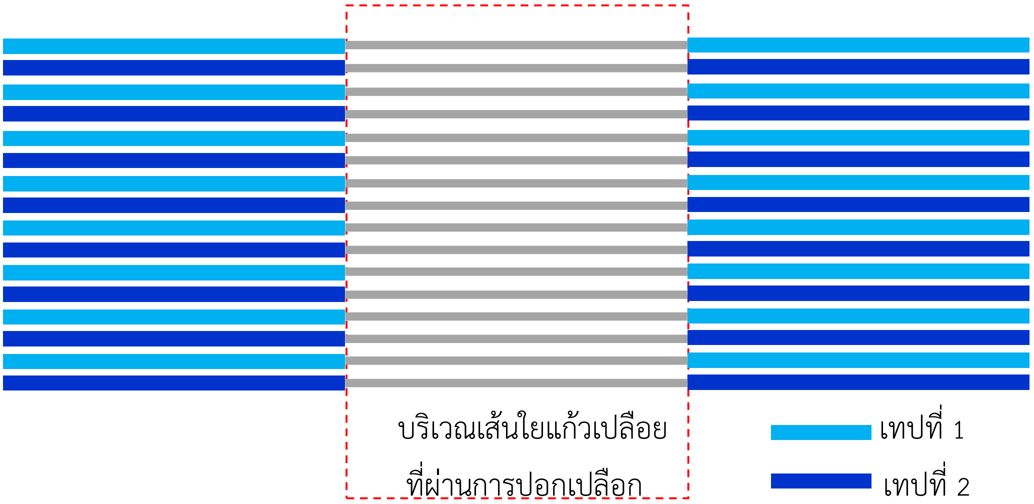


รูปที่ 5. 2 ลักษณะของม้วนเส้นใยแก้วเริ่มแรก และม้วนเส้นใยแก้วหลังจากทำการตัดแบ่ง

ม้วนเส้นใยแก้วที่ได้จะถูกนำส่งต่อไปยังกระบวนการอัดก๊าซ กระบวนการนี้จะทำการอัดก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปในเส้นเส้นใยแก้วโดยใช้แรงดันสูงคงค้างไว้จนกว่าก๊าซไฮโดรเจนจะสามารถซึมเข้าไปอยู่ในแกนของเส้นเส้นใยแก้วได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญในขั้นตอนการเขียน FBG โดยมีหน้าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในแกนเส้นใยแก้ว และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลักษณะของเกรตติงบนเส้นเส้นใยแก้ว เส้นใยแก้วที่ผ่านการอบก๊าซไฮโดรเจนแรงดันสูงแล้วจะถูกนำมาจัดเก็บในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อลดอัตราการแพร่ออกของก๊าซไฮโดรเจนและจะมีอายุการใช้งาน 1 เดือนหลังจากนำออกมาจากตู้อบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

