

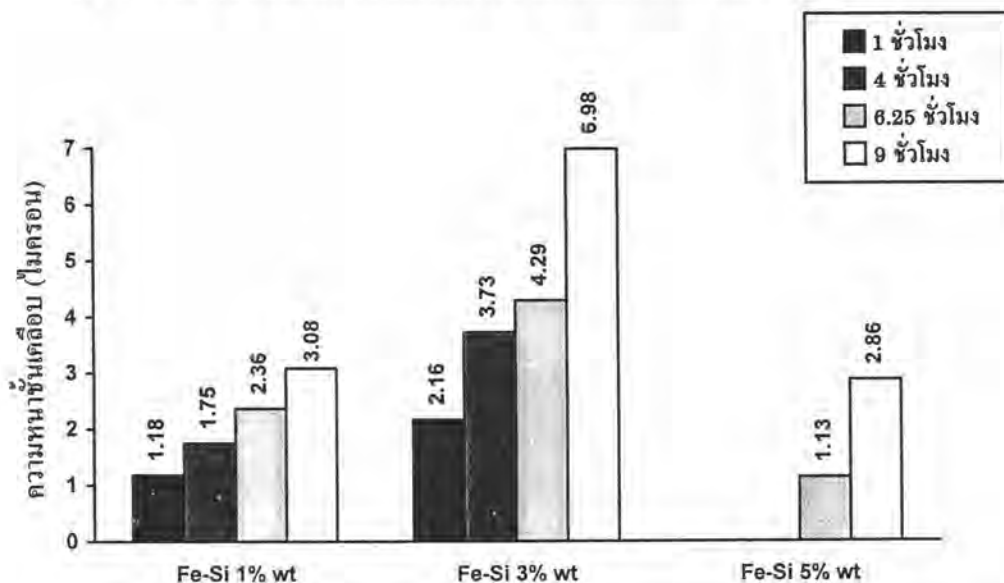
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 อิทธิพลของรีตีวเซอร์ต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1 ถึง 9 ชั่วโมง และเติมรีตีวเซอร์ลงในอ่างเกลือ 3 ชนิดคือ เฟอร์โรซิลิคอน, เฟอร์โรไทเทเนียม และเฟอร์โรแมงกานีส ซึ่งรีตีวเซอร์ทั้ง 3 ชนิดที่เติมลงในอ่างเกลือนี้มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 1000 °C โดยที่เฟอร์โรซิลิคอนมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1395 °C, เฟอร์โรไทเทเนียมมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1140 °C และเฟอร์โรแมงกานีสมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1260 °C⁽⁹⁾ ทำให้พบรีตีวเซอร์ทั้ง 3 ชนิดในลักษณะที่เป็นของแข็งจับตัวเป็นก้อนอยู่ที่ด้านล่างของอ่างเกลือหลังเสร็จสิ้นการทดลอง โดยมีผลการทดลองการเคลือบผิวดังนี้

4.1.1 อิทธิพลของเฟอร์โรซิลิคอนต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4.1 ผลความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 °C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ใช้เฟอร์โรซิลิคอนเป็นตัวรีตีวเซอร์



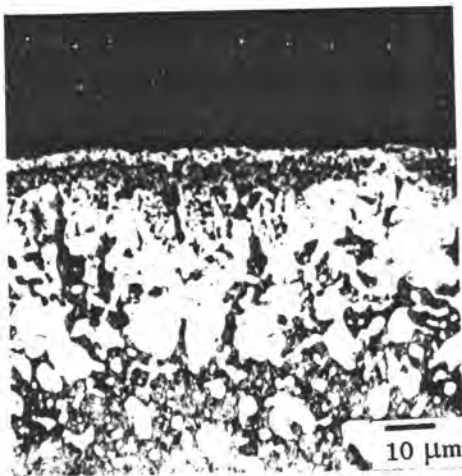
10 μm

(ก)



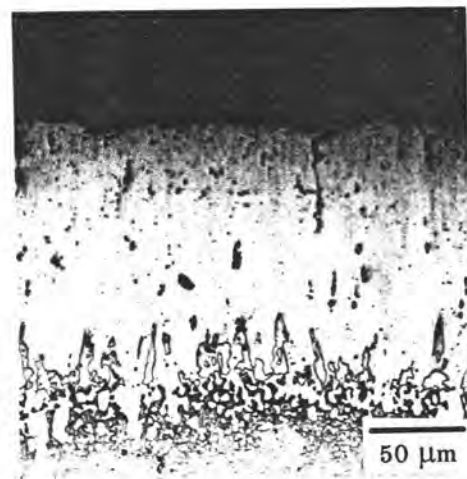
10 μm

(ข)



10 μm

(ค)



50 μm

(ง)

รูปที่ 4.2 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบผิวชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมงในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์และเฟอร์โรซิลิคอน (ก) 1, (ข) 3, (ค) 5, และ (ง) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

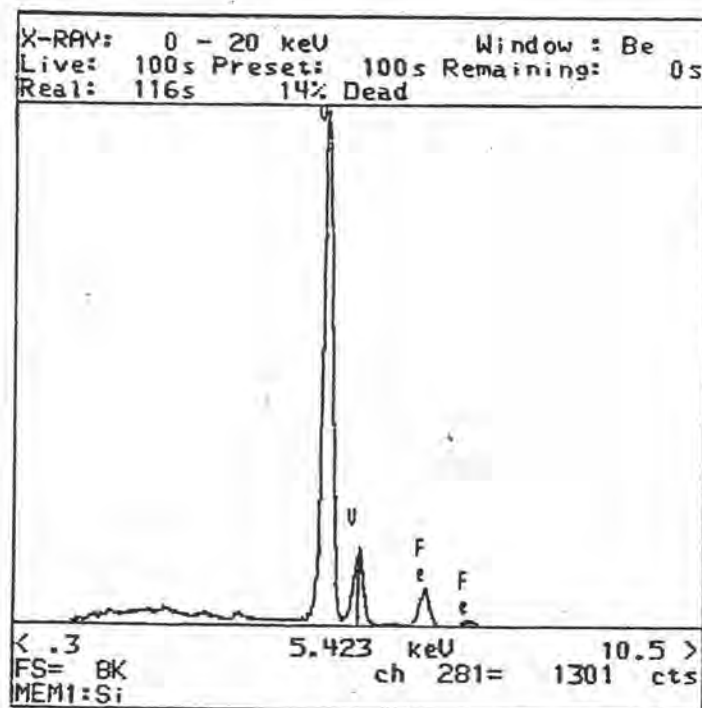
จากผลความหนาชั้นเคลือบในรูปที่ 4.1 พบว่าการเติมเฟอร์โรซิลิกอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้เกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิวในช่วงเวลา 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 1.18, 1.75, 2.36 และ 3.08 ไมครอนตามลำดับ รูปโครงสร้างบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงโดยใช้เฟอร์โรซิลิกอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ แสดงในรูปที่ 4.2 (ก) จะเห็นว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นและเนื้อเหล็กแบ่งแยกชั้นกันอย่างชัดเจนจนสามารถเห็นรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับเนื้อเหล็กได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา

กรณีเติมเฟอร์โรซิลิกอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดชั้นเคลือบที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมงโดยที่เวลาเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมงได้ความหนาชั้นเคลือบเป็น 2.16, 3.73, 4.29 และ 6.98 ไมครอนตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.2 (ข) ซึ่งเป็นรูปโครงสร้างบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงโดยใช้เฟอร์โรซิลิกอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ พบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นเป็นชั้นเคลือบที่มีลักษณะเดียวกันกับชั้นเคลือบที่เกิดจากการใช้เฟอร์โรซิลิกอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ แต่ชั้นเคลือบที่เกิดจากการใช้เฟอร์โรซิลิกอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์มีความหนาของชั้นเคลือบมากกว่า

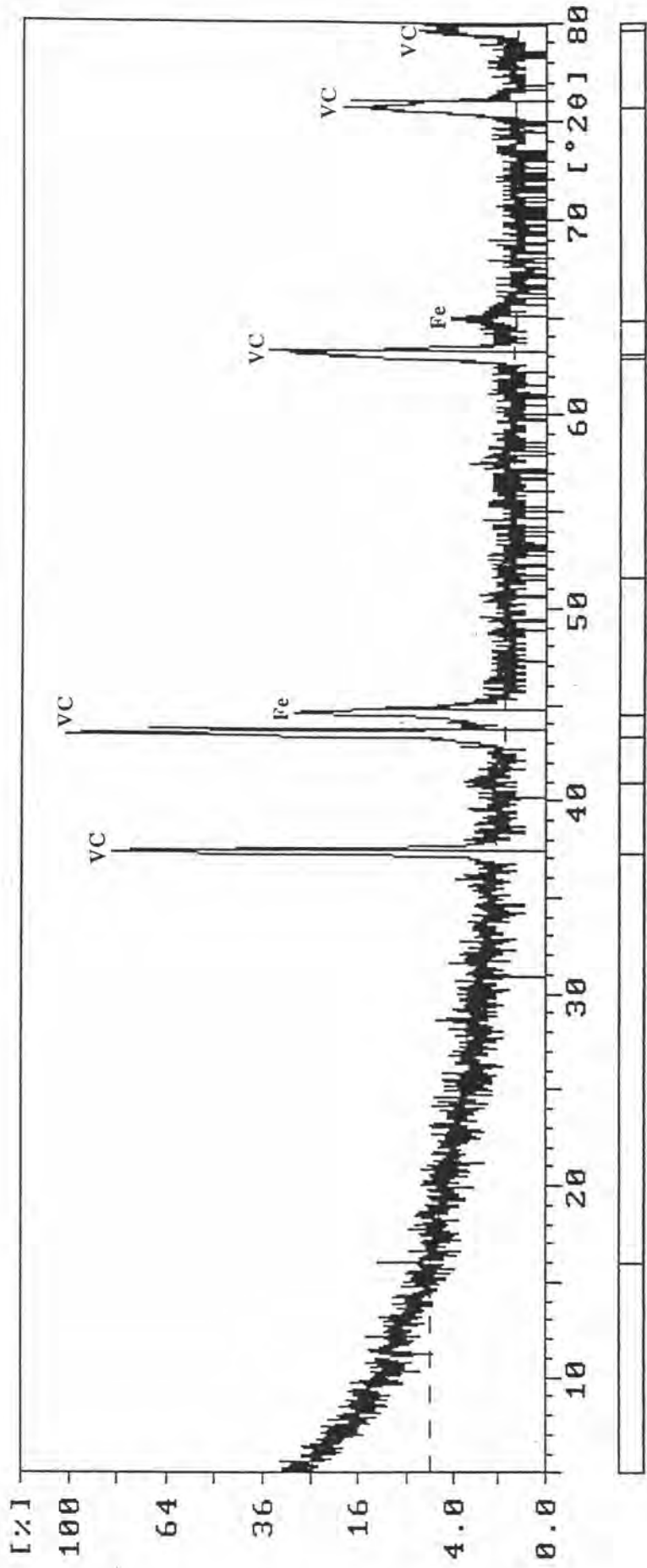
เมื่อวิเคราะห์ชั้นเคลือบที่ได้ด้วยวิธี EDS ได้ผลการวิเคราะห์ธาตุที่ชั้นเคลือบดังรูปที่ 4.3 พบว่าที่ชั้นเคลือบนั้นประกอบด้วยธาตุวานาเดียมและเหล็ก เมื่อวิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วยวิธี XRD ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงในอ่างเกลือที่เติม เฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์และเฟอร์โรซิลิกอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีสเปกตรัมเกิดขึ้นที่มุม 37.4° , 43.7° , 63.2° , 76° และ 79.8° ซึ่งเป็นค่าสเปกตรัมของวานาเดียมคาร์ไบด์ และขณะเดียวกันพบสเปกตรัมของเหล็กซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 44.7° และ 65.1° จากผลการวิเคราะห์ EDS และ XRD สามารถสรุปได้ว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์โดยใช้เฟอร์โรซิลิกอนเป็นตัวรีดิวเซอร์

กล่าวได้ว่าเฟอร์โรซิลิกอนมีส่วนสำคัญในกระบวนการเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ทั้งนี้เป็นเพราะวานาเดียมจากเฟอร์โรวานาเดียมที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวไม่ได้ละลายในรูปของอะตอมวานาเดียมอิสระโดยตรงแต่ละลายอยู่ในรูปของวานาเดียมเพนตอกไซด์ (vanadium pentoxide, V_2O_5) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง

และมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ -124 กิโลแคลอรีต่อกรัม โมลของวานาเดียม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ของวานาเดียมในรูป V_2O_3 ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำและมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ -109 กิโลแคลอรีต่อกรัม โมลของวานาเดียม⁽⁵⁾ จึงต้องการเฟอร์โรซิลิคอนเป็นตัวรีดิวเซอร์ซึ่งทำหน้าที่รีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงให้เป็นอะตอมวานาเดียมอิสระ (nascent V) หรือเป็นวานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำก่อนจะไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วย EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$ เป็นเวลา 9 ชั่วโมงในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ และเฟอร์โรซิลิคอน 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

