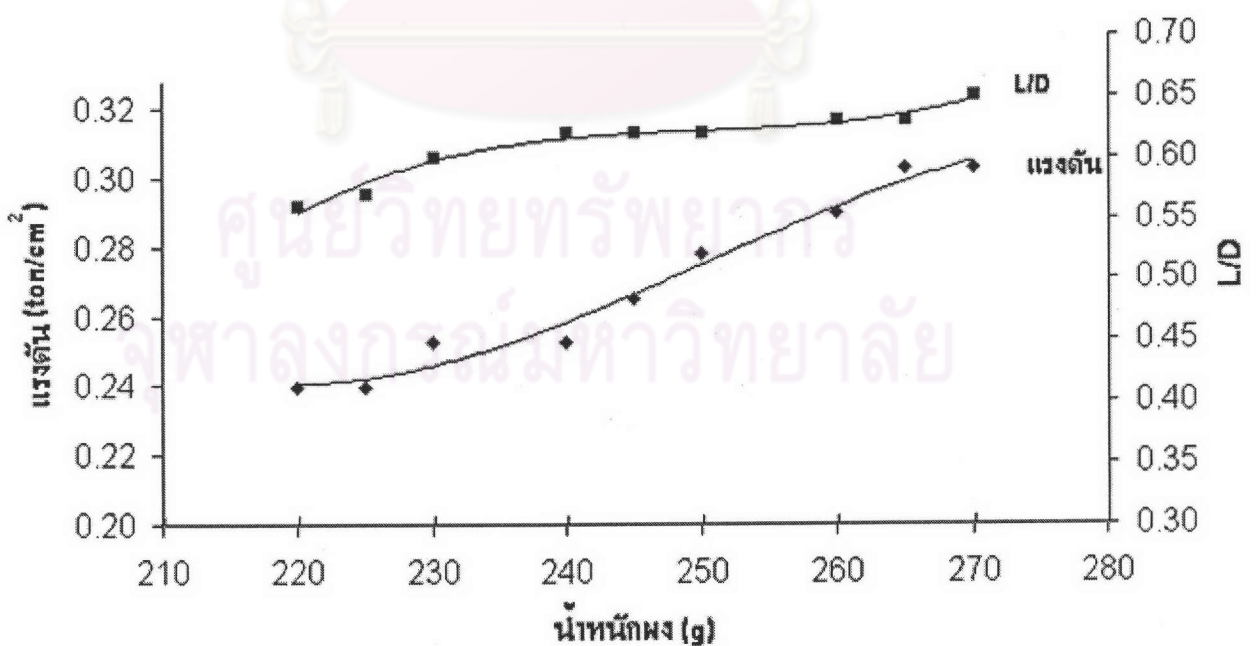


อภิปรายผลการทดลอง

การขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันซีลิกอนไนไตรด์ด้วยวิธีแยกชั้นบอนด์ซีลิกอนไนไตรด์ (RBSN) ในงานวิจัยนี้มีสิ่งที่น่าสนใจอยู่หลายประการและมีผลเกี่ยวเนื่องกันไปจนสำเร็จเป็นชิ้นงานหัวฉีดน้ำมันที่สมบูรณ์

5.1 การกำหนดน้ำหนักผงซีลิกอนและแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมัน

จากการทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันรูปทรงกระบอกที่มีขนาด $\varnothing \times h = 57 \times 30$ มิลลิเมตร ซึ่งชิ้นงานต้นแบบมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับงานขึ้นรูปผงโดยทั่วไป การกำหนดปริมาณผงและแรงดันที่ใช้ซึ่งมีผลต่อความสูงของชิ้นงานจึงมีความสำคัญ ผลการอัดขึ้นงานให้ได้โดยไม่แตกร้าวจากการปรับเปลี่ยนปริมาณผงซีลิกอนและแรงดันในการอัดที่ได้ความสูงแตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 สามารถแสดงผลของปริมาณผงและแรงดันต่อความสูงของชิ้นงานร่วมกันได้ดังแผนภาพที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนภาพน้ำหนักผงและแรงดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันที่มีต่ออัตราส่วนของความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เมื่อ $\varnothing_{Die} = 71$ มิลลิเมตร

จากแผนภาพที่ 5.1 น้ำหนักผงซิลิคอน แร่งดัน และ L/D มีความสัมพันธ์กัน โดยสามารถกำหนดความสูงของชิ้นงานจากปริมาณผงและแรงดันที่ใช้ในการอัดชิ้นงาน ซึ่งแรงดันที่ใช้ต่อปริมาณผงใด ๆ ต้องไม่มากเกินไปจนแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผงและแรงดัน ชิ้นงานภายหลังการอัดจึงไม่เกิดความเสียหาย

จากรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อน้ำหนักผงมากขึ้น สามารถเพิ่มแรงดันในการอัดได้เช่นกันและได้ความสูงของชิ้นงานที่แตกต่างกันน้อยมาก จากการทดลองการอัดขึ้นรูป Silicon compact เป็นชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมันต้องการความสูง 43-44 มิลลิเมตร, L/D 0.61-0.62 ต้องใช้น้ำหนักผงซิลิคอน 230-240 กรัม ที่แรงดันไม่เกิน 0.25 tons/cm^2 หรือคิดเป็นน้ำหนักกดไม่เกิน 10 ตัน ซึ่งความสูงของชิ้นงาน Silicon compact ดังกล่าว เพียงพอสำหรับการเผื่อขนาดของชิ้นงานภายหลังการ CIP, Pre-sintering และการกลึงไสตัดเจาะ

5.2 สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและความขรุขระผิวของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้น

จากการทดลองชิ้นงานภายหลังการอัดขึ้นรูปมีขนาดเฉลี่ย $\varnothing \times h = 71.25 \times 43.27 \text{ mm}$ มีความหนาแน่น 1.34 g/cm^3 ภายหลังการ CIP และ Pre-sintering มีขนาดเฉลี่ย $\varnothing \times h = 66.63 \times 42.05 \text{ mm}$ และ $66.06 \times 41.62 \text{ mm}$ โดยมีความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยปริมาตรเป็น $1.58 \text{ g/cm}^3, 15.03\%$ และ $1.62 \text{ g/cm}^3, 0.93\%$ ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานภายหลังการ CIP เปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยปริมาตรมีค่าสูง เมื่อเทียบกับชิ้นงานภายหลัง Pre-sintering ที่มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเพียงเล็กน้อย ความหนาแน่นส่วนใหญ่ของชิ้นงานภายหลัง Pre-sintering จึงเป็นผลมาจากการ CIP ดังนั้นกระบวนการ CIP จึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงาน

ในขั้นตอน Pre sintering ชิ้นงานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและยังคงเป็นซิลิคอนเช่นเดิม ซึ่งมีความหนาแน่นทางทฤษฎี 2.32 g/cm^3 ขณะที่ขั้นตอนไนไตรเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซิลิคอนเป็นซิลิคอนไนไตรด์ มีความหนาแน่นทางทฤษฎี 3.19 g/cm^3

จากผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคด้วย OM ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขึ้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ พบว่าความหนาแน่นและสมบัติทางกลสัมพันธ์กับ

เวลาในการเผาผนึกขึ้นต้น โดยความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการแช่ชิ้นงานนานขึ้น เนื่องจากเวลาแช่ที่นานส่งผลให้การเผาผนึกสมบูรณ์ขึ้น ซึ่งอนุภาคซิลิคอนลดพื้นที่ผิวและเชื่อมติดกันได้สม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนที่ต่อเนื่องลดลง ความหนาแน่นที่สูงขึ้นนี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็ง โมดูลัสของยัง และความเหนียวต่อการแตกหักที่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ยังให้ผลความเรียบผิวของชิ้นงานดีขึ้นเช่นกัน

5.3 ผลการขึ้นรูป Silicon compact เป็นชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมัน

โดยทั่วไปมักใช้ค่า Fracture toughness หรือ K_{IC} แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุไว้ก่อนที่วัสดุจะเกิดความเสียหาย แต่จากการทดลองของชิ้นงานซิลิคอนภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้น 10 - 16 ชั่วโมง มีค่า K_{IC} น้อยมาก คือ 0.42 - 0.92 $MPa \cdot m^{1/2}$ เพราะซิลิคอนเป็นวัสดุที่แข็ง มีความแกร่งต่ำซึ่งต่างจากโลหะ โดยทั่วไปที่มีความแกร่งสูง

ถึงแม้ว่าค่าความแข็งของ Silicon compact ภายหลังจากการเผาผนึกขึ้นต้นมีค่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยวิธีทางผง แต่ซิลิคอนเป็นวัสดุที่มีความแข็งและความเปราะสูง ดังนั้นการขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนเป็นชิ้นงานต้นแบบหัวฉีดน้ำมัน จึงคำนึงถึงความแข็งของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้นเป็นสำคัญ โดยเลือกใช้ชิ้นงานความแข็งสูงสุดเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบ (speed) และอัตราป้อน (feed) ที่เหมาะสม สำหรับใช้เป็นแนวทางในการขึ้นรูปชิ้นงาน Silicon compact ที่มีความแข็งต่ำกว่า

จากการขึ้นรูปชิ้นงาน Silicon compact ที่ผ่านการเผาผนึกขึ้นต้นที่อุณหภูมิ $1200^{\circ}C$ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความแข็งสูงสุดและอยู่ในช่วง 94.20 - 123.60 HV พบว่าให้ผลการกลึงและการเจาะไม่สัมพันธ์กัน โดยสามารถกลึงได้แต่เจาะไม่ได้ เนื่องจากชิ้นงานที่เวลาแช่ 16 ชั่วโมงมีความแข็งสูงเกินไป ชิ้นงานซิลิคอนยังมีความแข็งมากก็จะมีค่าความเปราะมากเช่นกัน จึงไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปและทำให้ชิ้นงานมีโอกาสเสียหายได้ นอกจากนี้ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงเกินไปยังทำให้มีดกลึงและดอกสว่านเสียความคมได้ง่าย จากเหตุผลดังกล่าวจึงใช้ชิ้นงานที่เวลาแช่ 14 ชั่วโมง ซึ่งที่มีความแข็งต่ำกว่ารองลงมา มีค่าอยู่ในช่วง 71.97-94.75 HV โดยให้ผลการกลึงและเจาะสอดคล้องกัน เป็นตัวกำหนด speed, feed และ feed rate สำหรับการขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมัน

5.3.1 การกลึง (Turning)

ในงานกลึงต้องเลือกความเร็วตัด (Cutting Speed, V) ให้เหมาะสมโดยพิจารณาได้ดังนี้

วัสดุชิ้นงาน โดยวัสดุที่อ่อนต้องกลึงด้วยความเร็วตัดสูง วัสดุอ่อน หมายถึง วัสดุที่ทั้งก่อนมีความแข็งต่ำ เช่น พลาสติก ไม้ เป็นต้น ในการทดลองงานกลึง วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุอัดขึ้นรูป Silicon compact มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 66.53 mm ซึ่งขึ้นรูปโดยวิธีทางผงและมีความแข็งภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้นอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (38- 124 HV) เนื่องจากยังมีรูพรุนเหลืออยู่ในชิ้นงาน แต่เมื่อวัสดุที่เป็นซิลิคอนนั้นมีความแข็งสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วตัดที่สูงไม่มากนัก (จากรูปที่ 5.2 ประมาณ 60-80 m/min)

วัสดุของมีดกลึง มีดกลึงที่ทำด้วย Tungsten carbide มีความแข็งและทนการขัดสีได้ดีจะกลึงได้เร็วและมีดกลึงมีอายุการใช้งานที่นานกว่ามีดกลึงที่ทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) ซึ่งมีดกลึงที่ทำด้วย Tungsten carbide เวลากลึงต้องใช้ความเร็วรอบต่ำ

ความละเอียดของผิวงานกลึง งานกลึงที่ต้องการความละเอียดจะต้องกลึงด้วยความเร็วตัดที่สูงกว่างานกลึงหยาบ

ชนิดหรือประเภทของเครื่องกลึง เครื่องกลึงที่มีขนาดใหญ่จะสามารถกลึงได้ที่ความเร็วตัดสูงกว่าเครื่องกลึงขนาดเล็ก

ความเร็วตัด (Cutting Speed, V) คือ ความเร็วที่คมมีดกลึงตัดหรือปาดผิวโลหะออกเมื่อชิ้นงานกลึงหมุนไปครบ 1 รอบ คมมีดจะตัดหรือปาดผิวโลหะเป็นแนวยาวเท่ากับเส้นรอบวงของชิ้นงานพอดี โดยความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที และคำนวณจากสมการ 5.1

$$V = \pi DN \quad [5.1]$$

เมื่อ V = ความเร็วตัด (m/min)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (m)

N = ความเร็วรอบ (rpm)

จากสมการข้างต้น การกำหนดความเร็วตัดที่เหมาะสม (Cutting Speed, V) มีความสัมพันธ์กับการความเร็วรอบ (speed) และขนาดของชิ้นงาน (D) โดยการเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ความเร็วตัดสูงและรุนแรงขึ้น ซึ่งพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.2

อัตราป้อน (Feed) ของมีดกลึง หมายถึง ระยะทางการเดินป้อนมีดกลึงไปตามความยาวของชิ้นงานในแต่ละรอบการหมุน ซึ่งอัตราป้อนแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุเป็นสำคัญ ถ้าความแข็งน้อยก็สามารถป้อนได้มาก ถ้าป้อนงานลึก (Depth of cut) ต้องลดอัตราป้อนให้น้อยลง การใช้อัตราป้อนสามารถเลือกให้สูงได้ถ้ากำลังของเครื่องดีพอ

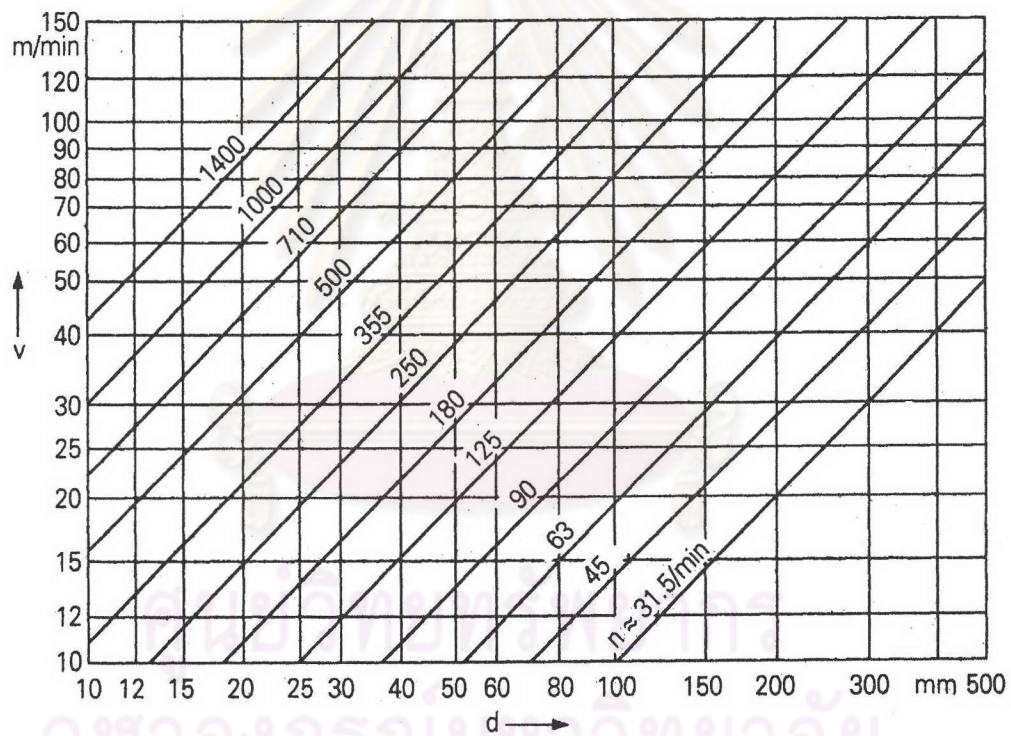
สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ความเร็วตัดและอัตราป้อนได้ดังนี้

1. เมื่อป้อนงานลึกคงที่

- ถ้าอัตราป้อนมาก ความเร็วรอบในการกลึงต้องลดลง
- ถ้าความเร็วรอบในการกลึงมาก อัตราป้อนจะต้องลดลง

2. เมื่ออัตราป้อนคงที่

- ถ้าความลึกการป้อนมากขึ้น ความเร็วรอบต้องลดลง



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและความเร็วรอบของงานกลึงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ [งานเครื่องมือกลเบื้องต้น, 2547]

จากข้อมูลที่มีอยู่ของวัสดุอัดขึ้นรูปซิลิกอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 66.53 มิลลิเมตร พิจารณากราฟความสัมพันธ์ความเร็วตัดและความเร็วรอบของงานกลึง สามารถกำหนดช่วงความเร็วตัด (v) ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองกลึงชิ้นงาน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 60-80 m/min

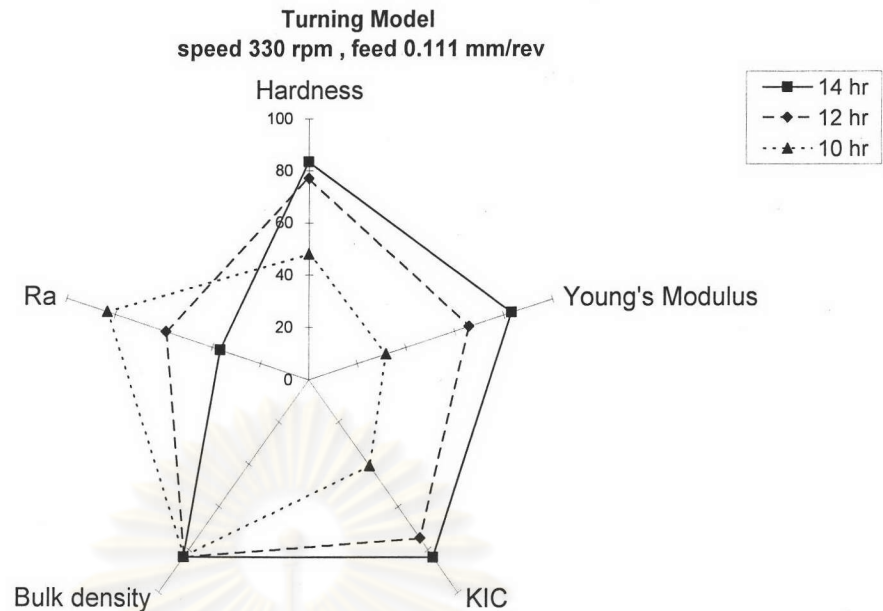
โดยปรับเปลี่ยนความเร็วรอบการหมุนชิ้นงาน (speed) ได้ค่าอยู่ในช่วง 300 - 350 rpm คือ 300 , 330 และ 350 rpm และได้ความเร็วตัด (V) 62.70, 68.97, 73.15 m/min ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนอัตราป้อนต่อรอบของมีดกลึง (feed) ในช่วง 0.111 – 0.131 mm/rev

จากการทดลองการกลึงในทุก ๆ speed เมื่อใช้ feed มากกว่า 0.111 mm/rev และการกลึงด้วย speed 350 rpm ซึ่งมีความเร็วตัดสูงสุด คมมีดจะสัมผัสกับเนื้องานมากเกินไปทำให้เกิดการตัดเฉือนที่รุนแรงและเกิดแรงต้านความร้อนเป็นผลให้มีดกลึงสะดุด ซึ่งจะทำให้มีดกลึงเสียความคมและงานกลึงชำรุดต้องเสียเวลาหยุดเดินเครื่องโดยถอดเปลี่ยนมีดกลึงหรือซ่อมบำรุงอุปกรณ์ ดังนั้นที่ speed 350 rpm และ feed ที่สูงกว่า 0.111 mm/rev จึงไม่เหมาะที่จะใช้กลึงชิ้นงานซิลิคอน แม้ว่า การกลึงด้วย speed สูงจะให้ผลความเรียบผิวที่ดีก็ตาม

เนื่องจากในงานกลึงต้องการความรวดเร็วเพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่าย ความเร็วตัดที่สูงทำให้การกลึงรวดเร็ว ดังนั้นการงานกลึงซิลิคอนจึงเลือกใช้ speed 330 rpm ซึ่งกลึงได้เร็วและให้ผลความเรียบผิวที่ดีกว่าการใช้ speed 300 rpm

จากผลความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Ra) ที่ผ่านการกลึงที่สภาวะต่างๆ พบว่าที่ความเร็วรอบ (speed) การหมุนชิ้นงานสูงและอัตราเร็วการป้อนของมีดกลึง (feed rate) ต่ำ ได้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานน้อยกว่าที่ความเร็วรอบการหมุนต่ำและอัตราเร็วการป้อนของมีดกลึงสูง ซึ่งอัตราเร็วการป้อนมีดกลึงส่งผลต่ออัตราการกินเนื้องาน (MRR/V) นั่นคือที่ความเร็วรอบคงที่ถ้าอัตราเร็วการป้อนของมีดกลึงเร็วจะทำให้ชิ้นงานถูกกินเนื้อเร็ว ส่งผลให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานสูงกว่าอัตราเร็วการป้อนมีดกลึงช้า ๆ เมื่อคงอัตราเร็วการป้อนมีดกลึงและปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของการหมุนชิ้นงาน พบว่าที่ความเร็วรอบสูง ให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานน้อยกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากอัตราการกินเนื้อของชิ้นงานในแต่ละรอบการหมุนต่ำ สังเกตได้จากค่าแฟคเตอร์การกลึง (MRR/V) ที่ลดลง จากการทดลองกลึงซิลิคอนได้โดยไม่เสียหายมีค่าแฟคเตอร์ของการกลึงไม่เกิน $0.491 \text{ mm}^2/\text{rev}$ และให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานเฉลี่ยไม่เกิน 1.62 ± 0.40 ไมครอน แสดงว่าถ้ากลึงชิ้นงานด้วยแฟคเตอร์การกลึงมากกว่า $0.491 \text{ mm}^2/\text{rev}$ จะทำให้ได้ชิ้นงานมีความขรุขระมากกว่า 1.62 ± 0.40 ไมครอนและอาจเสียหายได้

โดยสามารถแสดงแผนภาพการกลึงหัวฉีดน้ำมันที่ Speed 330 rpm และ Feed 0.111 mm/rev ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกขั้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภาพการกลึงหัวฉีดน้ำมันซิลิคอนที่ Speed 330 rpm และ Feed 0.111 mm/rev ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ

จากแผนภาพของการกลึง จะสังเกตเห็นความแตกต่างของสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และความขรุขระผิว (Ra) ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาขึ้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน โดยเวลาแช่ชิ้นงานที่นาน ความหนาแน่นและสมบัติทางกลมีค่ามากกว่าที่เวลาแช่น้อยกว่า และสมบัติต่าง ๆ จะแปรผกผันกับความขรุขระผิว

การกลึงซิลิคอนให้ได้โดยไม่เสียหาย หากไม่คำนึงถึงความเรียบผิวมากนัก สามารถเตรียมชิ้นงานให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลมีค่าอยู่ในช่วงของแผนภาพการกลึงที่ความแข็งต่ำกว่าประมาณ 83 HV และเลือกใช้ speed, feed ที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง ตามตารางที่ 4.5 สิ่งสำคัญคือต้องเลือก speed ที่ให้ความเร็วตัดไม่รุนแรงและไม่ทำให้มีดกลึงสะดุด ทั้งนี้การเลือก speed และ feed ควรพิจารณาค่าแฟคเตอร์การกลึงที่ได้จากข้อมูลการทดลองประกอบด้วย

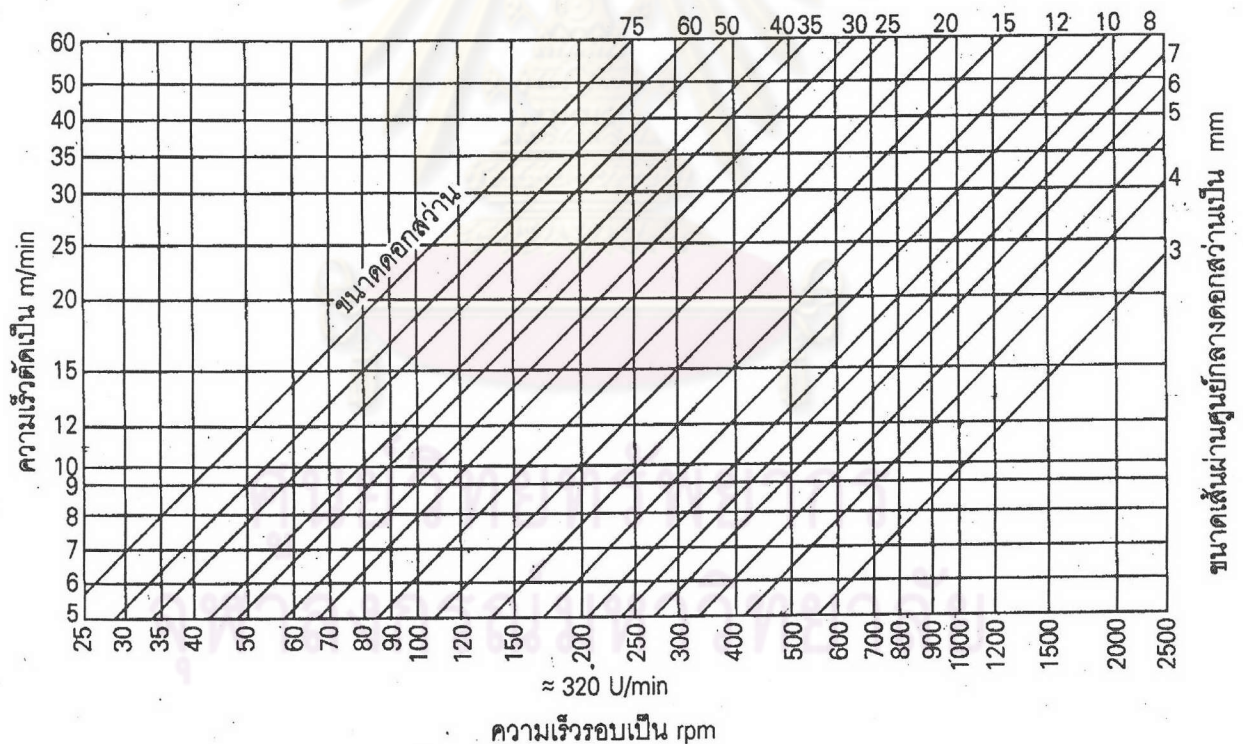
5.3.2 การเจาะ (Drilling)

ในงานเจาะ คำนึงถึง ความเร็วรอบการหมุนดอกสว่าน (speed) โดยต้องจัดเตรียมเครื่องก่อนเจาะ ซึ่งความเร็วรอบขึ้นอยู่กับความเร็วตัด (Cutting speed, V) ที่ต้องการ โดยการเลือกความเร็วตัดที่เหมาะสม สิ่งที่เกี่ยวข้องและใช้ในการพิจารณาได้แก่ ชนิดของวัสดุชิ้นงาน, ชนิดของ

วัสดุที่ทำดอกสว่าน, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ, ลักษณะคมดอกสว่าน โดยวัสดุอัดขึ้นรูป ควรมีมุมจิกของดอกสว่าน 60 องศา

ความเร็วตัด (Cutting speed, V) คือ ความเร็วที่คมตัดหมุนผ่านวัสดุใน 1 นาที เป็นความเร็วที่ทดลองแล้วว่าเหมาะสมที่จะใช้ในการเจาะวัสดุแต่ละชนิดด้วยวัสดุที่ทำจากวัสดุอื่นเช่นกัน ดังนั้นความเร็วตัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วสูงสุดที่ดอกสว่านจะทนได้ในการเจาะวัสดุแต่ละชนิด เนื่องจากการเจาะต้องการความรวดเร็วเพื่อลดต้นทุนการผลิต การเปิดเครื่องด้วยความเร็วสูงสุดจึงต้องเลือกใช้ดอกสว่านที่สามารถทนความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีที่รุนแรงได้ ความเร็วตัดสำหรับการเจาะคำนวณจากสมการ 5.1 เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (m)

ซึ่งพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กราฟตั้งความเร็วรอบของเครื่องเจาะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่านต่าง ๆ

[งานเครื่องมือกลเบื้องต้น, 2547]

อัตราป้อนต่อรอบของดอกสว่าน (Feed, mm/rev) หรืออัตราป้อน คือ ระยะทางที่ปลายดอกสว่านเคลื่อนที่เจาะงานใน 1 รอบการหมุนดอกสว่าน แสดงอัตราป้อนสำหรับงานเจาะทั่วไป ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 อัตราป้อนสำหรับงานเจาะทั่วไป

ขนาดของดอกสว่าน นิ้ว	อัตราป้อน นิ้ว/รอบ	ขนาดของดอกสว่าน มิลลิเมตร	อัตราป้อน มิลลิเมตร/รอบ
1/16 - 3/32	0.0015 - 0.0025	1.6 - 3.0	0.04 - 0.06
1/8 - 5/32	0.002 - 0.004	3.0 - 4.0	0.05 - 0.10
3/16 - 7/32	0.003 - 0.006	4.0 - 5.5	0.075 - 0.15
1/4 - 5/16	0.004 - 0.008	5.5 - 8.0	0.10 - 0.20
3/8 - 7/16	0.006 - 0.010	8.0 - 11.0	0.15 - 0.25
1/2 - 9/16	0.008 - 0.012	11.0 - 14.5	0.20 - 0.30
5/8 - 11/16	0.009 - 0.013	14.5 - 17.5	0.23 - 0.33
3/4 - 13/16	0.010 - 0.014	17.5 - 20.5	0.25 - 0.36
7/8 - 15/16	0.011 - 0.015	20.5 - 24.0	0.28 - 0.38
1 - 1, 1/8	0.012 - 0.016	24.0 - 28.5	0.30 - 0.40
1, 1/4 - 1, 1/2	0.014 - 0.018	28.5 - 38.0	0.35 - 0.45
OVER 1, 1/2	0.016 - 0.020	OVER 38.0	0.40 - 0.50

[ไพโรจน์ สุขสุวรรณ, 2543]

สามารถประมาณช่วงของอัตราป้อน (feed) ได้จากตารางที่ 5.1 เป็นแนวทางสำหรับการเจาะต่อไป จากตารางเลือกใช้ feed ที่ ϕ 3.5 – 5.5 mm อยู่ในช่วง 0.08 – 0.10 mm/rev

ผลการคำนวณเพื่อกำหนดความเร็วรอบ (Speed) และอัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน (Feed rate)

1. การหาความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขนาดรูเจาะ โดยพิจารณากราฟตั้งความเร็วรอบของเครื่องเจาะ จะได้ความเร็วตัด (V) ในการเจาะอยู่ในช่วง 11.50 - 13.50 m/min ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 3.5, 3.8 และ 5.1 mm มีความเร็วรอบ (speed) 1200, 1000 และ 800 rpm ตามลำดับ แสดงความเร็วตัดที่ความเร็วรอบของขนาดรูเจาะต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความเร็วรอบในการเจาะที่ขนาดรูเจาะต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ความเร็วตัดอยู่ในช่วง 11.50 - 13.50 m/min

ความเร็วรอบ (speed) (rpm)	ความเร็วตัด, V (m/min)		
	ขนาดรูเจาะ, ϕ (mm)		
	3.5	3.8	5.1
800	8.80	9.55	12.82
1000	11.00	11.94	16.02
1200	13.20	14.33	19.23

โดยทั่วไปที่ความเร็วรอบเดียวกัน ขนาดรูเจาะที่ใหญ่มีโอกาสเสียหายได้มากกว่าขนาดรูเจาะเล็ก เนื่องจากมีความเร็วตัดที่สูงกว่านั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการความเร็วตัด

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าความเร็วควรตัดลดลงเมื่อขนาดรูเจาะใหญ่ขึ้น แต่ที่ขนาดรูเจาะ 3.8 mm มีความเร็วตัดต่ำสุด เนื่องจากการขึ้นรูปหัวฉีดน้ำมันที่ขนาดรูเจาะดังกล่าวเป็นการเจาะทะลุ จึงต้องลดความรุนแรงของการเจาะลงเพื่อให้ได้รอยเจาะสมบูรณ์ที่สุด

2. การหาอัตราเร็วการป้อนของดอกสว่าน (feed rate) ที่เหมาะสม สำหรับแต่ละขนาดรูเจาะและความเร็วรอบต่าง ๆ พิจารณา feed จากตารางที่ 5.1 เป็นแนวทาง โดยปรับเปลี่ยนอัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน, feed rate ตั้งแต่ 60, 80, 100 และ 120 mm/min เพื่อให้ได้อัตราป้อน (feed) อยู่ในช่วง 0.08 - 0.1 mm/rev แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 อัตราเร็วการป้อนดอกสว่าน (feed rate) ที่ความเร็วรอบ (speed) ต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้อัตราป้อน (feed) อยู่ในช่วง 0.08 - 0.1 mm/rev

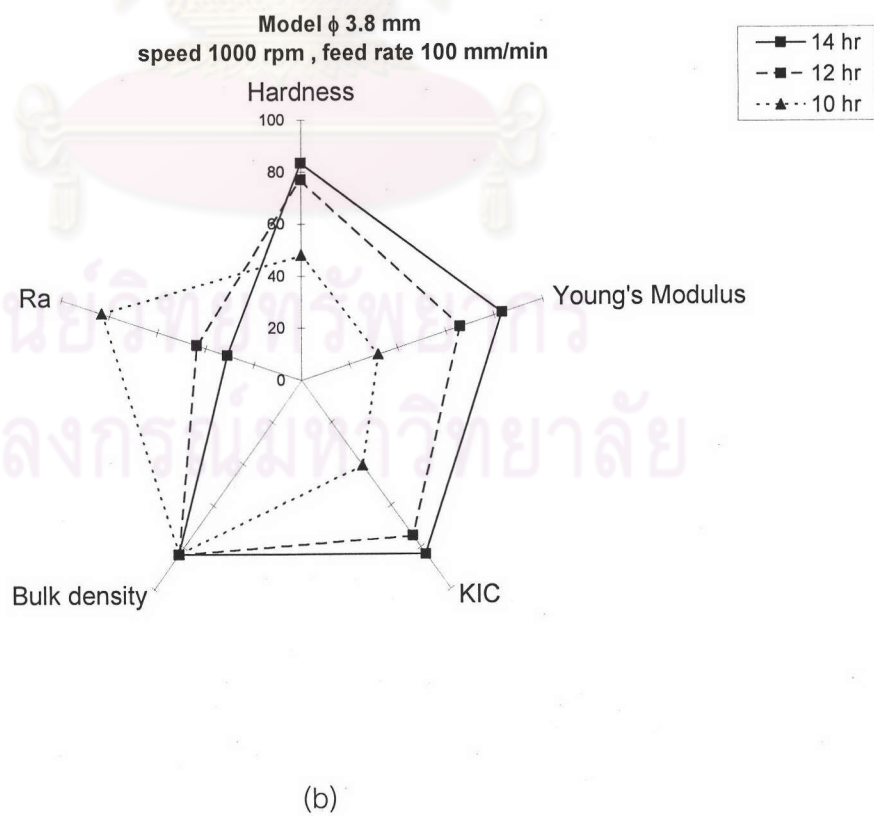
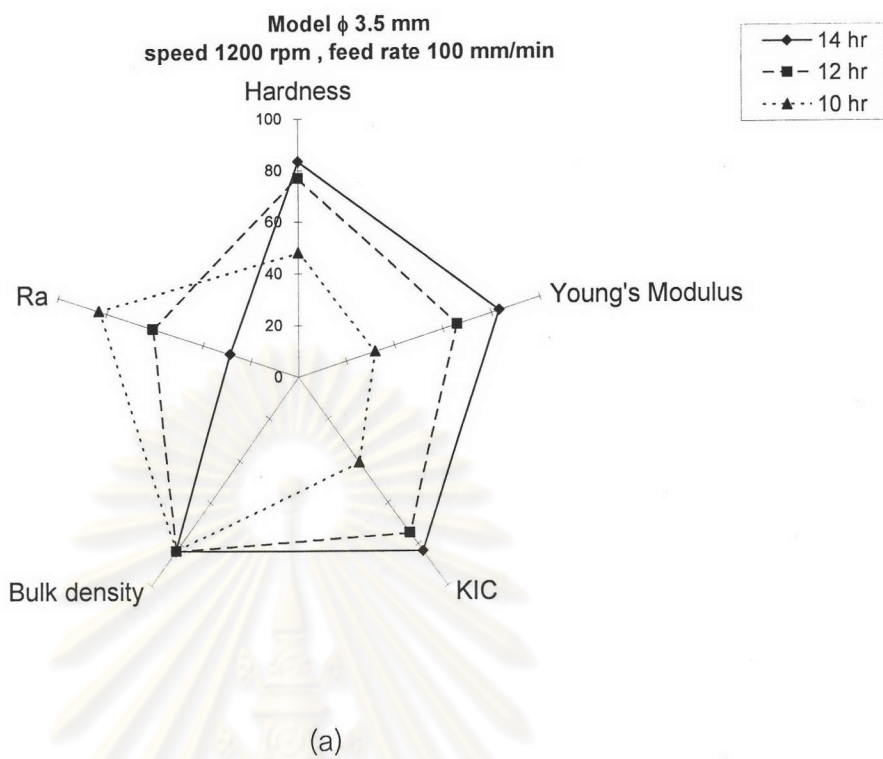
feed rate (mm/min)	feed (mm/rev)		
	speed (rpm)		
	800	1000	1200
60	0.075	0.060	0.050
80	0.100	0.080	0.067
100	0.125	0.100	0.083
120	0.150	0.120	0.100

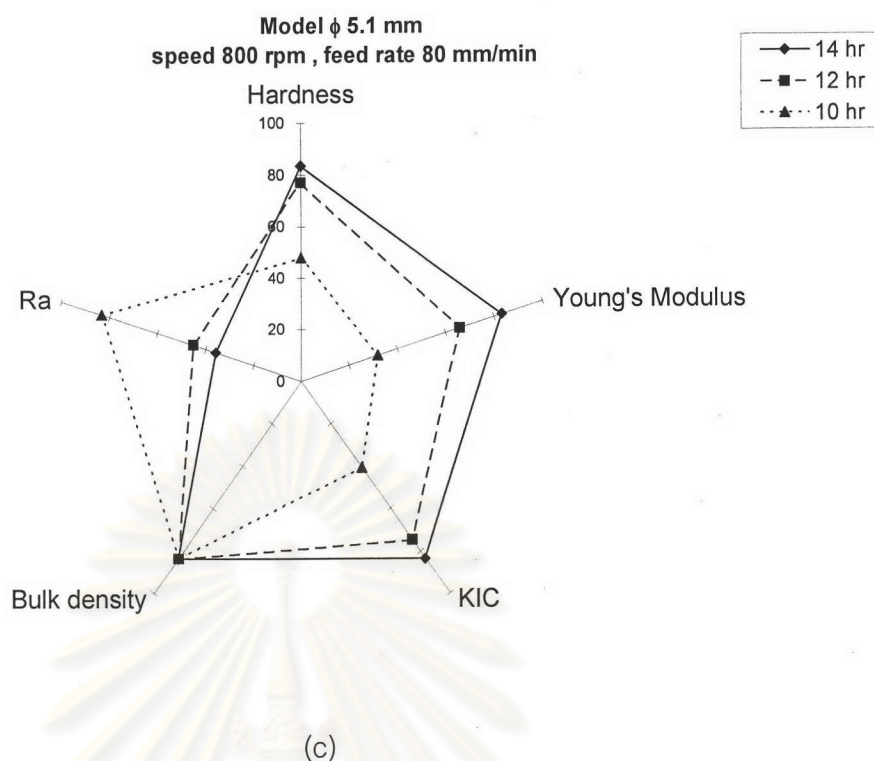
จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าอัตราการป้อนดอกสว่าน (feed) มีค่าใกล้เคียงกันทุกขนาดรูเจาะ โดยที่ขนาดรูเจาะ 3.5 mm (speed 1200 rpm) ใช้ feed ต่ำสุด เนื่องจากการเจาะหัวฉีดน้ำมันที่ขนาดรูเจาะดังกล่าว จะพลิกชิ้นงานและเจาะตรงให้ทะลุจนรูเจาะอีกรูได้พอดี ดังนั้นจึงต้องระวังความเร็วเพื่อไม่ให้ปลายดอกสว่านสัมผัสเนื่องงานส่วนอื่น

อัตราเร็วการป้อนของดอกสว่าน (feed rate) จะส่งผลต่ออัตราการกินเนื้อชิ้นงาน (MRR/V) โดย feed rate สูงจะกินเนื้องานได้มากกว่าที่ feed rate ต่ำ เช่นการทดลองที่ feed rate 120 mm/min ชิ้นงานถูกเจาะได้อย่างรวดเร็ว บริเวณปากรูเจาะจึงถูกกระแทกและแตกออกได้โดยง่าย เนื่องจากซิลิคอนภายหลังการเผาผนึกชั้นต้นมีความแข็งแรงที่ผิวต่ำ จึงไม่ใช้ feed rate 120 mm/min ในการเจาะชิ้นงาน

อัตราเร็วการป้อนดอกสว่านสูงและความเร็วรอบการหมุนดอกสว่านต่ำจะให้อัตราการกินเนื้องานสูงกว่าที่อัตราเร็วการป้อนดอกสว่านต่ำและความเร็วรอบการหมุนสูง และเมื่อคงอัตราเร็วการป้อนของดอกสว่านและปรับเปลี่ยนความเร็วรอบ พบว่าที่ความเร็วรอบการหมุนดอกสว่านสูง จะให้การกินเนื้อชิ้นงานในแต่ละรอบการหมุนต่ำ ส่งผลให้ได้ความขรุขระของผิวรอยเจาะน้อยกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ จากการทดลองเจาะชิ้นงานซิลิคอนที่เผาผนึกชั้นต้นได้โดยไม่เสียหายมีค่าแฟคเตอร์การเจาะ (MRR/V) ที่ขนาดรูเจาะ 3.5, 3.8 และ 5.1 mm ได้ไม่เกิน 0.0729, 0.0950 และ 0.1275 mm²/rev และให้ความขรุขระผิวของรอยเจาะโดยเฉลี่ย, Ra ไม่เกิน 1.16 ± 0.23, 1.68 ± 0.18 และ 1.55 ± 0.17 ไมครอน ตามลำดับ แสดงว่าถ้าเจาะชิ้นงานขนาดรูเจาะต่าง ๆ ด้วยแฟคเตอร์การกลึงมากกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้ชิ้นงานมีความขรุขระผิวรอยเจาะเกินพิคัดค่าที่วัดได้ และมีโอกาสเสียหายได้เช่นกัน

โดยสามารถแสดงแผนภาพการเจาะหัวฉีดน้ำมันที่ Speed และ Feed ในแต่ละขนาดรูเจาะของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกชั้นต้นเป็นเวลาต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 5.5





รูปที่ 5.5 แผนภาพการเจาะหัวฉีดน้ำมันที่ Speed และ Feed ต่าง ๆ ของขนาดรูเจาะ a) 3.5, b) 3.8 และ c) 5.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากแผนภาพการเจาะในแต่ละขนาดรูเจาะ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของเวลาแช่ต่างกันมีค่าเท่ากันแต่ต่างกันที่ความขรุขระผิวรอยเจาะ (Ra) พบว่าเวลาแช่ที่นานมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติกลมากกว่าที่เวลาแช่น้อยกว่า และสมบัติต่าง ๆ จะแปรผกผันกับความขรุขระผิวรอยเจาะ จากแผนภาพการเจาะที่เวลาแช่ 10 ชั่วโมง สมบัติต่าง ๆ และ Ra มีความแตกต่างที่ชัดเจนกับเวลาแช่ 12 และ 14 ชั่วโมงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและให้เป็นเช่นเดียวกับแผนภาพการกลึง การเจาะชิ้นงานซิลิคอนภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้นให้ได้โดยไม่เสียหาย ควรเตรียมชิ้นงานให้มีความแข็งแรงอยู่ในพิสัยที่ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง

5.4 ผลของความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้นต่อความหนาแน่นภายหลังการไนไตรเดชั่นและระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงานเป็น Si_3N_4

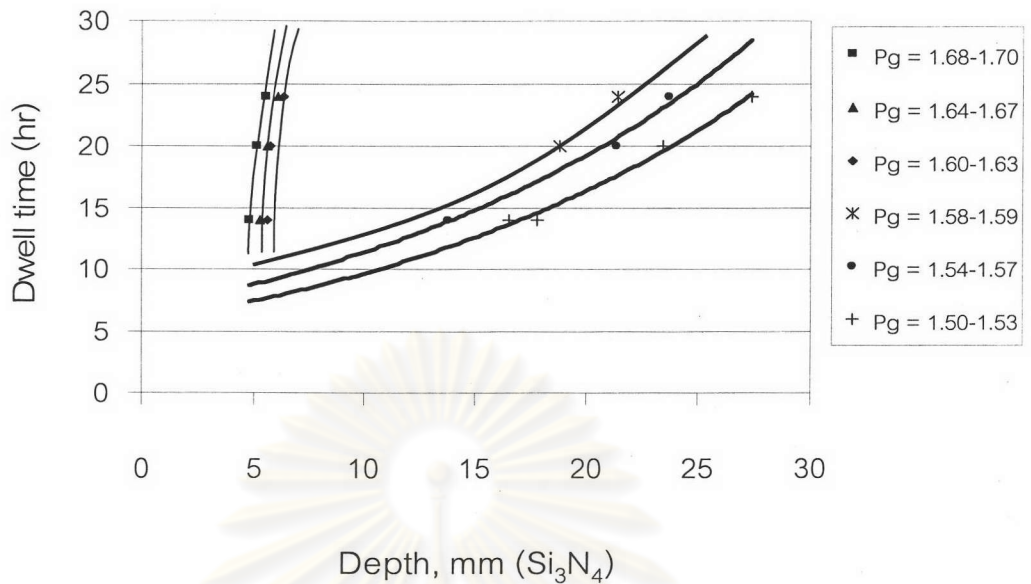
ขนาดและความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกขึ้นต้น (ρ_0) มีผลต่อความหนาแน่นหลังการไนไตรเดชั่น (ρ_N) และระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงานเกิดเป็น Si_3N_4 (หรือ depth ของ Si_3N_4) โดยชิ้นงานที่มีขนาดเฉลี่ย $\phi \times h$ 56.80x30.08 และ 46.08x17.40

มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่เวลาของการไนไตรเดชันต่าง ๆ จะได้ depth ของ Si_3N_4 แตกต่างกันชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและบาง (bar) ที่ depth ของ Si_3N_4 สม่่าเสมอทั้งชิ้นและเกิดเป็น Si_3N_4 ได้อย่างสมบูรณ์

จากผลความหนาแน่นภายหลังการไนไตรเดชันของชิ้นงานหัวฉีดน้ำมัน (nozzle) และชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยม (bar) ไม่สัมพันธ์กับเวลาไนไตรเดชัน เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นเริ่มต้นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นที่ต่างกัน โดยกรณีของชิ้นงาน Nozzle พบว่าที่ความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นต่ำกว่าให้ผลความหนาแน่นหลังการไนไตรเดชันสูงกว่าที่ความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นสูง เนื่องจากความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นที่สูงเป็นผลให้การแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงานลำบากขึ้น และกรณีของชิ้นงาน bar ขนาด $5 \times 12 \times 2$ มิลลิเมตร พบว่าที่ความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นใกล้เคียงกัน (1.71 และ 1.72 g/cm^3) เมื่อเวลาของการไนไตรเดชันเพิ่มขึ้นและแตกต่างกันค่อนข้างมาก พบว่าชิ้นงาน bar เกิด Si_3N_4 ได้สมบูรณ์ โดยค่าความหนาแน่นหลังการไนไตรเดชันที่ได้อยู่ในเกณฑ์สูงและไม่มีความแตกต่างกันที่ชัดเจน จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าชิ้นงาน bar มีค่าความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นเริ่มต้นสูงกว่า nozzle มาก แต่ความหนาแน่นหลังการไนไตรเดชันที่ได้ก็มีค่าสูงมากกว่าเช่นกัน เนื่องจากชิ้นงาน bar มีขนาดเล็กและบาง ดังนั้นการไนไตรเดชันที่เวลาแค่ 14 ชั่วโมงขึ้นไปทำให้การแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงานได้สม่่าเสมอมากกว่าชิ้นงาน nozzle ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นที่ต่ำกว่า

จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นเริ่มต้นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นของชิ้นงานที่ขนาดใด ๆ มีผลต่อความหนาแน่นหลังการไนไตรเดชัน ดังเช่นกรณีของชิ้นงาน bar ที่มีขนาดเล็ก (ความหนาแน่นประมาณ 2-5 มิลลิเมตร) ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้เวลาแช่ของการไนไตรเดชันนานถึง 14 ชั่วโมงก็สามารถเกิดซิลิคอนไนไตรด์ได้สมบูรณ์ จึงควรกำหนดเวลาแช่ของการไนไตรเดชันให้เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไนไตรเดชันที่สมบูรณ์ทั้งชิ้นงาน เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าและแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ นอกจากนี้เวลาแช่ของการไนไตรเดชันที่นานเกินไปยังทำให้ผิวชิ้นงานเกิดออกซิเดชันและเป็นผลให้ชิ้นงาน RBSN การต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Depth ของ Si_3N_4 และเวลาแช่ของการไนไตรเดชัน (Dwell time) ที่ความหนาแน่นภายหลังการเผาผนึกชิ้นต้นต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์เป็นแนวทางสำหรับการใช้งานได้



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนเข้าสู่ชิ้นงาน Depth ของ Si_3N_4 และเวลาแช่ของการไนไตรเดชัน (Dwell time)

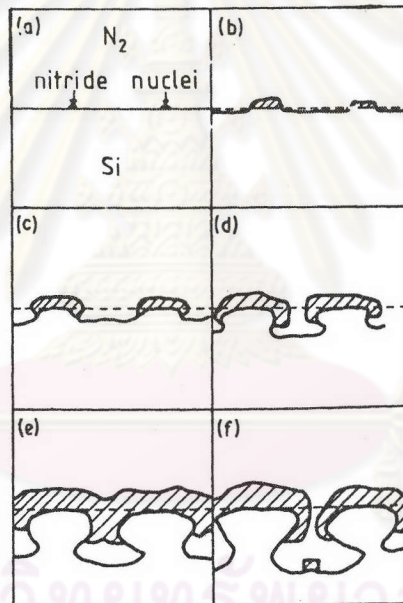
จากความแผนภาพความสัมพันธ์จากรูปที่ 5.8 สามารถใช้เป็นแนวทางในการประมาณเวลาแช่ในการไนไตรเดชันเมื่อทราบขนาดและความหนาแน่นหลังการเผาผนึกชิ้นต้นของชิ้นงาน

5.5 ปริมาณเฟสในโครงสร้างของชิ้นงาน RBSN ที่เวลาไนไตรเดชันต่าง ๆ

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน RBSN ด้วย XRD แบ่งการตรวจเป็น 2 ส่วน คือบริเวณผิวและบริเวณกลางชิ้นงาน พบเฟสที่เกิดขึ้น 2 เฟส คือ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ และ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ โดยไม่พบซิลิคอนเหลืออยู่ในโครงสร้าง นักวิจัยหลายท่าน [Longland และ Moulson, 1979] เชื่อว่าเฟส $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ เกิดจากปฏิกิริยาที่ซิลิคอนเป็นแก๊ส แต่เฟส $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ เกิดจากปฏิกิริยาที่ซิลิคอนเป็นของเหลว โดย $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ เกิดที่อุณหภูมิต่ำและ $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของซิลิคอน (T_m ของ Si ประมาณ 1413°C)

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย XRD บริเวณผิวชิ้นงาน พบว่ามีปริมาณเฟสของ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ มากกว่า $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ โดยการเกิดเฟส $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ มักเกิดบริเวณผิวนอกของอนุภาคซิลิคอน (outer product) [Atkinson et al., 1976] โดยผลึก $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ มี 2 ลักษณะประกอบด้วยผลึกแบบ matte ($\alpha\text{-matte}$) และผลึกรูปเข็ม ($\alpha\text{-needle}$) สามารถอธิบายกลไกการเกิดได้ดังนี้