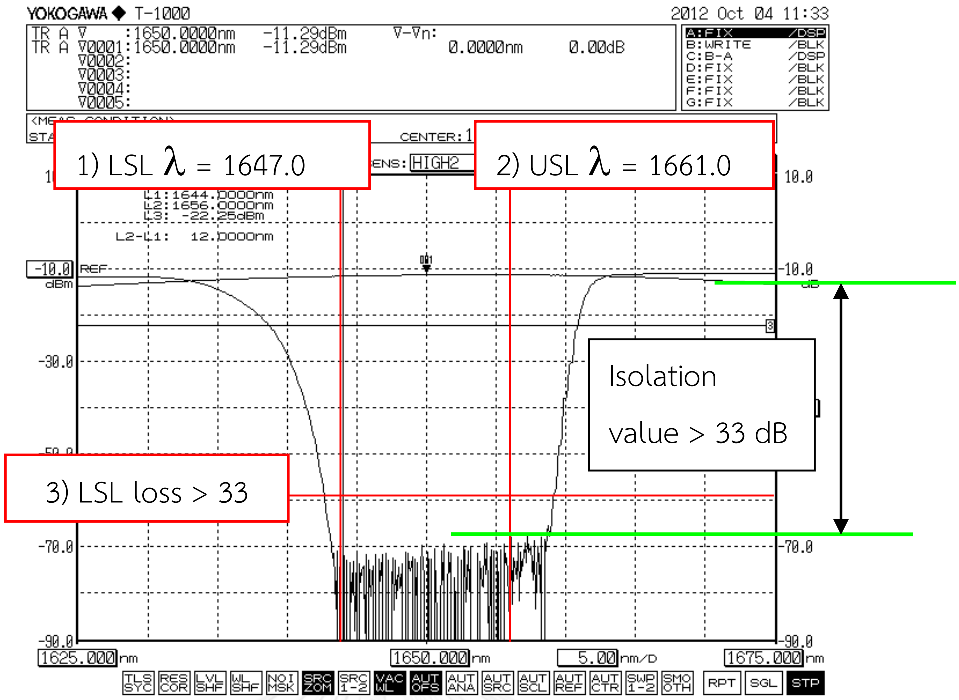
หลังจากเส้นเส้นใยแก้วผ่านการอบก๊าซอย่างสมบูรณ์แล้วจะถูกนำมาลอกเทปออกส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งยังคงลักษณะเทปไว้อยู่ และปอกเปลือกเส้นใยแก้วอีกชั้นออกจนพบกับเส้นเส้นใยแก้วเปลือย นำเส้นใยแก้ว 2 เทปจำนวน 16 เส้น มาจัดเรียงซ้อนกันให้เป็นแพเรียบเสมอกันโดยใช้อุปกรณ์ช่วยดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5. 3 การจัดเรียงตัวของเส้นเส้นใยแก้ว

เส้นเส้นใยแก้วจะถูกทำให้เรียบและตึงโดยใช้แรงดึงสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจะถูกยึดตรึงโดยใช้อุปกรณ์ยึดจับ ส่งต่อไปยังกระบวนการเขียนหรือ FBG

ที่กระบวนการเขียน พนักงานจะเซตเส้นใยแก้วที่ตำแหน่งเตรียม หลังจากนั้นจะมีการฉายแสงเลเซอร์ UV ผ่านตัวแม่แบบเกรตติงหรือ Phase mask เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดหลายช่อง คลื่นแสงที่ผ่านแม่แบบเกรตติงจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในแกนเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลักษณะของเกรตติง เกรตติงที่เกิดบนเส้นเส้นใยแก้วจะก่อให้เกิดการสะท้อนกลับของแสงที่ความยาวคลื่น 1650 nm แสดงผลออกมาเป็นสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแต่ละช่วงเวลาตามจริงซึ่งเพิ่มขึ้นทุกขณะในทิศทางลดต่ำลงและเลื่อนไปด้านความยาวคลื่นยาว การเขียนและสิ้นสุดเมื่อความยาวคลื่นด้านสั้น, ความยาวคลื่นด้านยาว และการลดทอนของแสงได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดเมื่อพิจารณาจากสเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ค่าที่ได้จากการตรวจสอบสเปกตรัมของกราฟเมื่อวัดเปรียบเทียบระหว่าง ค่าสูงสุดในช่วง 1670.0 ~1675.0 nm และค่าสูงสุดในช่วง 1647.0~1661.0 nm แสดงออกมาในรูปของค่า Isolation ในหน่วยของ dB



รูปที่ 5. 4 แสดงสเปกตรัมของชิ้นงานที่ได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเขียน

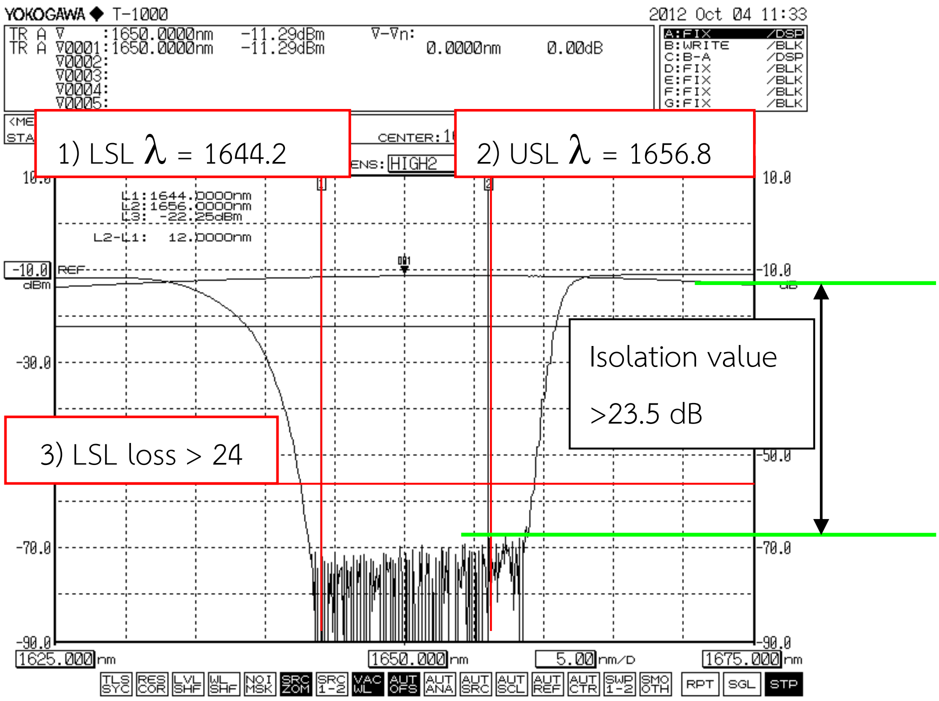
จากรูปที่ 5.4 เส้นสีดำที่มีลักษณะโค้งเป็นรูประฆังหงายเป็นสเปกตรัมของชิ้นงานที่เกิดจากการเขียน FBG ต้องได้ตามเส้นเป้าหมายสีแดง ทั้งในส่วนของค่าเป้าหมายด้านความยาวคลื่นสั้น (1), ค่าเป้าหมายด้านความยาวคลื่นยาว (2) และค่าเป้าหมายการสูญเสียของพลังงานแสง การตรวจสอบที่กระบวนการเขียนจะเป็นแบบสุ่มตรวจสอบ 25% ต่อหนึ่งลอทการผลิต (16 เส้นเส้นใยแก้ว) ค่าที่ใช้ในการตัดสินก่อนส่งต่อไปยังกระบวนการถัดไปจะคำนวณโดยใช้โปรแกรมเพื่อหาค่าการสูญเสียต่ำที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 1647.0 – 1661.0 nm เทียบกับค่าการสูญเสียตามปกติของเส้นเส้นใยแก้วหรือค่า Isolation ต้องมีค่ามากกว่า 33 dB จึงจะสามารถตัดสินเป็นงานดีได้

เส้นใยแก้วที่ผ่านการเขียนจะถูกนำมาแยกสายออกเป็นเส้นๆ ได้ทั้งหมด 16 เส้น และระบุชื่อของหมายเลขเส้นใยแก้วในแต่ละเส้น งานเสียจากกระบวนการเขียนจะถูกแยกออกที่กระบวนการนี้

กระบวนการถัดไปเป็นการตรวจสอบค่าการสูญเสียทางแสงที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูล เพื่อยืนยันผลของการเขียน FBG จากกระบวนการก่อนหน้าจะไม่กระทบต่อความยาวคลื่นที่สำคัญเหล่านี้ ที่กระบวนการนี้จะเป็นการตรวจสอบแบบสุ่มเช็ค 6.25% หรือ 1 เส้นเส้นใยแก้วต่อหนึ่งลอทการผลิต เส้นใยแก้วที่ผ่านการตรวจสอบค่าการสูญเสียดังกล่าวแล้วจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากเส้นเส้นใยแก้วทั้งหมด เพื่อเป็นการการันตีค่าการสูญเสียที่จะต้องคงที่ตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากก๊าซ