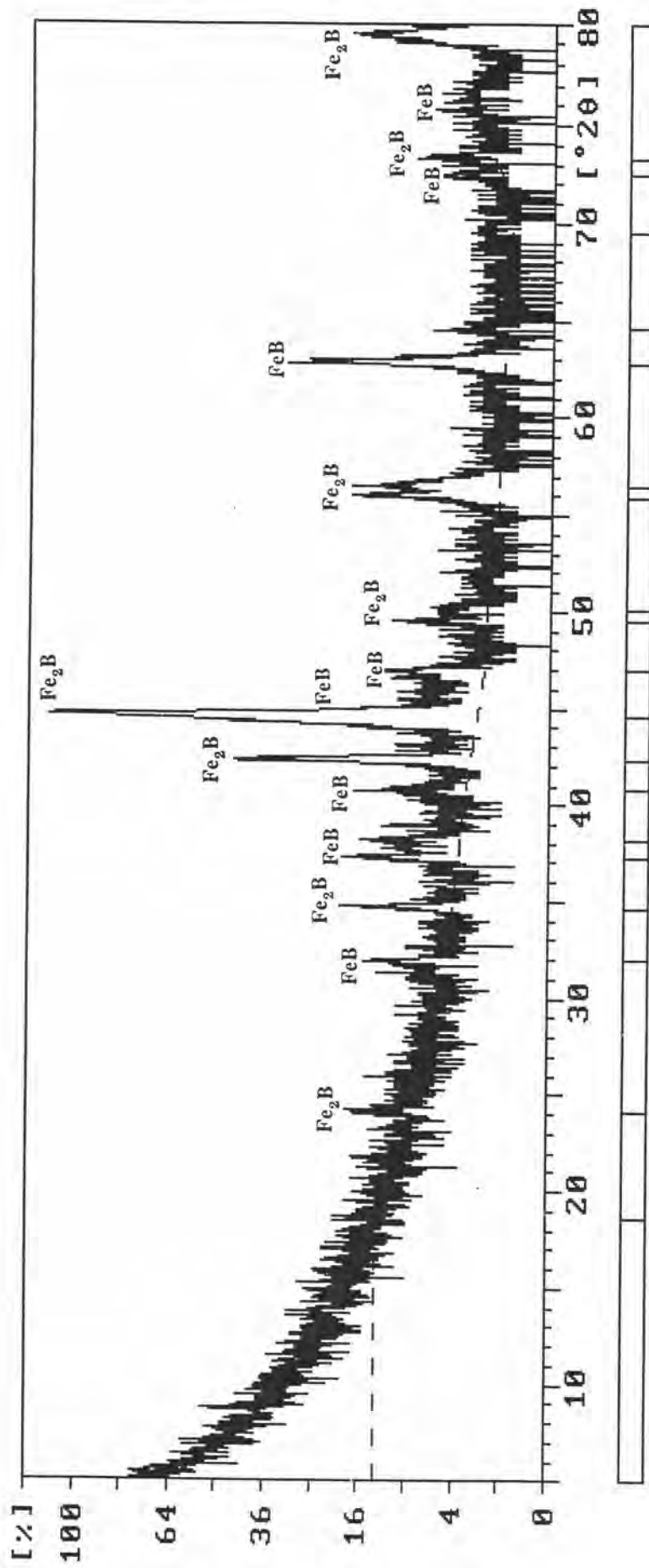


รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบพีค XRD ของผิวชั้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์ไรวาเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ และเฟอร์โรซิลิกอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C

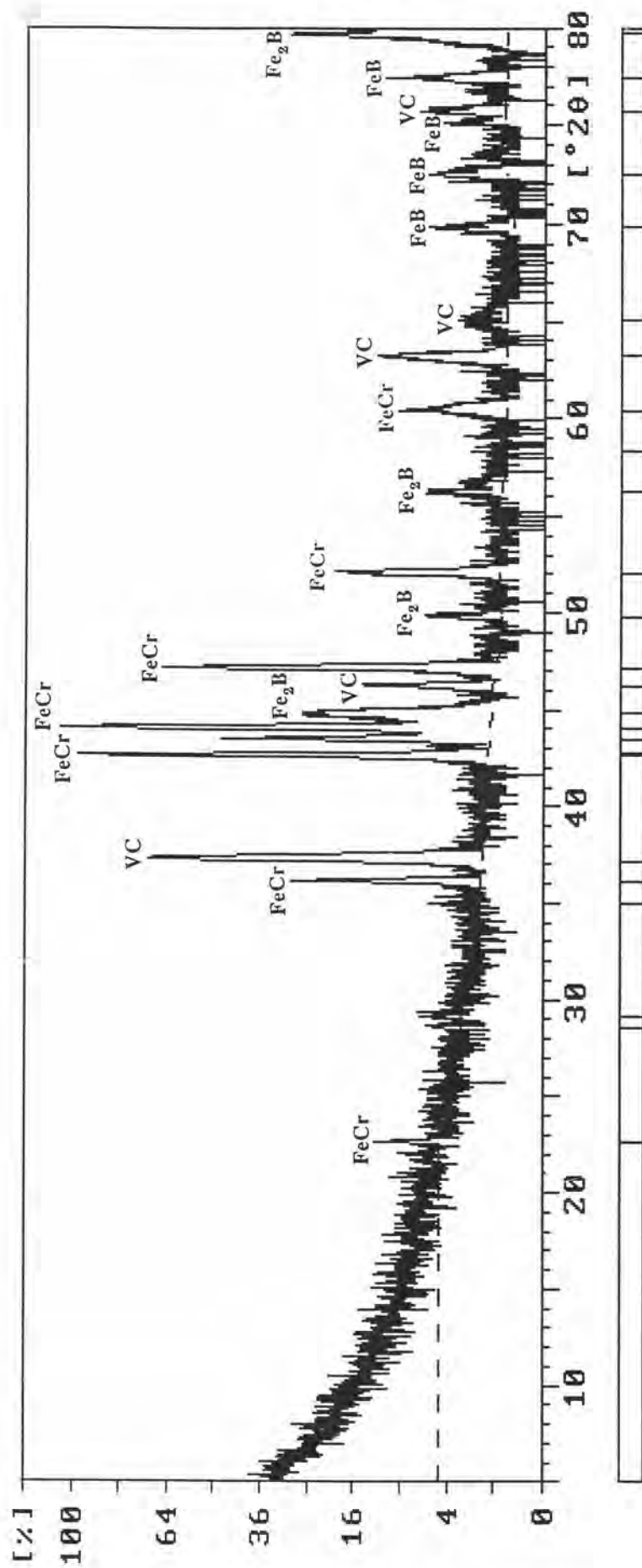
กรณีเติมเฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 4 ชั่วโมงพบว่าเกิดชั้นเคลือบขึ้นที่ผิวชิ้นงานแต่ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะแตกต่างจากชั้นเคลือบในกรณีที่ใส่เฟอร์โรซิลิคอน 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วยวิธี XRD พบสเปกตรัมเกิดขึ้นที่มุม 37.7° , 4.12° , 45.0° , 35.1° , 42.5° และ 45.0° ซึ่งเป็นค่าสเปกตรัมของเหล็กบอไรด์(FeB และ Fe_2B) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการวิเคราะห์ XRD สามารถกล่าวได้ว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นเป็นชั้นเหล็กบอไรด์

สำหรับช่วงเวลาการเคลือบผิว 6.25 ถึง 9 ชั่วโมง พบว่าคล้ายเกิดชั้นเคลือบขึ้นบนชั้นเหล็กบอไรด์ วัดความหนาชั้นเคลือบได้ 1.13 และ 2.86 ไมครอนตามลำดับ รูปโครงสร้างบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงโดยใช้เฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ แสดงในรูปที่ 4.2 (ค) พบว่าคล้ายเกิดชั้นเคลือบบนชั้นเหล็กบอไรด์ซึ่งชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมานั้น มีลักษณะคล้ายชั้นเคลือบที่ได้จากกรณีที่ใส่เฟอร์โรซิลิคอน 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์แต่มีความหนาของชั้นเคลือบน้อยกว่า เมื่อวิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วยวิธี XRD พบสเปกตรัมของวานาเดียมคาร์ไบด์, สเปกตรัมของเหล็กบอไรด์ และสเปกตรัมที่มุม 42.4° , 43.8° , 46.1° และ 47.1° ซึ่งเป็นค่าสเปกตรัมของเหล็กโครเมียม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นผลการวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์และเฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการวิเคราะห์ XRD กล่าวว่าเกิดวานาเดียมคาร์ไบด์และเหล็กบอไรด์ เมื่อทำการทดสอบความแข็งในบริเวณที่เป็นเหล็กบอไรด์ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ด้วยน้ำหนักกด 100 กรัม ได้ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1430 Hv