กลไกการเกิดโครงสร้างผลึกแบบ α -matte อธิบายได้ดังรูปที่ 5.7 โดยปฏิกิริยาจะเกิดได้ง่ายที่ผิว เริ่มแรกของปฏิกิริยาซิลิคอนจะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนบริเวณผิวซิลิคอนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เกิดนิวเคลียสของซิลิคอนไนไตรด์บริเวณผิว (a) และพอกหนาขึ้นเป็นชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ที่ละเอียด (b) ซิลิคอนจะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไนไตรด์เข้าทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนทำให้บริเวณใกล้เคียงเกิดเป็นช่องว่างดังรูป (c) และ (d) จากนั้นไนโตรเจนจะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไนไตรด์เข้าไปในช่องว่างและทำปฏิกิริยากับซิลิคอน ดังรูป (e) โดยปฏิกิริยาจะเกิดเข้าไปในอนุภาคของซิลิคอนเรื่อย ๆ จนไนโตรเจนไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ได้ หรือขณะที่ชั้นของซิลิคอนไนไตรด์หนาขึ้นแต่ยังปิดผิวไม่สนิทและมีช่องว่างเกิดขึ้น จะเกิดนิวเคลียสของซิลิคอนไนไตรด์บริเวณผิวภายในรูพรุนและเกิดการโตขึ้นได้โดยกลไกดังกล่าวดังรูป (f) การเกิด α -matte จะได้ซิลิคอนไนไตรด์บริเวณผิวชิ้นงานที่มีเกรนเล็กละเอียด

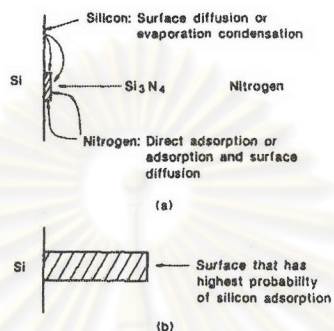


รูปที่ 5.7 กลไกการเกิด α -matte-ซิลิคอนไนไตรด์ [Atkinson et al., 1976]

กลไกการเกิดโครงสร้างผลึกแบบ α -needle (หรือ α -whiskers) อธิบายได้ 2 แบบ ได้แก่ กลไกการกลายเป็นไอแล้วควบแน่น (evaporation-condensation) และ กลไกแก๊ส-ของเหลว-ของแข็ง (vapour-liquid-solid mechanism) [Jenning และ Richman, 1976] ดังนี้

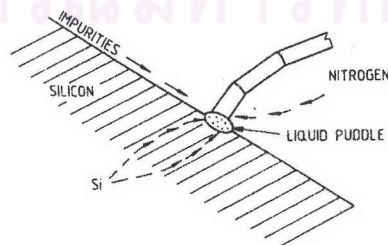
การเกิดผลึก α -needle โดยกลไกการกลายเป็นไอแล้วควบแน่น สารตั้งต้นของปฏิกิริยาจะอยู่ด้านนอกผิวของของนิวเคลียสซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่ง α -needle จะโตเข้าไปในที่มีช่องว่าง

ลักษณะเช่นนี้เกิดเมื่ออุณหภูมิของแก๊สลดลงตามระยะจากผิวของซิลิคอน โดยซิลิคอนจะแพร่ไปบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเป็นแบบการแพร่ที่ผิว (surface diffusion) หรือการกลายเป็นไอแล้วควบแน่น (evaporation-condensation) ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเกิดเป็นนิวเคลียสของซิลิคอนไนไตรด์ จากนั้นซิลิคอนจะกลายเป็นไอทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนแล้วควบแน่นตรงบริเวณที่มีนิวเคลียสของซิลิคอนไนไตรด์อยู่ [Atkinson et al., 1976] ดังรูป 5.8



รูปที่ 5.8 การเกิด α -needle-ซิลิคอนไนไตรด์ โดยกลไกการกลายเป็นไอแล้วควบแน่น [Atkinson et al., 1976]

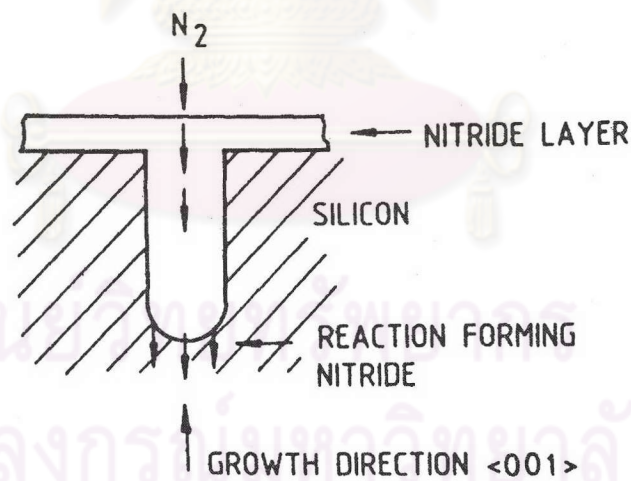
การเกิดผลึก α -needle โดยกลไกแก๊ส-ของเหลว-ของแข็ง จะเกิดกับผงซิลิคอนที่มีสารปนเปื้อนบริเวณผิว เช่น เหล็ก [Messier, 1978] ซึ่งเหล็กจะลดจุดหลอมเหลวของซิลิคอนลงประมาณ 200°C ทำให้เกิดบริเวณหลอมเหลวขึ้น (liquid puddle) ซิลิคอนจากภายในเกรนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาใน liquid puddle เป็นผลให้เกิดช่องว่างในผลึก ซึ่งไนโตรเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวร่วม solid-liquid บริเวณ (liquid puddle) เกิดซิลิคอนไนไตรด์มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม โดยโตขึ้นเรื่อยๆ เข้าไปในบริเวณที่มีช่องว่างดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การเกิด α -needle-ซิลิคอนไนไตรด์ โดยกลไกแก๊ส-ของเหลว-ของแข็ง [Jenning และ Richman, 1976]

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วย XRD บริเวณกลางชิ้นงาน พบว่ามีปริมาณเฟสของ α - Si_3N_4 และ β - Si_3N_4 ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณเฟส β - Si_3N_4 มากกว่า α - Si_3N_4 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาแช่ของการไนไตรเดชันเพิ่มขึ้น การเกิดเฟส β - Si_3N_4 อธิบายได้ดังนี้

กลไกการเกิด β - Si_3N_4 จะเกิดที่อุณหภูมิสูงเหนือจุดหลอมเหลวของซิลิคอนและมีเฟสของเหลวเกิดขึ้นที่อุณหภูมินั้น [Jenning และ Richman, 1976] การเกิด β - Si_3N_4 เกิดจากไนโตรเจนแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยา โดยเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ ลักษณะแรกไนโตรเจนจะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาในเฟสที่เป็นของเหลวของซิลิคอน การเกิด β - Si_3N_4 จึงจำเป็นต้องมีเฟสของเหลวเกิดขึ้น ลักษณะที่สอง ไนโตรเจนจะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนโครงสร้าง β - Si_3N_4 โดยตรง ที่อุณหภูมิไนไตรเดชันสูงเกินจุดหลอมเหลวของซิลิคอนจะพบผลึกของ β - Si_3N_4 ลักษณะแหลม (spike) เกิดบริเวณขอบเกรนโตเข้าไปในบริเวณซิลิคอนหลอมเหลวหรือบริเวณช่องว่าง โดยกลไกหลักของการเกิด β - Si_3N_4 จะเกิดจากซิลิคอนที่หลอมเหลว โดยบริเวณปลายแหลมของผลึกเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาและผลึกจะโตในทิศทางแกน z ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กลไกการเกิดเบตา-ซิลิคอนไนไตรด์ (β - Si_3N_4) [Jenning และ Richman, 1976]

จากการทดลองการเกิด β - Si_3N_4 บริเวณกลางชิ้นงาน คาดว่าจะเกิดจากกลไกการเกิดเฟสของเหลว เนื่องจากผงซิลิคอนเริ่มต้นมีสารปนเปื้อนเช่น เหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียม ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดเฟสของเหลวได้ง่าย