ไฮโดรเจนมีผลต่อค่าการสูญเสียในลักษณะที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นทั้งด้านยาวและด้านสั้น รวมทั้งค่าการสูญเสียที่จะค่อยๆ ลดลงตามปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่คงเหลืออยู่ในเส้นเส้นใยแก้ว จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาเฉพาะค่าการสูญเสียที่เกิดเนื่องจาก FBG

การตรวจสอบขั้นสุดท้ายจะทำการยืนยันค่า Isolation ที่ความยาวคลื่น 1650 nm เช่นเดียวกับที่กระบวนการเขียน แตกต่างกันเฉพาะค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของก๊าซไฮโดรเจน การตรวจสอบจะเป็นไปในลักษณะของการสุ่มตรวจสอบ 6.25% หรือ 1 เส้นเส้นใยแก้วต่อหนึ่งลอทการผลิตเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกนำไปบรรจุลงในแพคเกจและส่งต่อไปยังลูกค้า



รูปที่ 5. 5 แสดงสเปกตรัมของชิ้นงานที่ได้ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดที่กระบวนการตรวจสอบ

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ 5. 1 ผลของค่าลดทอน

ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	MN (ล้านครั้ง)	HV (Kv)	ค่าลดทอน : 1650 Isolation (dB)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
5	20±5	19	44.2	36.8	46.7	46.4	39.3	42.7	4.5
5	20±5	20	43.4	40.1	37.9	38.9	45.1	41.1	3.1
5	20±5	21	40.4	36.3	46.0	32.9	48.2	40.8	6.4
5	40±5	19	43.6	34.5	38.9	35.7	35.3	37.6	3.8
5	40±5	20	30.1	43.9	35.7	49.2	40.3	39.8	7.3
5	40±5	21	36.2	38.6	36.0	39.3	36.1	37.2	1.6
10	20±5	19	44.7	45.5	42.8	35.1	44.5	42.5	4.3
10	20±5	20	44.8	42.8	40.3	45.2	46.6	43.9	2.4
10	20±5	21	38.9	39.9	38.9	34.6	33.1	37.1	3.0
10	40±5	19	42.2	39.8	35.8	34.6	44.0	39.3	4.0
10	40±5	20	44.5	38.3	44.2	39.9	42.0	41.8	2.7
10	40±5	21	35.4	45.6	41.4	45.9	39.2	41.5	4.4
15	20±5	19	36.8	42.0	36.7	30.0	46.0	38.3	6.1
15	20±5	20	42.8	39.5	35.4	42.9	41.6	40.5	3.1
15	20±5	21	30.0	37.8	39.9	34.1	38.8	36.1	4.0
15	40±5	19	33.3	44.1	44.1	44.7	37.5	40.7	5.1
15	40±5	20	38.2	31.6	36.0	34.2	44.4	36.9	4.9
15	40±5	21	41.4	40.7	36.4	42.0	41.2	40.3	2.2
20	20±5	19	37.2	41.3	40.3	39.0	41.8	39.9	1.9
20	20±5	20	38.8	35.6	34.0	40.5	36.1	37.0	2.6
20	20±5	21	40.9	38.8	41.0	39.5	39.9	40.0	0.9
20	40±5	19	38.2	41.5	37.2	43.4	42.2	40.5	2.7
20	40±5	20	41.7	36.1	39.3	36.4	42.5	39.2	2.9
20	40±5	21	37.3	44.2	37.0	43.0	33.7	39.0	4.4
25	20±5	19	41.3	40.1	40.2	37.0	37.3	39.2	1.9
25	20±5	20	36.6	38.7	32.7	35.9	39.9	36.8	2.8
25	20±5	21	38.6	40.1	45.5	41.9	38.8	41.0	2.9
25	40±5	19	36.9	35.9	33.1	44.9	42.0	38.5	4.8
25	40±5	20	44.4	29.7	34.1	38.6	40.0	37.3	5.6
25	40±5	21	35.6	31.3	37.1	39.3	34.9	35.7	2.9
30	20±5	19	36.3	34.5	36.0	36.7	38.1	36.3	1.3
30	20±5	20	36.2	38.1	34.8	33.4	35.0	35.5	1.7
30	20±5	21	40.4	38.3	36.0	32.2	34.3	36.2	3.2
30	40±5	19	35.7	37.1	34.1	40.8	38.3	37.2	2.5
30	40±5	20	33.9	33.5	36.7	35.4	37.0	35.3	1.6
30	40±5	21	32.2	37.0	36.7	37.9	34.5	35.6	2.3