การเกิดวานาเดียมคาร์ไบด์และเหล็กบอไรด์ได้นั้น คาดว่าเป็นเพราะปริมาณเฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ใช้เป็นตัวรีดิวเซอร์นั้นมีปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการในการรีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ จึงมีเฟอร์โรซิลิคอนบางส่วนเหลืออยู่และเนื่องจากซิลิคอนมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ที่ต่ำกว่าโบรอนจึงสามารถรีดิวซ์โบรอนออกไซด์(B_2O_3)ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว⁽⁵⁾ ทำให้ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวมีอะตอมโบรอนละลายอยู่ บริเวณผิวของชิ้นงานจึงมีอะตอมวานาเดียมที่พร้อมจะรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนเกิดเป็นวานาเดียมคาร์ไบด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานและมีอะตอมโบรอนที่พร้อมจะรวมตัวกับอะตอมเหล็กเกิดเป็นเหล็กบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานเช่นกัน ดังนั้นจึงเกิด



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบพีค XRD ของฟิวชันงานที่ผ่านการศึกษาการเคลือบผิวเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่ตีพิมพ์โรไวรานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ และเฟอไรต์ และเฟอไรต์ โดยน้ำหนักโดยนํานหนักที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C



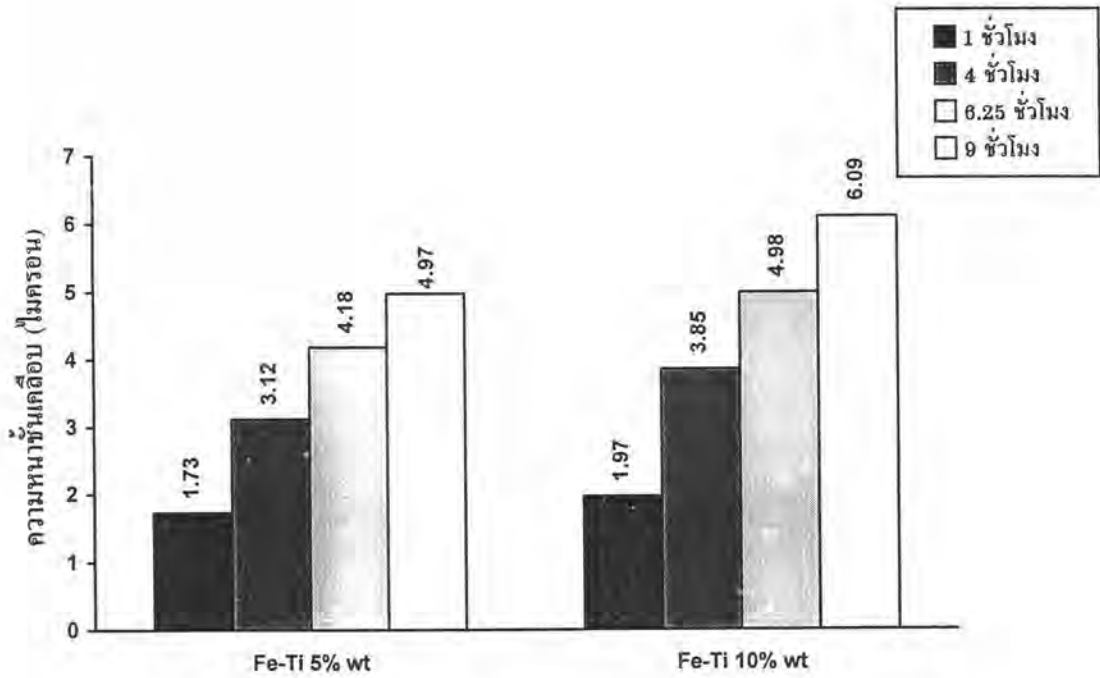
รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบพีค XRD ของผิวชั้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์ไรต์ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และเฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C

วานเดียมคาร์ไบด์และเหล็กบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานแต่โบรอนเป็นธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็กจึงสามารถแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กได้ดีกว่าและรวมตัวกับธาตุเหล็กที่มีอยู่ในเนื้อเหล็กเกิดเป็นเหล็กบอไรด์ (6.7.8) ดังนั้นในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 4 ชั่วโมงพบแต่ชั้นเหล็กบอไรด์ไม่พบชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ ที่ไม่พบชั้นวานเดียมคาร์ไบด์คาดว่าเพราะใช้ เวลาการเคลือบผิวน้อยทำให้วานเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกระจายอยู่บนผิวชิ้นงานจนไม่สามารถสังเกตเห็นความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ได้ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบผิวนานขึ้นคือ 6.25 ถึง 9 ชั่วโมง วานเดียมคาร์ไบด์มีปริมาณมากขึ้นและรวมตัวกันจนสามารถสังเกตเห็นความหนาของชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ได้ โดยความหนาชั้นเคลือบที่ได้้น้อยกว่าความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ในกรณีที่ใช้เฟอร์โรซิลิคอน 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ เนื่องจากอะตอมคาร์บอนจากเนื้อโลหะไม่สามารถแพร่ซึมผ่านชั้นเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นได้^(6.7,8) ทำให้อะตอมคาร์บอนที่มารวมตัวกับอะตอมวานเดียมที่ผิวชิ้นงานมีจำนวนลดลง ดังนั้นชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจึงมีความหนาลดลง โดยที่เวลาการเคลือบผิว 9 ชั่วโมงได้ความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์เพียง 2.86 ไมครอน

กรณีเติมเฟอร์โรซิลิคอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง พบว่าเกิดชั้นเหล็กบอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ง) เป็นรูปโครงสร้างชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นเวลา 9 ชั่วโมงโดยใช้เฟอร์โรซิลิคอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ จะเห็นว่าชั้นเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกันกับชั้นเหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้เฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้เวลาในการเคลือบผิว 1 ถึง 4 ชั่วโมง แต่ชั้นเหล็กบอไรด์ในกรณีที่เติมเฟอร์โรซิลิคอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความหนามากกว่า เมื่อทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ด้วยน้ำหนักกด 100 กรัม ได้ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1785 Hv

การเกิดขึ้นเฉพาะชั้นเหล็กบอไรด์คาดว่าเพราะปริมาณเฟอร์โรซิลิคอนที่ใช้มีปริมาณมากเกินความต้องการในการรีดิวซ์วานเดียมออกไซด์ สารเฟอร์โรซิลิคอนที่เกินมานั้นจะมีปริมาณมากและไปรีดิวซ์โบรอนออกไซด์เกิดเป็นอะตอมโบรอนจำนวนมากละลายอยู่ในเกลือบแรกซ์หลอมเหลว ทำให้อะตอมโบรอนที่มีขนาดเล็กนี้แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กและรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นเหล็กบอไรด์ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยไม่ปรากฏชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ นั้นแสดงว่าซิลิคอนสามารถรีดิวซ์โบรอนออกไซด์(B_2O_3) ได้ซึ่งตรงกับ รูปที่ 2.5 ที่ H.C. Child, S.A. Plumb และ J.J. McDemott⁽⁵⁾ ได้กล่าวถึงกรณีที่เติมซิลิคอนลงในอ่างเกลือบแรกซ์จะเกิดชั้นเหล็กบอไรด์ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน

4.1.2 อิทธิพลของเฟอร์ไรท์ไทเทเนียมต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4.7 ผลความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ใช้เฟอร์ไรท์ไทเทเนียมเป็นตัวรีดิวเซอร์

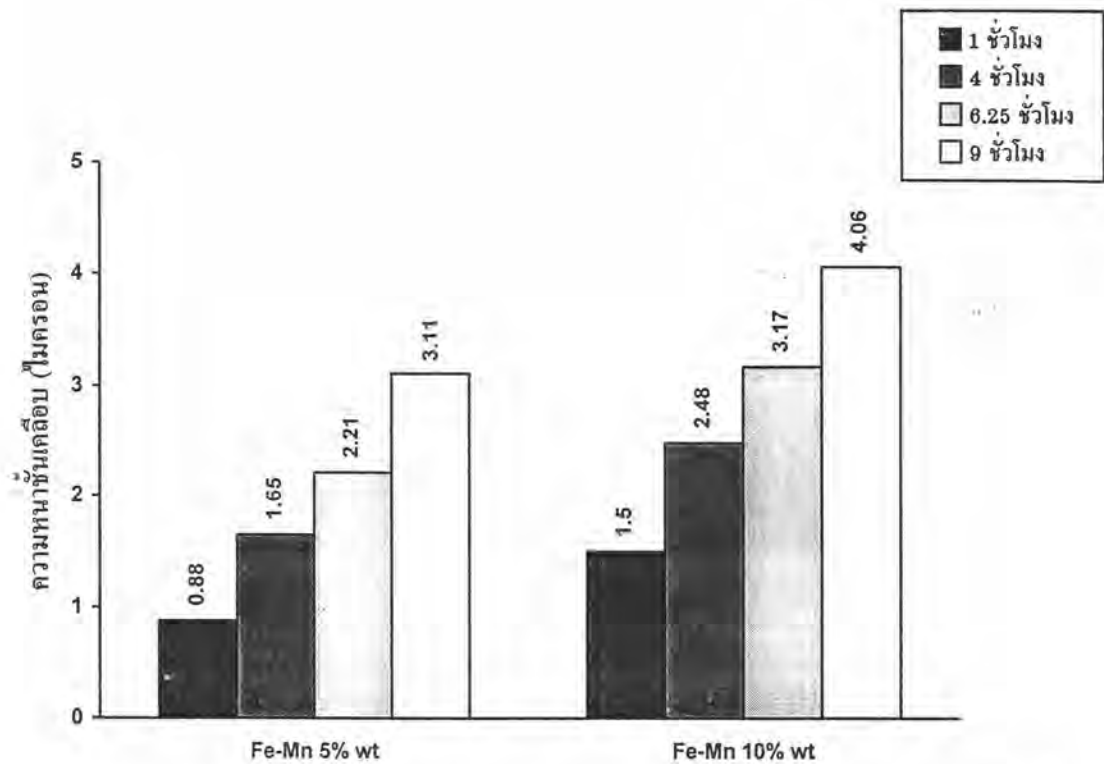
การศึกษาการใช้เฟอร์ไรท์ไทเทเนียมเป็นตัวรีดิวเซอร์ ทำการทดลองโดยเติมเฟอร์ไรท์ไทเทเนียมปริมาณ 3 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ใช้ช่วงเวลากการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง กรณีเติมเฟอร์ไรท์ไทเทเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ปรากฏว่าไม่พบชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลากการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ในช่วงเวลากการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยใช้เฟอร์ไรท์ไทเทเนียมเป็นตัวรีดิวเซอร์ พบว่ากรณีเติมเฟอร์ไรท์ไทเทเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลากการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลากการเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมง จะได้ความหนาชั้นเคลือบ 1.73, 3.12, 4.18 และ 4.97 ไมครอนตามลำดับ

กรณีเติมเฟอร์โรไทเทเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏว่าเกิดขึ้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมง จะให้ความหนาชั้นเคลือบ 1.97, 3.85, 4.98 และ 6.09 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการเติมเฟอร์โรไทเทเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถกล่าวได้ว่าเฟอร์โรไทเทเนียมมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยที่เฟอร์โรไทเทเนียมเป็นตัวรีดิวเซอร์เช่นเดียวกับเฟอร์โรซิลิคอน ซึ่งเฟอร์โรไทเทเนียมจะทำหน้าที่รีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงให้เป็นวานาเดียมหรือวานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำก่อนจะไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

จากรูปที่ 4.7 ชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ในกรณีที่เติมเฟอร์โรไทเทเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความหนามากกว่าในกรณีที่เติมเฟอร์โรไทเทเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าในเคลือบแรกซ์หลอมเหลวในกรณีที่เติมเฟอร์โรไทเทเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักยังคงมีวานาเดียมออกไซด์ที่ยังไม่ได้รับรีดิวซ์เหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์โรไทเทเนียมเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เฟอร์โรไทเทเนียมที่เพิ่มขึ้นมานั้นสามารถรีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ที่เหลืออยู่นั้นให้เป็นวานาเดียมหรือวานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำก่อนที่จะไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่มีความหนามากขึ้น

4.1.3 อิทธิพลของเฟอร์โรแมงกานีสต่อชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์



รูปที่ 4.8 ผลความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบบอแรกซ์ที่ใช้เฟอร์โรแมงกานีสเป็นตัวรีดิวเซอร์

การศึกษาการใช้เฟอร์โรแมงกานีสเป็นตัวรีดิวเซอร์ ทำการทดลองโดยเติมเฟอร์โรแมงกานีสปริมาณ 3 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ใช้ช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง กรณีเติมเฟอร์โรแมงกานีส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ปรากฏว่าไม่พบชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นผลความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 โดยใช้เฟอร์โรแมงกานีสเป็นตัวรีดิวเซอร์ พบว่าในกรณีที่เติมเฟอร์โรแมงกานีส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมง จะได้ความหนาชั้นเคลือบ 0.88, 1.65, 2.21 และ 3.11 ไมครอนตามลำดับ

กรณีเติมเฟอร์โรแมงกานีส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏว่าเกิดขึ้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมง จะให้ความหนาชั้นเคลือบ 1.50, 2.48, 3.17 และ 4.06 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาชั้นเคลือบที่ได้จากการเติมเฟอร์โรแมงกานีส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถกล่าวได้ว่าเฟอร์โรแมงกานีสมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการเกิดขึ้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ โดยที่เฟอร์โรแมงกานีสเป็นตัวรีดิวเซอร์เช่นเดียวกับเฟอร์โรซิลิกอนและเฟอร์โรไทเทเนียม ซึ่งเฟอร์โรแมงกานีสจะทำหน้าที่รีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงให้เป็นวานาเดียมหรือวานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำก่อนจะไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

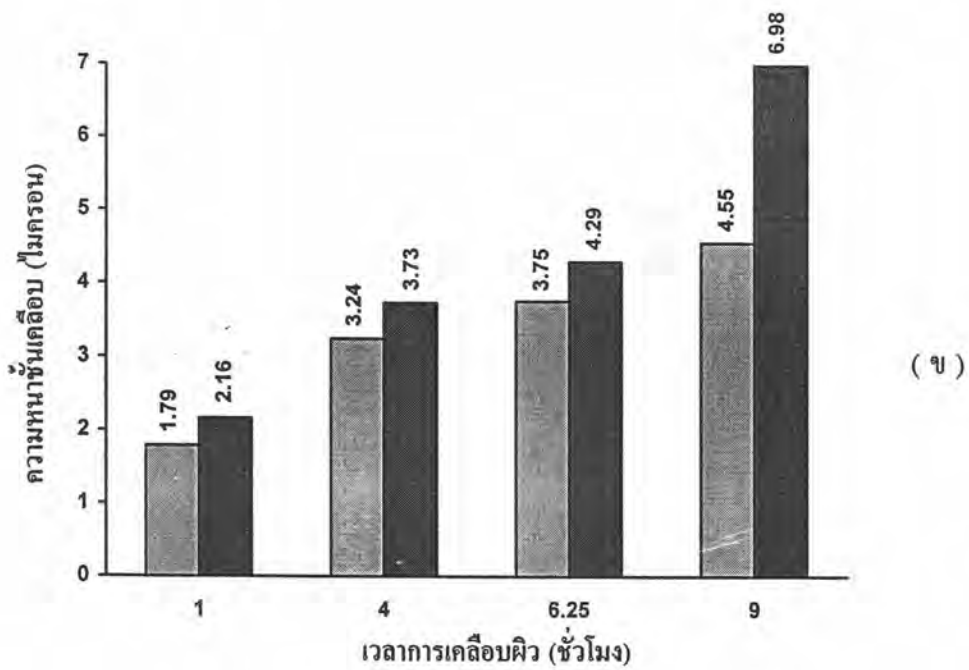
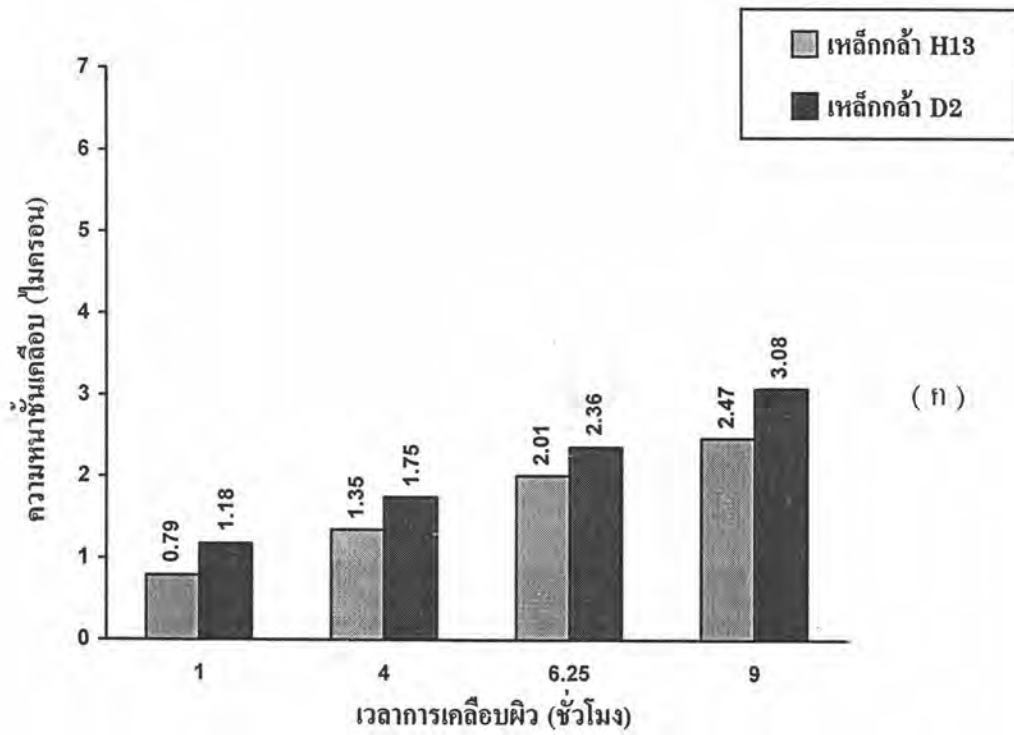
ชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ในกรณีที่เติมเฟอร์โรแมงกานีส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความหนามากกว่าในกรณีที่เติมเฟอร์โรแมงกานีส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงว่าในเกลือบอบแรกซ์หลอมเหลวในกรณีที่เติมเฟอร์โรแมงกานีส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักยังคงมีวานาเดียมออกไซด์ที่ยังไม่ได้รับรีดิวซ์เหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์โรแมงกานีสเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เฟอร์โรแมงกานีสที่เพิ่มมานั้นสามารถรีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ให้เป็นวานาเดียมหรือวานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำก่อนไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่มีความหนามากขึ้น

4.1.4 อิทธิพลของรีดิวเซอร์ทั้ง 3 ชนิดต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

สารเฟอร์โรซิลิคอน, เฟอร์โรไทเทเนียม และเฟอร์โรแมงกานีส ที่เติมในเคลือบอบแห้งหลอมเหลวมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ในกระบวนการเคลือบผิว TD โดยเฟอร์โรซิลิคอน, เฟอร์โรไทเทเนียม และเฟอร์โรแมงกานีสทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวเซอร์ซึ่งจะรีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูงให้เป็นอะตอมวานาเดียมอิสระ (nascent V) หรือเป็นวานาเดียมออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ ก่อนจะไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กและเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงาน แต่เนื่องจากซิลิคอน, ไทเทเนียม และ แมงกานีส มีค่าพลังงานอิสระสำหรับการเกิดออกไซด์ต่ำกว่าโบรอน⁽⁵⁾ แสดงว่าสารรีดิวเซอร์ที่ใช้คือเฟอร์โรซิลิคอน, เฟอร์โรไทเทเนียม และเฟอร์โรแมงกานีสสามารถรีดิวซ์โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ให้เป็นอะตอมโบรอนในเคลือบอบแห้งหลอมเหลว ดังนั้นถ้าเติมตัวรีดิวเซอร์ลงในอ่างเคลือบอบแห้งหลอมเหลวในปริมาณที่สูงทำให้มีปริมาณรีดิวเซอร์เหลือหลังจากรีดิวซ์วานาเดียมออกไซด์ให้เป็นอะตอมวานาเดียมอิสระ สารรีดิวเซอร์ที่เหลือนี้จะไปรีดิวซ์โบรอนออกไซด์เกิดเป็นอะตอมโบรอนขึ้นในเคลือบอบแห้งทำให้เกิดชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์ขึ้นที่ผิวชิ้นงานมีผลทำให้อะตอมคาร์บอนภายในเนื้อเหล็กไม่สามารถแพร่ซึมผ่านชั้นเหล็กบอไรด์^(7,8) มาที่ผิวชิ้นงานเพื่อที่จะมารวมตัวกับอะตอมวานาเดียมได้มีผลทำให้ชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้มีความหนาคลงดังในกรณีที่ใช้เฟอร์โรซิลิคอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์ หรือถ้ามีปริมาณของอะตอมโบรอนมากที่สุดท้ายจะไม่เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงานเลยก็ได้ โดยจะพบแต่ชั้นเคลือบเหล็กบอไรด์บนผิวชิ้นงานดังในกรณีที่ใช้เฟอร์โรซิลิคอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวรีดิวเซอร์

4.2 อิทธิพลของเวลาต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 ในอ่างเคลือบที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเฟอร์โรซิลิคอน 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว $1000^{\circ}C$ และเวลาการเคลือบผิวในช่วง 1 ถึง 9 ชั่วโมงพบว่าความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ก) เฟอร์โรซิลิคอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ข) เฟอร์โรซิลิคอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สำหรับผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 กรณีที่เติมเฟอร์โรไทเทเนียม 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกรณีที่เติมเฟอร์โรแมงกานีส 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4, 6.25 และ 9 ชั่วโมง จะให้ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิวเช่นเดียวกันกับในกรณีที่เติมเฟอร์โรซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

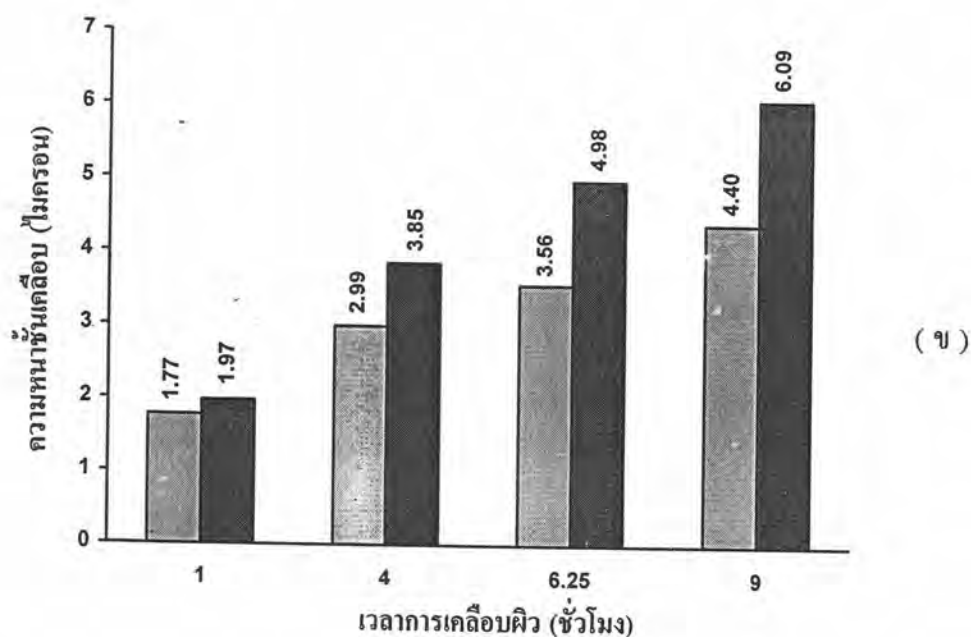
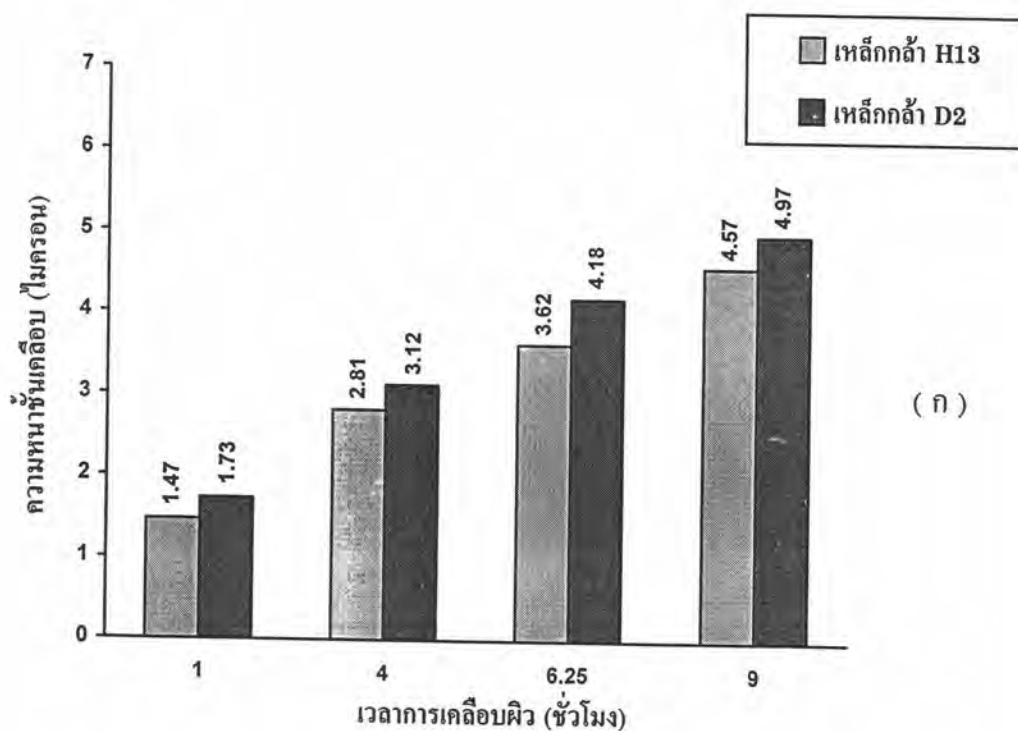
ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่วัดได้จากการทดลองนอกจากจะเพิ่มขึ้นตามที่ใช้ในเวลาการเคลือบผิวแล้วความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ยังเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิว^(3,4,5) อีกด้วย ดังแสดงในภาคผนวกรูปที่ ข.8 ถึง ข.13 แสดงว่าการหนาชั้นของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์นั้นเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ซึม (diffusion control) โดยที่สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม(K) ของการทดลอง ได้จากค่าความชันของกราฟ รูปที่ ข.8 ถึง ข.13 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad K &= d^2/t \\ K^{1/2} &= d/t^{1/2} = \text{ความชัน} \\ K &= (\text{ความชัน})^2 \end{aligned}$$

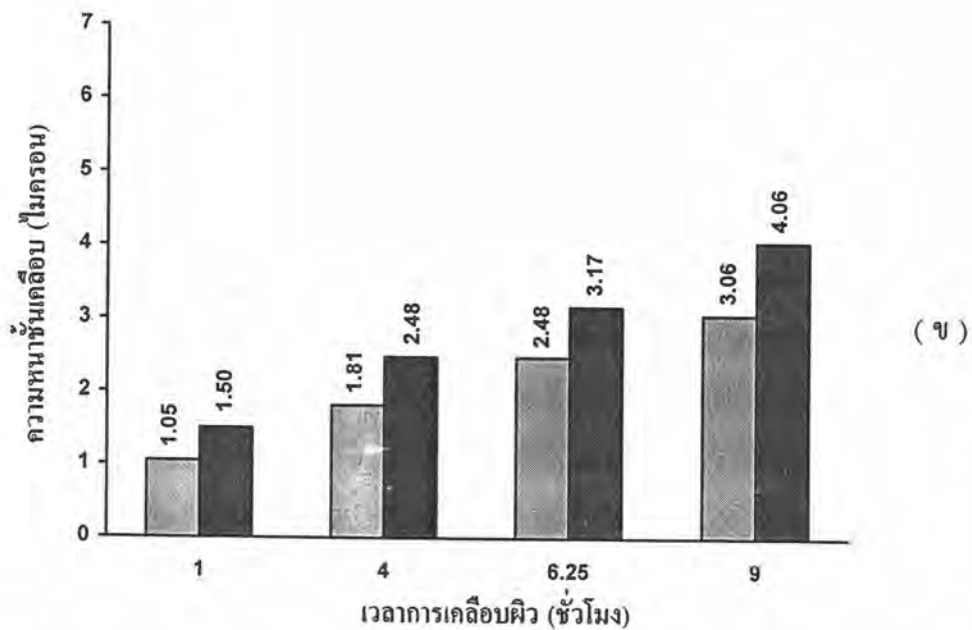
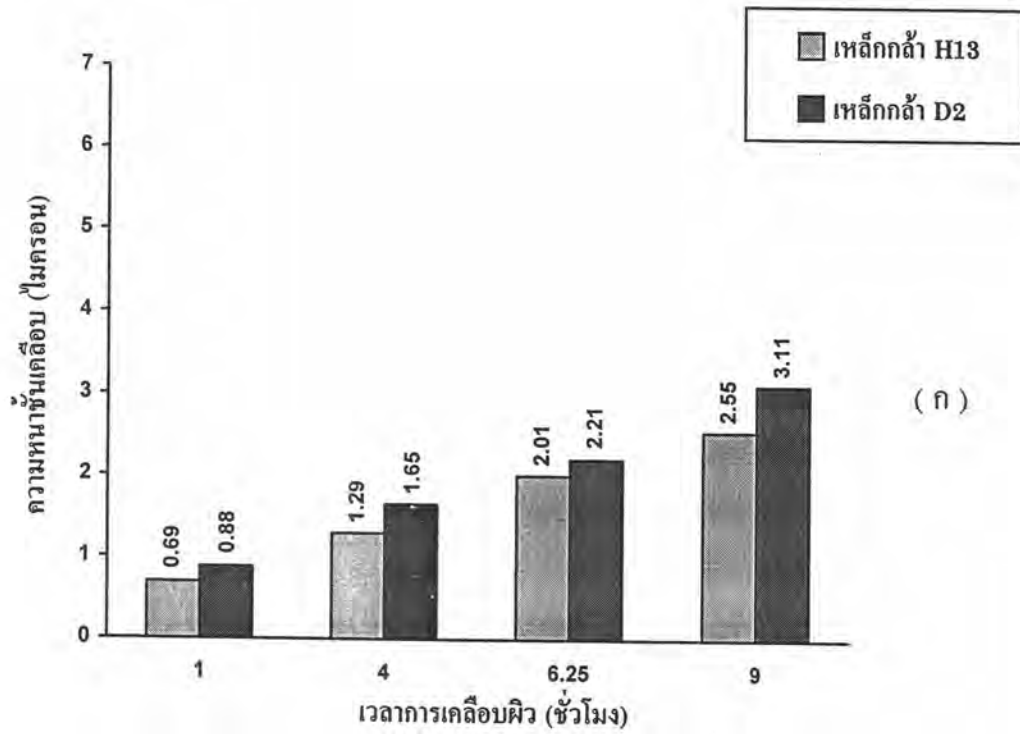
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม(K)ที่ได้จากการคำนวณจากการทดลองที่เกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ผิวชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการคำนวณจากการทดลอง

ชนิดและปริมาณของรีดิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม(K), cm ² /sec x 10 ⁻⁸	
	D2	H13
เฟอร์โรซิลิคอน 1 % wt	0.940	0.617
เฟอร์โรซิลิคอน 3 % wt	4.157	2.388
เฟอร์โรไทเทเนียม 5 % wt	2.710	2.173
เฟอร์โรไทเทเนียม 10 % wt	3.978	2.264
เฟอร์โรแมงกานีส 5 % wt	0.883	0.621
เฟอร์โรแมงกานีส 10 % wt	1.670	0.955



รูปที่ 4.10 ผลความหนาแน่นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ก) เฟอร์โรไทเทเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ(ข) เฟอร์โรไทเทเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 ผลความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ก) เฟอร์โรแมงกานีส 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ข) เฟอร์โรแมงกานีส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3 ชนิดเหล็กกล้ากับความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 ที่อุณหภูมิ 1000 °C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไซเฟอร์โรซิลิคอน, เฟอร์โรไทเทเนียม และเฟอร์โรแมงกานีสเป็นตัวรีดิวเซอร์ ผลการทดลองปรากฏว่าความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองในทุกกรณีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 และ H13 พบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 มีความหนาน้อยกว่าชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ในทุกการทดลองที่เกิดชั้นวานาเดียมคาร์ไบด์ขึ้นบนผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 เมื่อพิจารณาส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าเหล็กกล้า D2 และ H13 ที่ใช้ในการทดลองมีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม 1.05 และ 0.30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทำให้ที่อุณหภูมิการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 มีปริมาณคาร์บอนที่สามารถแพร่เข้ามาที่ผิวชิ้นงานมากกว่าและรวมตัวกับวานาเดียมเกิดเป็นชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่หนากว่าเหล็กกล้า H13^(3,4)

เหล็กกล้า D2 และ H13 มีปริมาณธาตุโครเมียม 11.3 และ 5.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเหล็กกล้า D2 มีปริมาณมากกว่าเหล็กกล้า H13 ทำให้เหล็กกล้า D2 มีปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) มากกว่าในเหล็กกล้า H13 แสดงว่าในเหล็กกล้า D2 เสียคาร์บอนในการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ แต่ในสภาวะการเคลือบผิวทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ W.C. Leslie⁽¹⁰⁾ ได้กล่าวว่าคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูป $M_{23}C_6$ จะละลายในออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 980-1025 °C และ 995-1025 °C สำหรับเหล็กกล้า D2 และ H13 ตามลำดับ กล่าวคือโครเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้า D2 และ H13 จะละลายในออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิการเคลือบผิวดังนั้นปริมาณโครเมียมที่แตกต่างในเหล็กกล้าทั้ง 2 ชนิดไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนภายในเนื้อเหล็กกล้าทั้ง 2 ชนิดและไม่มีผลกับความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นด้วย