ตารางที่ 5. 2 ผลของแบนด์วิดท์

ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	MN (ล้านครั้ง)	HV (kV)	ความกว้ากราฟ (nm)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
5	20±5	21	19.9	19.0	20.4	20.3	19.4	19.8	0.6
5	20±5	20	19.3	19.1	19.6	20.4	20.2	19.7	0.6
5	20±5	21	20.2	19.6	20.5	18.7	20.8	20.0	0.9
5	40±5	21	20.7	20.5	19.6	20.2	19.5	20.1	0.5
5	40±5	20	18.8	20.5	19.2	20.8	20.0	19.9	0.9
5	40±5	21	20.1	20.0	19.4	20.3	20.3	20.0	0.4
10	20±5	19	19.3	19.6	19.8	19.3	19.6	19.5	0.2
10	20±5	20	19.8	19.8	19.4	19.3	19.6	19.6	0.2
10	20±5	21	19.6	20.2	20.3	19.7	18.6	19.7	0.7
10	40±5	19	19.5	19.2	19.3	18.4	19.3	19.1	0.4
10	40±5	20	19.0	19.0	18.8	19.0	19.8	19.1	0.4
10	40±5	21	19.2	18.8	19.2	19.3	19.1	19.1	0.2
15	20±5	19	19.7	19.8	19.7	19.8	20.0	19.8	0.1
15	20±5	20	20.2	20.2	19.9	19.8	19.8	20.0	0.2
15	20±5	21	20.1	20.1	19.7	20.0	20.3	20.0	0.2
15	40±5	19	19.9	20.1	20.0	20.4	20.1	20.1	0.2
15	40±5	20	19.3	19.6	20.2	19.9	19.6	19.7	0.3
15	40±5	21	20.0	20.1	20.2	20.0	20.2	20.1	0.1
20	20±5	19	20.3	19.7	20.2	20.2	20.2	20.1	0.2
20	20±5	20	19.4	19.6	19.9	20.4	19.4	19.8	0.4
20	20±5	21	20.1	20.1	20.3	19.6	19.7	19.9	0.3
20	40±5	19	20.1	20.1	19.3	20.1	20.3	20.0	0.4
20	40±5	20	20.3	19.4	19.8	20.2	20.1	20.0	0.3
20	40±5	21	19.3	20.4	20.1	19.9	19.3	19.8	0.5
25	20±5	19	21.2	20.7	20.3	20.0	21.7	20.8	0.7
25	20±5	20	21.3	20.6	19.1	19.3	19.4	20.0	1.0
25	20±5	21	21.1	21.3	21.1	20.2	20.8	20.9	0.4
25	40±5	19	20.4	19.9	19.6	21.6	21.3	20.6	0.9
25	40±5	20	20.8	19.4	21.6	21.3	20.8	20.8	0.8
25	40±5	21	19.8	21.5	21.2	20.3	19.6	20.5	0.8
30	20±5	19	20.2	20.2	20.4	20.1	20.5	20.3	0.2
30	20±5	20	20.3	20.4	20.0	20.0	20.3	20.2	0.2
30	20±5	21	20.8	20.4	20.3	19.9	20.4	20.4	0.3
30	40±5	19	20.2	20.4	20.6	20.8	20.2	20.4	0.3
30	40±5	20	19.9	20.1	20.5	20.3	20.2	20.2	0.2
30	40±5	21	20.1	20.2	20.2	20.4	20.3	20.2	0.1

ตารางที่ 5. 3 ผลของความยาวคลื่นกึ่งกลาง

ระยะเวลาจัดเก็บเส้นใยแก้ว (วัน)	MN (ล้านครั้ง)	HV (kV)	ความยาวคลื่นกึ่งกลาง (nm)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
5	20±5	19	1654	1655	1654	1654	1653	1654.0	0.5
5	20±5	20	1655	1655	1653	1655	1654	1654.6	0.7
5	20±5	21	1655	1655	1654	1654	1654	1654.3	0.5
5	40±5	20	1654	1654	1653	1655	1655	1654.2	0.9
5	40±5	20	1654	1654	1654	1654	1654	1653.8	0.2
5	40±5	21	1655	1655	1654	1655	1655	1654.6	0.4
10	20±5	19	1654	1655	1654	1654	1654	1654.3	0.3
10	20±5	20	1655	1655	1654	1654	1655	1654.6	0.5
10	20±5	21	1654	1655	1654	1654	1653	1654.0	0.5
10	40±5	19	1654	1654	1654	1654	1655	1654.2	0.4
10	40±5	20	1655	1654	1654	1655	1654	1654.5	0.4
10	40±5	21	1654	1655	1655	1655	1654	1654.6	0.6
15	20±5	19	1654	1654	1653	1653	1654	1653.7	0.5
15	20±5	20	1655	1654	1654	1654	1655	1654.3	0.8
15	20±5	21	1654	1654	1654	1655	1654	1654.2	0.5
15	40±5	19	1653	1654	1655	1654	1653	1653.9	0.7
15	40±5	20	1654	1655	1654	1653	1655	1654.3	0.7
15	40±5	21	1655	1654	1654	1654	1655	1654.4	0.5
20	20±5	19	1654	1653	1654	1654	1654	1653.9	0.5
20	20±5	20	1653	1655	1655	1654	1653	1653.9	0.8
20	20±5	21	1655	1655	1654	1653	1654	1654.3	0.7
20	40±5	19	1655	1654	1653	1654	1655	1654.1	0.6
20	40±5	20	1654	1653	1655	1655	1654	1654.2	0.7
20	40±5	21	1653	1655	1655	1654	1653	1653.9	0.9
25	20±5	19	1654	1654	1654	1653	1655	1654.2	0.5
25	20±5	20	1655	1654	1654	1655	1654	1654.4	0.6
25	20±5	21	1655	1655	1654	1653	1654	1654.4	0.6
25	40±5	19	1654	1654	1654	1654	1654	1654.1	0.3
25	40±5	20	1654	1653	1655	1655	1655	1654.2	1.0
25	40±5	21	1654	1655	1655	1655	1654	1654.4	0.7
30	20±5	19	1655	1654	1655	1655	1655	1654.7	0.2
30	20±5	20	1654	1654	1655	1655	1654	1654.5	0.4
30	20±5	21	1654	1655	1654	1654	1654	1654.3	0.4
30	40±5	19	1655	1654	1654	1654	1655	1654.5	0.3
30	40±5	20	1655	1654	1655	1655	1655	1654.6	0.4
30	40±5	21	1654	1655	1655	1655	1654	1654.6	0.5

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธาศิรัตน์ ระวิวรรณ เกิดวันที่ 14 พฤษภาคม 2531 ที่จังหวัดพังงา ทำงานที่บริษัทฟูรูกาว่า ไฟเทล(ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรควบคุมกระบวนการผลิต ตั้งแต่ พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2552 และในปีการศึกษา 2554 ได้เข้าศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY