

## ผลการทดลองและการอภิปราย

### 4.1 อิทธิพลของการกวนต่อชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์

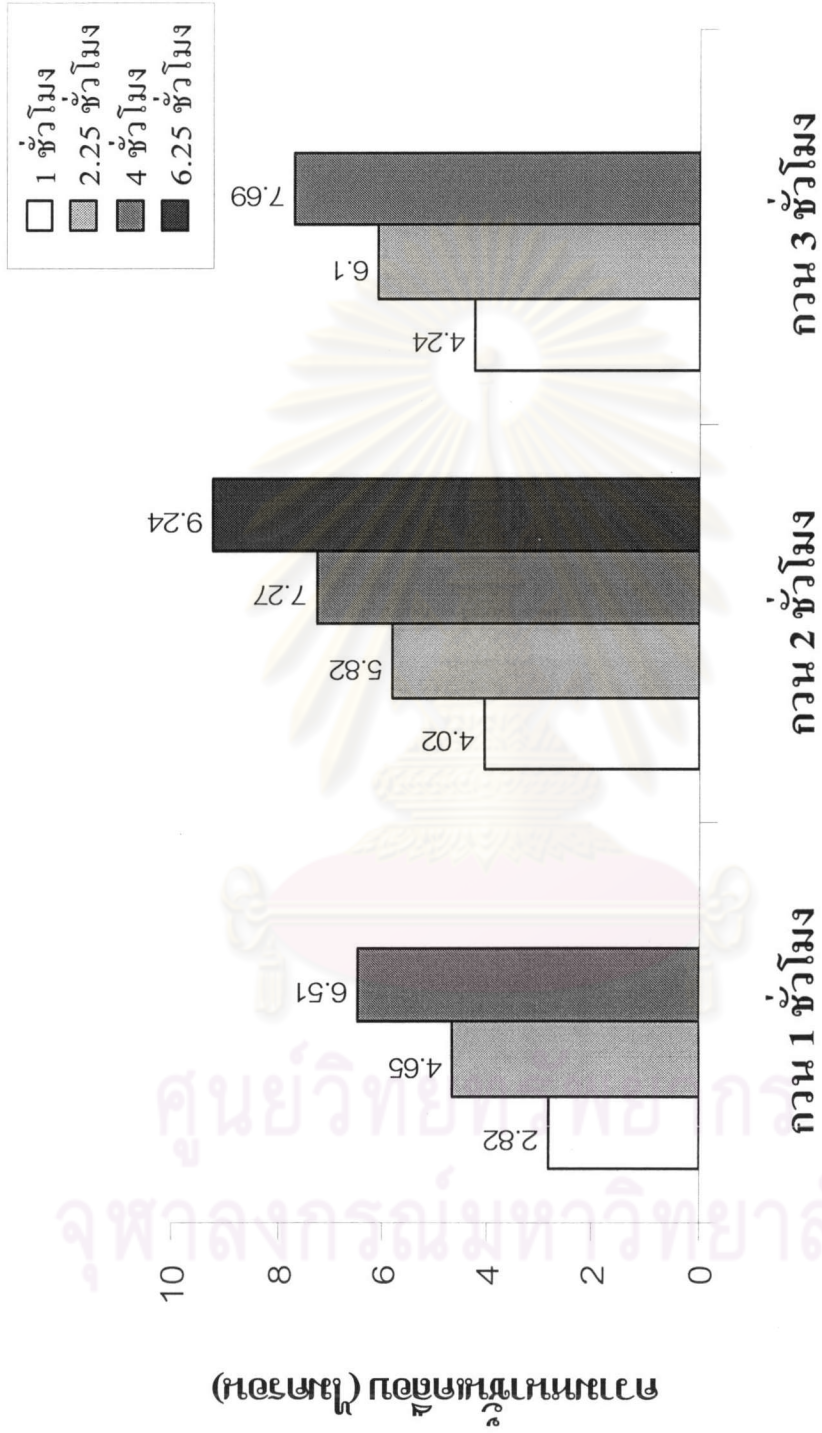
การเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม เฟอร์โรวาเนเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นสารฟอร์มคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1000°C แล้วทำการกวน หรือ แช่ ตามเวลาที่กำหนด จึงทำการเคลือบผิวเป็นเวลา 1 ถึง 4 ชั่วโมง โดยใช้ อะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นรีดิวเซอร์ มีผลการทดลองการเคลือบผิวดังนี้

#### 4.1.1 อิทธิพลของเวลาการกวนเฟอร์โรวาเนเดียมต่อชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์

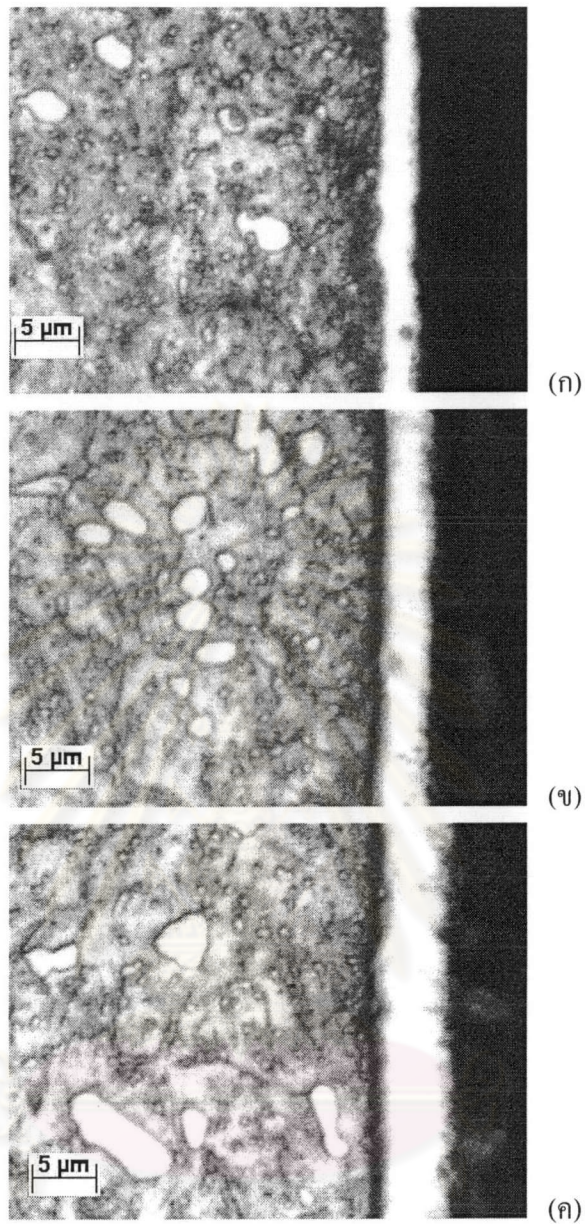
จากผลของความหนาชั้นเคลือบในรูปที่ 4.1 พบว่าที่ทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวาเนเดียมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิวเซอร์ ทำให้เกิดชั้นเคลือบที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาการเคลือบผิว 1 ถึง 4 ชั่วโมง โดยที่เวลาการเคลือบผิว 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 2.82, 4.65 และ 6.51 ไมครอนตามลำดับ รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิว จะเห็นว่าชั้นเคลือบ แตกต่างจากเนื้อชิ้นงานอย่างชัดเจนสามารถเห็นรอยต่อของชั้นเคลือบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา และชั้นเคลือบมีความหนาขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น

กรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวาเนเดียมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิวเซอร์ พบว่าที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 4.02, 5.82, 7.27 และ 9.24 ไมครอนตามลำดับ พบว่าความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ชั้นเคลือบที่พบมีลักษณะเดียวกันกับ กรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวาเนเดียมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่มีความหนามากขึ้น

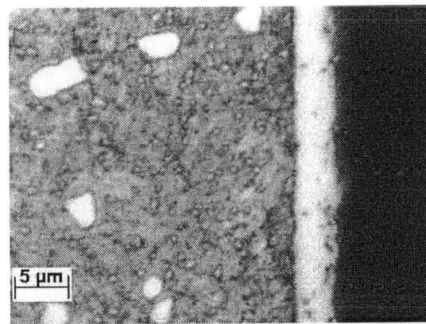
กรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวาเนเดียมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิวเซอร์ พบว่าที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 4.24, 6.10 และ 7.69 ไมครอนตามลำดับ พบว่าความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ชั้นเคลือบที่พบมีลักษณะเดียวกันกับ กรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวาเนเดียมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่มีความหนาเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย



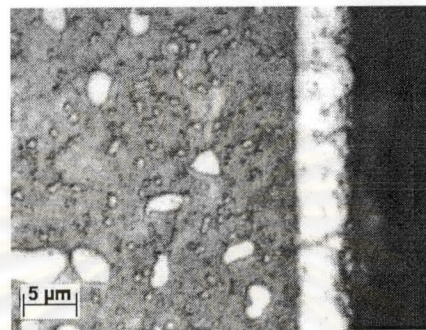
รูปที่ 4.1 ผลของความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือ บอแรกซ์ที่ ทำการกวน เป็นเวลา 1 ถึง 3 ชั่วโมง



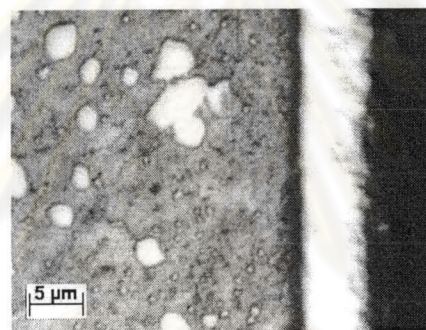
รูปที่ 4.2 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานของเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% และ Al 1% โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25 และ (ค) 4 ชั่วโมง



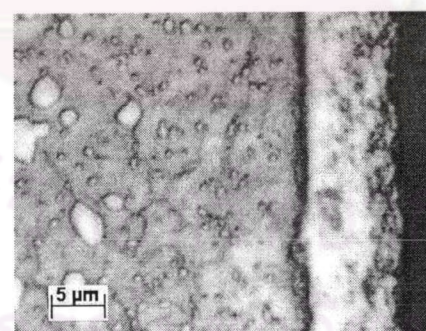
(ก)



(ข)

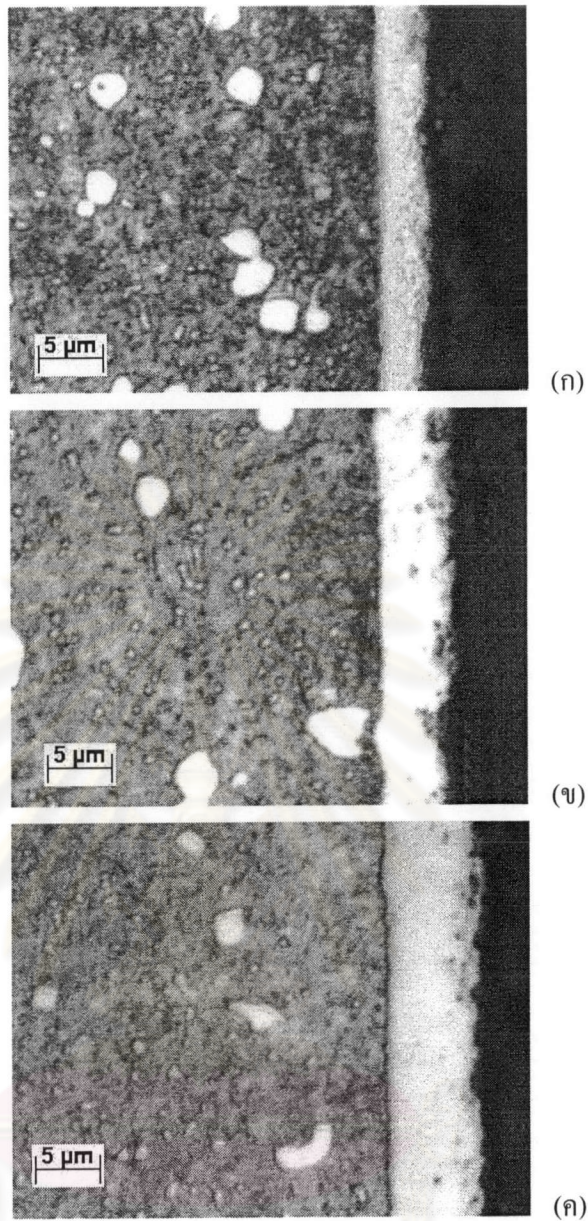


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.3 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานของเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% และ Al 1% โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25, (ค) 4 และ (ง) 6.25 ชั่วโมง

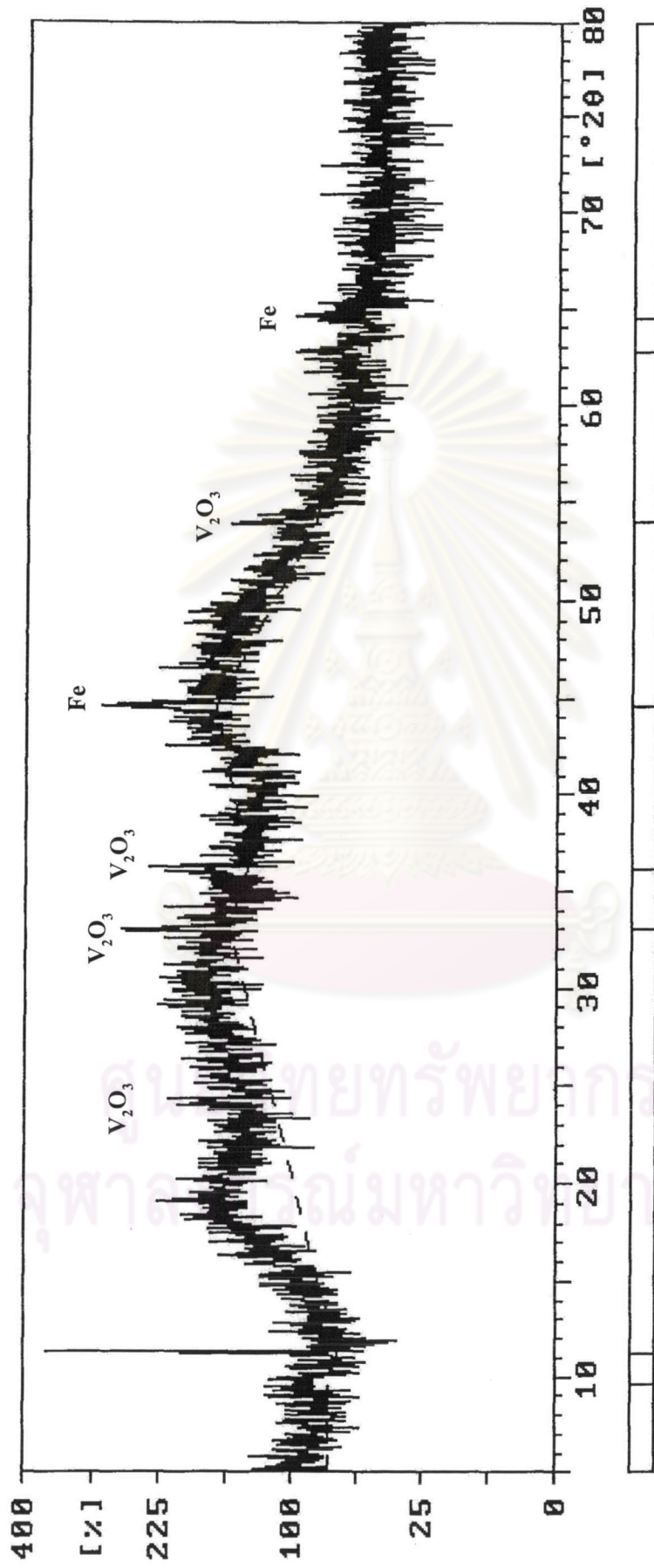


รูปที่ 4.4 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานของเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% และ Al 1% โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25 และ (ค) 4 ชั่วโมง

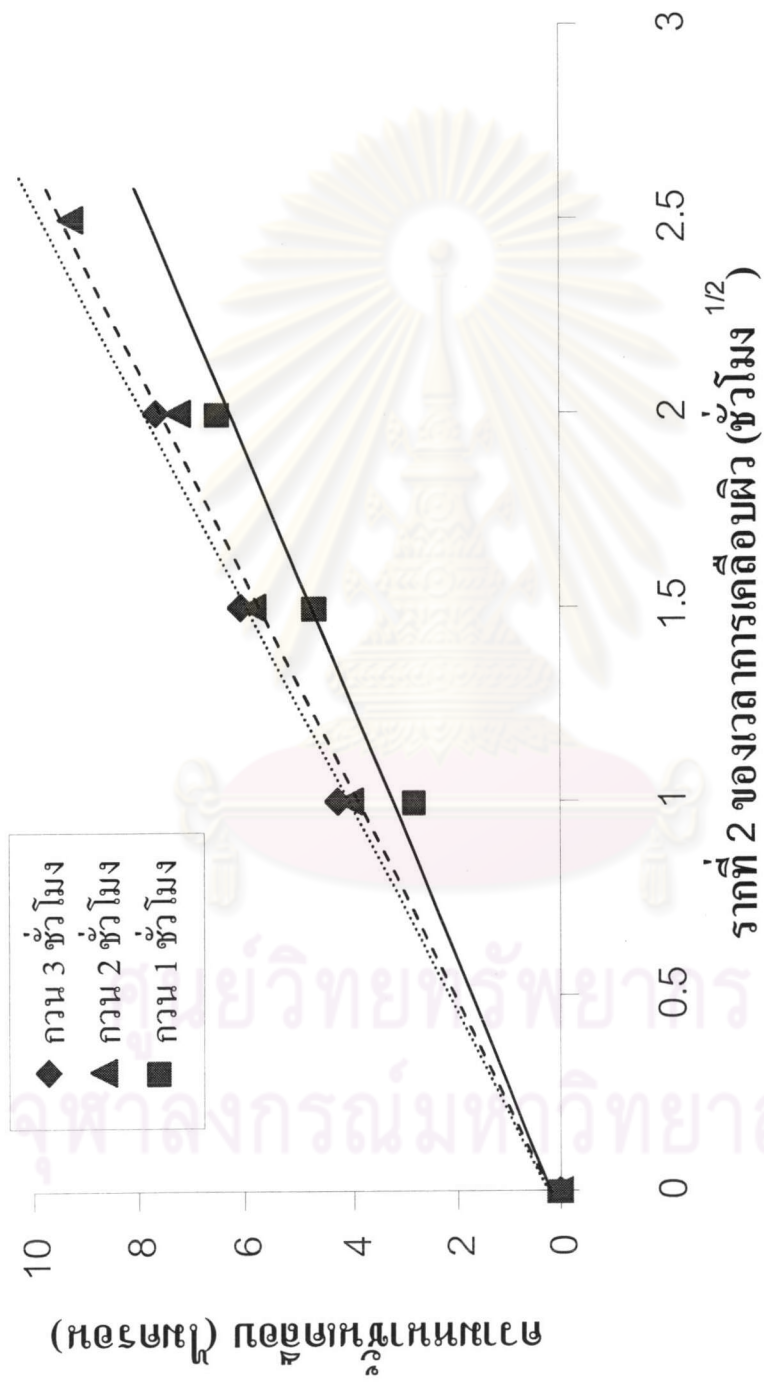
เมื่อวิเคราะห์บอแรกซ์ที่ผ่านการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยไม่มีการเติม อะลูมิเนียมด้วยวิธี XRD ได้ผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.5 พบว่ามีสเปกตรัมเกิดขึ้นที่มุม  $33.0^{\circ}$ ,  $36.1^{\circ}$  และ  $53.9^{\circ}$  ซึ่งเป็นค่าสเปกตรัมของวานาเดียมไตรออกไซด์ และขณะเดียวกันพบสเปกตรัมของเหล็กซึ่งเกิดขึ้นที่มุม  $44.6^{\circ}$  และ  $64.5^{\circ}$  ซึ่งเหล็กที่พบน่าจะมาจาก เฟอร์โรวานาเดียมที่เติมลงไป จากผลการวิเคราะห์ XRD สามารถสรุปได้ว่า การกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถพบวานาเดียมออกไซด์ ในรูปวานาเดียมไตรออกไซด์ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำที่พร้อมจะทำให้เกิดชั้นเคลือบได้

กล่าวได้ว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม มีส่วนสำคัญในการเร่งการเกิดกระบวนการออกซิเดชันของวานาเดียม จากเฟอร์โรวานาเดียม ไปเป็นวานาเดียมออกไซด์ ทั้งนี้เป็นเพราะวานาเดียมจากเฟอร์โรวานาเดียมที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ไม่ได้ละลายในรูปอะตอมวานาเดียมอิสระโดยตรงแต่ละลายอยู่ในรูปของวานาเดียมออกไซด์ ซึ่งมีอยู่ 2 รูป คือ วานาเดียมเพนตอกไซด์ (vanadium pentoxide,  $V_2O_5$ ) เป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง มีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ  $-124$  กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของวานาเดียม และ (vanadium trioxide,  $V_2O_3$ ) เป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ มีพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ  $-109$  กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของวานาเดียม แต่การที่จะเกิดชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ได้นั้นวานาเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลวจะต้องอยู่ในรูป วานาเดียมไตรออกไซด์ หรือวานาเดียมอิสระ (nascent V) ก่อนจึงจะรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กได้ (5)

รูปที่ 4.6 แสดงการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวนานขึ้นทำให้ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้นในทุก ๆ ช่วงเวลาการเคลือบผิว จะเห็นว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 2 ชั่วโมงความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นกว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 1 ชั่วโมงเนื่องมาจากการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 2 ชั่วโมงทำให้วานาเดียมจากเฟอร์โรวานาเดียมเกิดการออกซิเดชันเป็นวานาเดียมออกไซด์ได้มากขึ้นทำให้ในบอแรกซ์หลอมเหลวมีวานาเดียมออกไซด์ที่พร้อมจะนำไปเกิดชั้นเคลือบมากขึ้น แต่การกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 3 ชั่วโมงความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นกว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 2 ชั่วโมงเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เกิดการออกซิเดชันมากเกินไปทำให้เป็นการเพิ่มวานาเดียมออกไซด์ที่ละลายอยู่ในบอแรกซ์หลอมเหลวในรูป  $V_2O_5$  มากกว่า เพิ่มวานาเดียมออกไซด์ในรูป  $V_2O_3$  จึงทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้นจากการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 2 ชั่วโมงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบพีค XRD ของบอแรกซ์ที่ผ่านการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่เติมเฟอร์โรวานเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 1000°C



รากที่ 2 ของเวลาการเคือบผิว (ชั่วโมง)<sup>1/2</sup>

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคือบผิว และความหนาแน่นเคือบของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคือบผิวโดยกวาน Fe-V 15 % ในบอแรกซ์ไหลอมเหลว 1, 2 และ 3 ชั่วโมง และเติม Al 1 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1000°C



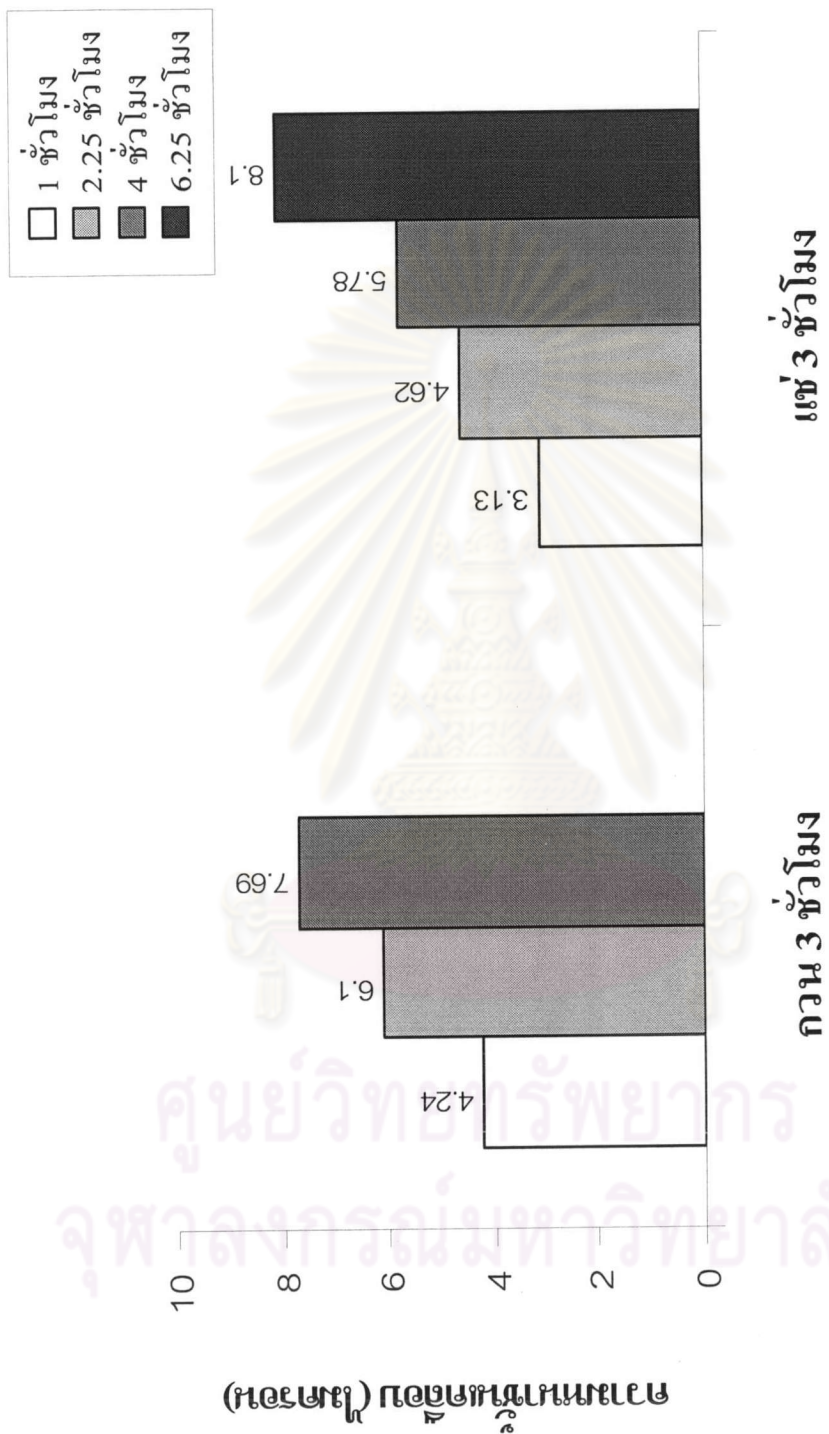
#### 4.1.2 อิทธิพลของการกวน และการแช่เฟอร์โรวานเดียมต่อชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์

ผลของความหนาชั้นเคลือบในรูปที่ 4.7 พบว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเดียมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิเวเซอร์ พบว่าที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 4.24, 6.10 และ 7.69 ไมครอนตามลำดับ รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิว จะเห็นว่าชั้นเคลือบ แตกต่างจากเนื้อชิ้นงานอย่างชัดเจนสามารถเห็นรอยต่อของชั้นเคลือบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา และชั้นเคลือบมีความหนาขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น

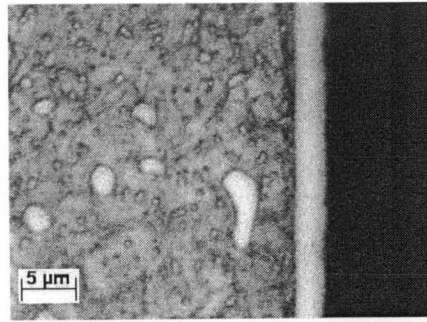
กรณีการแช่บอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเดียมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิเวเซอร์ พบว่าที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมงได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 3.13, 4.62, 5.78 และ 8.10 ไมครอนตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าชั้นเคลือบมีลักษณะเดียวกันกับโครงสร้างจุลภาคที่ทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แต่มีความหนาชั้นเคลือบน้อยกว่า

รูปที่ 4.9 พบว่าที่เวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากันคือ กวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบมากกว่าการแช่บอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในทุก ๆ เวลาการเคลือบผิว เนื่องจากผงเฟอร์โรวานเดียมมีความหนาแน่นสูงกว่าบอแรกซ์หลอมเหลวจึงจมอยู่บนพื้นเบ้าทำให้อัตราการออกซิเดชันต่ำ แต่การกวนบอแรกซ์หลอมเหลวทำให้ผงเฟอร์โรวานเดียมฟุ้งกระจายทั่วทั้งเบ้าจึงทำให้อัตราการออกซิเดชันสูงกว่าการแช่ผงเฟอร์โรวานเดียมไว้ในบอแรกซ์หลอมเหลวเลย ๆ ดังนั้นการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 3 ชั่วโมงจึงมีปริมาณ วานเดียมออกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำให้เกิดชั้นเคลือบสูงกว่าการแช่บอแรกซ์หลอมเหลว 3 ชั่วโมง ทำให้ได้ความหนาชั้นเคลือบที่มากกว่าด้วย

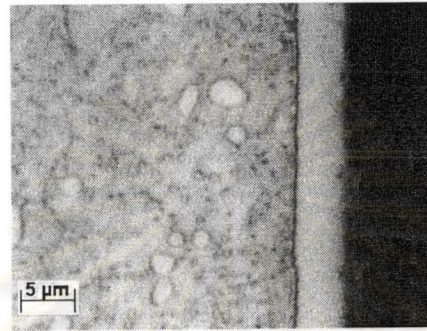
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



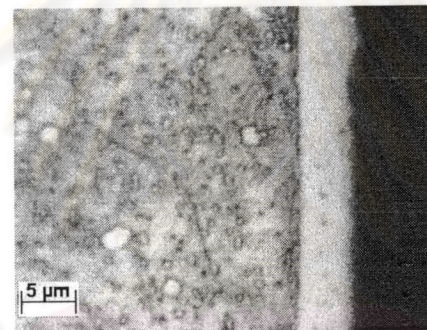
รูปที่ 4.7 ผลของความหนาแน่นเชื้อแบคทีเรียคาร์โบไนด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ ทำการกวน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือ แช่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



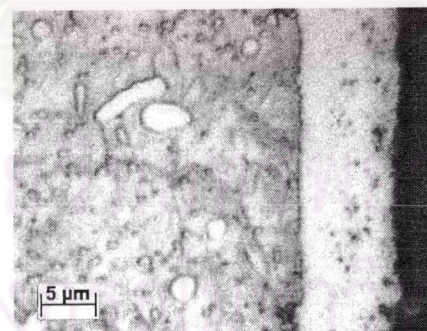
(ก)



(ข)

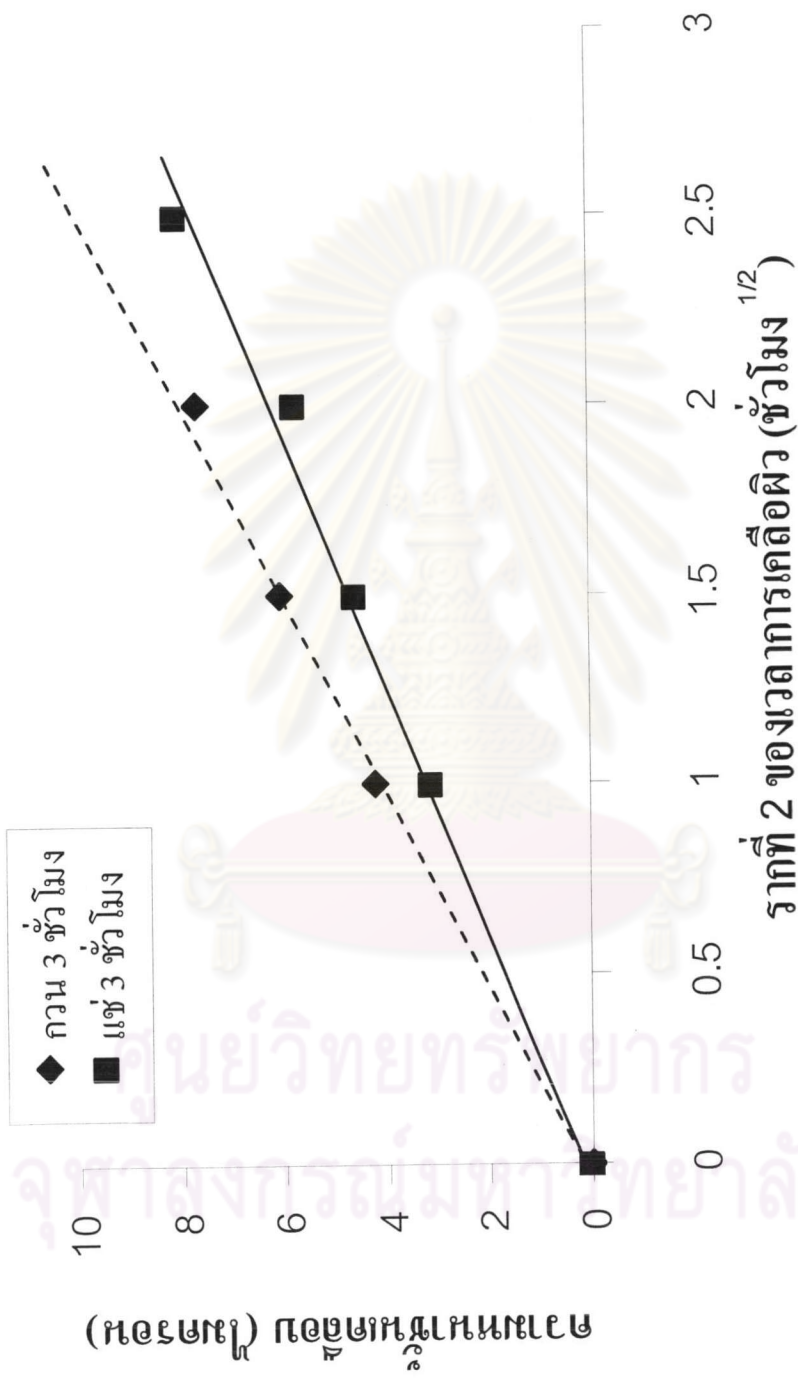


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.8 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานของเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% และ Al 1% โดยน้ำหนัก ทำการแช่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25, (ค) 4 และ (ง) 6.25 ชั่วโมง



รากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิว (ชั่วโมง<sup>1/2</sup>)

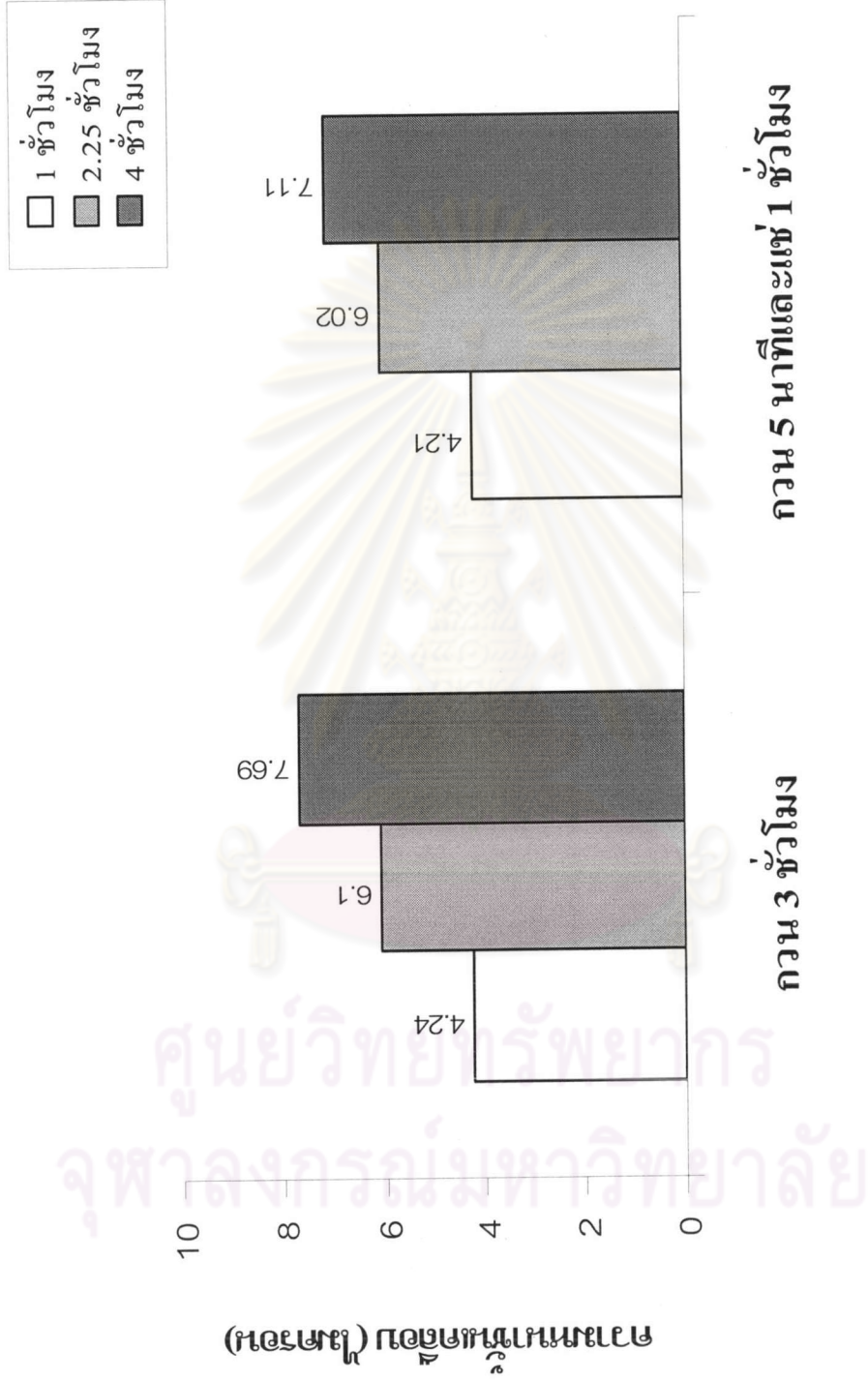
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิว และความหนาชั้นเคลือบของเหล็กกล้าอ D2 ที่ทำการเคลือบผิวโดย กวาน หรือ แซ่ Fe-V 15% ในบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเติม Al 1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1000°C

#### 4.1.3 อิทธิพลของการกวนร่วมกับการแช่เฟอร์โรวานเดียมต่อชั้นเคลือบ วานเดียมคาร์ไบด์

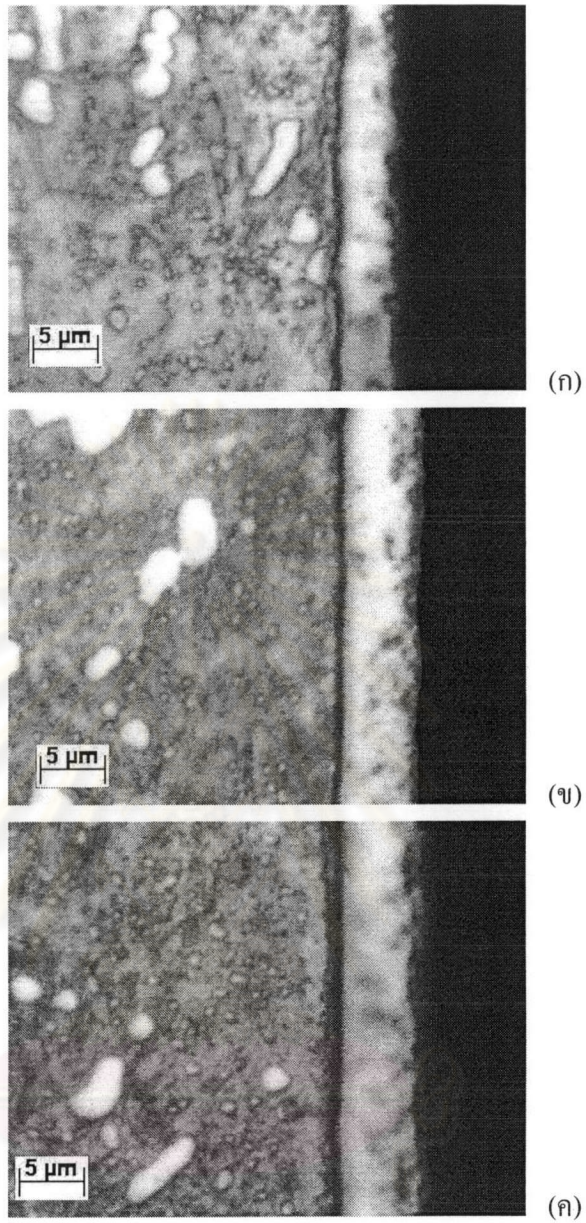
ผลของความหนาชั้นเคลือบในรูปที่ 4.10 พบว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเดียมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิวเซอร์ ที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 4.24, 6.10 และ 7.69 ไมครอนตามลำดับ พบว่าความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิว จะเห็นว่าชั้นเคลือบ แตกต่างจากเนื้อชิ้นงานอย่างชัดเจนสามารถเห็นรอยต่อของชั้นเคลือบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา และชั้นเคลือบมีความหนาขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น

กรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเดียมเป็นเวลา 5 นาที และ แช่บอแรกซ์หลอมเหลวต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิวเซอร์ พบว่าที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 4.21, 6.02 และ 7.11 ไมครอนตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าชั้นเคลือบมีลักษณะเดียวกันกับโครงสร้างจุลภาคที่ทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

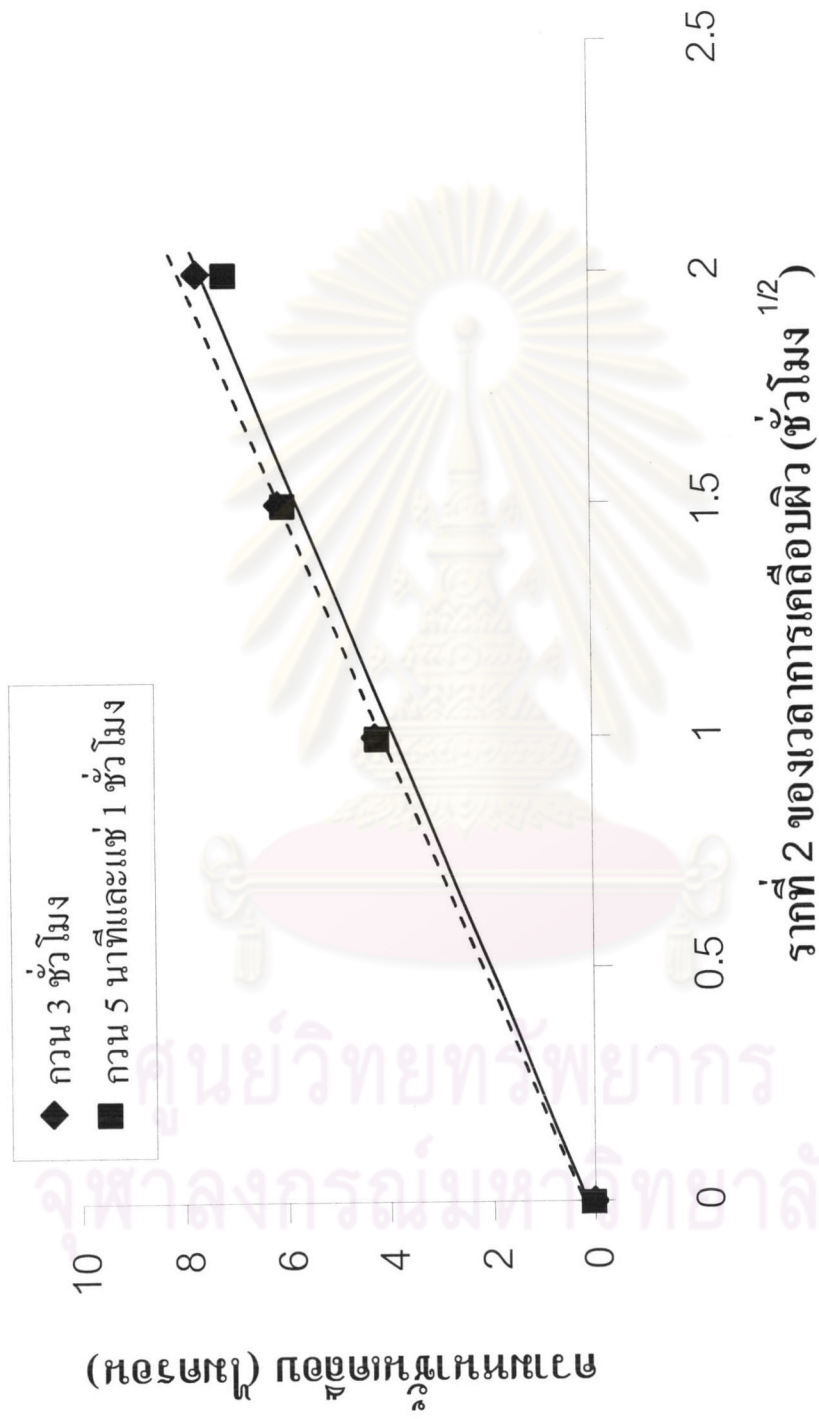
รูปที่ 4.12 แสดงการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 5 นาทีและแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบใกล้เคียงกันกับการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่เวลาการเคลือบ 1 และ 2.25 ชั่วโมง แต่ที่เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง กวนบอแรกซ์หลอมเหลว 5 นาทีและแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบน้อยกว่า ที่การกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากว่า การกวนบอแรกซ์หลอมเหลวเป็นการเร่งกระบวนการออกซิเดชัน ทำให้ถ้าทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวมากเกินไปจะเกิดวานเดียมออกไซด์ ในรูป  $V_2O_5$  มากกว่าในรูป  $V_2O_3$  ซึ่งออกไซด์ในรูป  $V_2O_5$  ต้องถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูป  $V_2O_3$  หรือ วานเดียมอิสระก่อน จึงจะสามารถรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนกลายเป็นชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ได้ แต่การกวนบอแรกซ์หลอมเหลว 5 นาทีและแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นการกวนให้เฟอร์โรวานเดียมฟุ้งในบอแรกซ์หลอมเหลวแล้วแช่ไว้ให้ค่อยๆ เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นวานเดียมออกไซด์ที่ได้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป  $V_2O_3$  ซึ่งสามารถรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนเป็นชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ได้เลย จึงได้ความหนาชั้นเคลือบ ใกล้เคียงกันกับการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวถึง 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 ผลของควาามหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ ทำการกวน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือ กวน 5 นาทีและเซ้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชั้นงานของเหล็กกล้าทำงานเย็น D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% และ Al 1% โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 5 นาทีแล้วแช่ต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25 และ (ค) 4 ชั่วโมง



รากที่ 2 ของเวลาการเคือบผิว (ชั่วโมง<sup>1/2</sup>)

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคือบผิว และความหนาแน่นเคลือบของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคือบผิวโดยกวน Fe-V 15% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือ กวน 5 นาทีและแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบอแรกซ์ไหลอมเหลว และเติม Al 1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1000°C

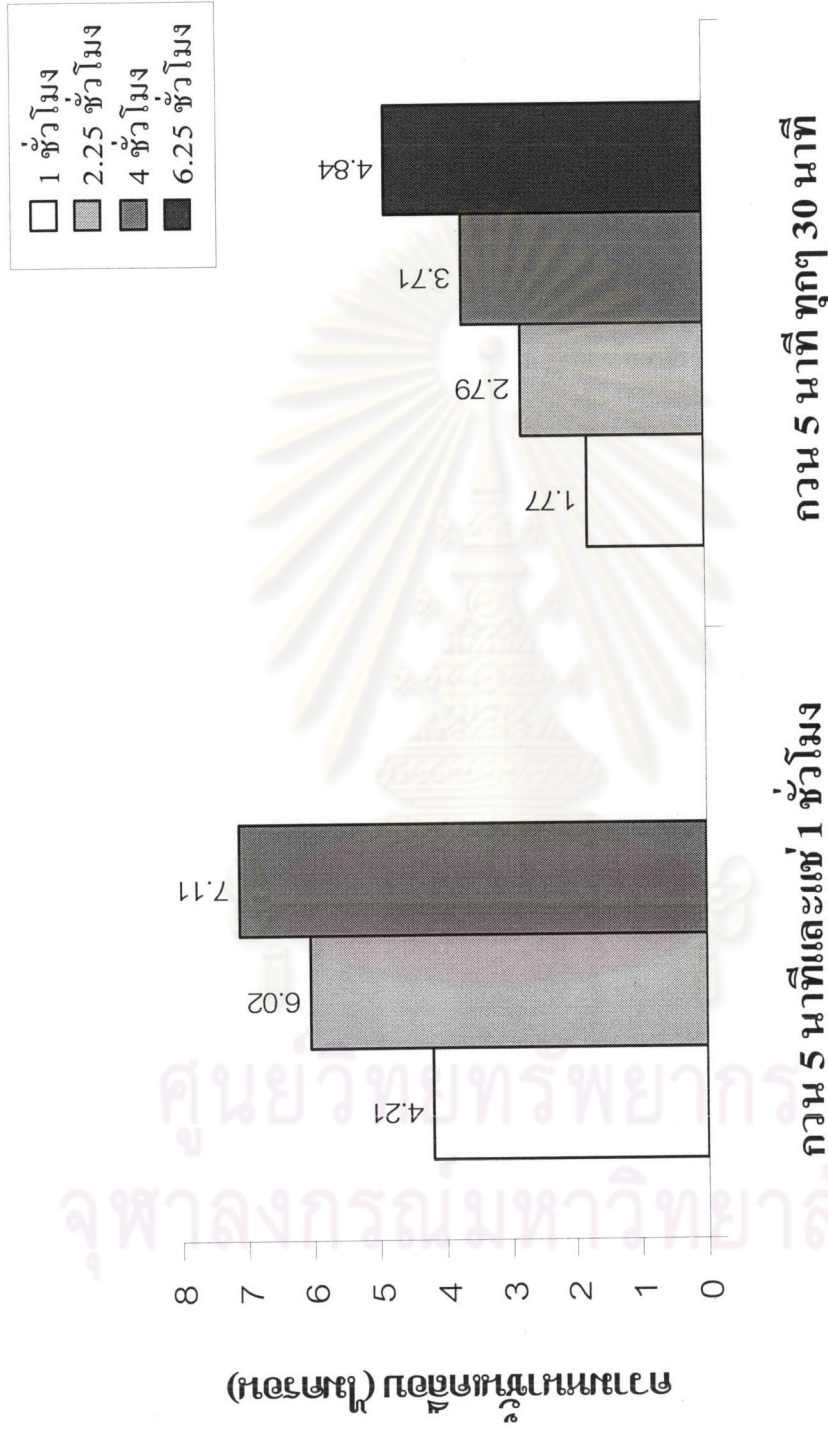


#### 4.1.4 อิทธิพลของการกวนร่วมกับการแช่ และการกวนเฟอร์โรวานเดียมเป็นระยะๆต่อชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์

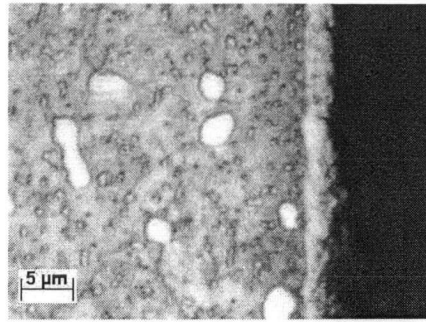
จากผลของความหนาชั้นเคลือบในรูปที่ 4.13 พบว่ากรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเดียมเป็นเวลา 5 นาที และ แช่บอแรกซ์หลอมเหลวต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นรีดิวเซอร์ พบว่าที่เวลาการเคลือบ 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมงได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 4.21, 6.02 และ 7.11 ไมครอนตามลำดับรูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิว จะเห็นว่าชั้นเคลือบ แยกจากเนื้อชิ้นงานอย่างชัดเจนสามารถเห็นรอยต่อของชั้นเคลือบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา และชั้นเคลือบมีความหนาขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น

กรณีการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานเดียมเป็นเวลา 5 นาที ทุกๆ 30 นาที ตลอดช่วงเวลาการเคลือบ 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมงได้ความหนาชั้นเคลือบเท่ากับ 1.77, 2.79, 3.71 และ 4.84 ไมครอนตามลำดับ รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นเคลือบที่ผ่านการเคลือบผิวชิ้นงานอย่างชัดเจนสามารถเห็นรอยต่อของชั้นเคลือบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา ชั้นเคลือบมีความหนาขึ้นตามเวลาการเคลือบที่มากขึ้น แต่ชั้นเคลือบไม่เรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

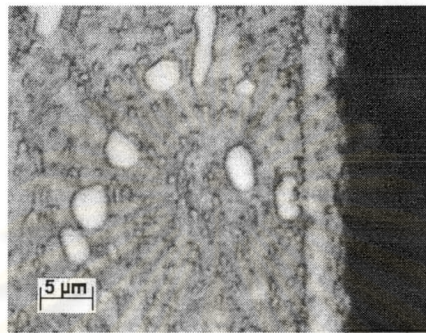
จากรูปที่ 4.15 พบว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว เป็นเวลา 5 นาทีและแช่ 1 ชั่วโมงได้ความหนาชั้นเคลือบ มากกว่า การกวนบอแรกซ์หลอมเหลว เป็นเวลา 5 นาทีทุกๆ 30 นาที ในทุกๆเวลาการเคลือบผิวอย่างมาก เนื่องจาก ที่การกวนบอแรกซ์หลอมเหลว เป็นเวลา 5 นาทีและแช่ 1 ชั่วโมง ทำให้วานเดียมที่ละลายอยู่ในบอแรกซ์หลอมเหลวอยู่ในรูป  $V_2O_3$  เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนในเนื้อเหล็กได้เลยจึงมีความหนาชั้นเคลือบที่มากกว่าการกวนบอแรกซ์หลอมเหลว เป็นเวลา 5 นาทีทุก 30 นาที ซึ่งเป็นการเร่งกระบวนการออกซิเดชันอย่างมากทำให้ วานเดียมออกไซด์ ที่ละลายอยู่ในบอแรกซ์หลอมเหลวอยู่ในรูป  $V_2O_5$  มากกว่ารูป  $V_2O_3$  จึงให้ความหนาชั้นเคลือบน้อยกว่า และ การกวนเป็นเวลา 5 นาทีทุก 30 นาทีนี้ เป็นการกวนขณะจุ่มชิ้นงานในบอแรกซ์หลอมเหลว ซึ่งอาจจะเป็นการรบกวนกระบวนการเคลือบได้ทำให้ความหนาชั้นเคลือบน้อย และ ผิวชั้นเคลือบไม่เรียบ



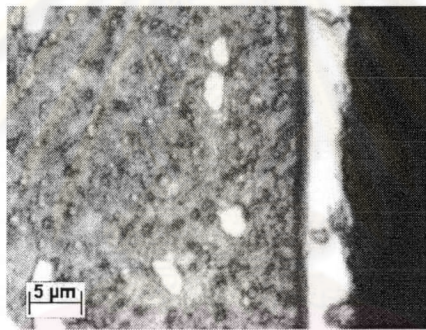
รูปที่ 4.13 ผลของความหนาแน่นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ทำการ กวน 5 นาทีและแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือ กวน 5 นาทีทุกๆ 30 นาที



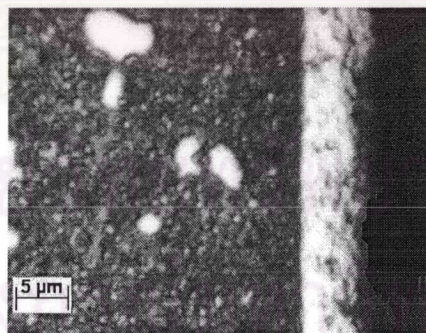
(ก)



(ข)

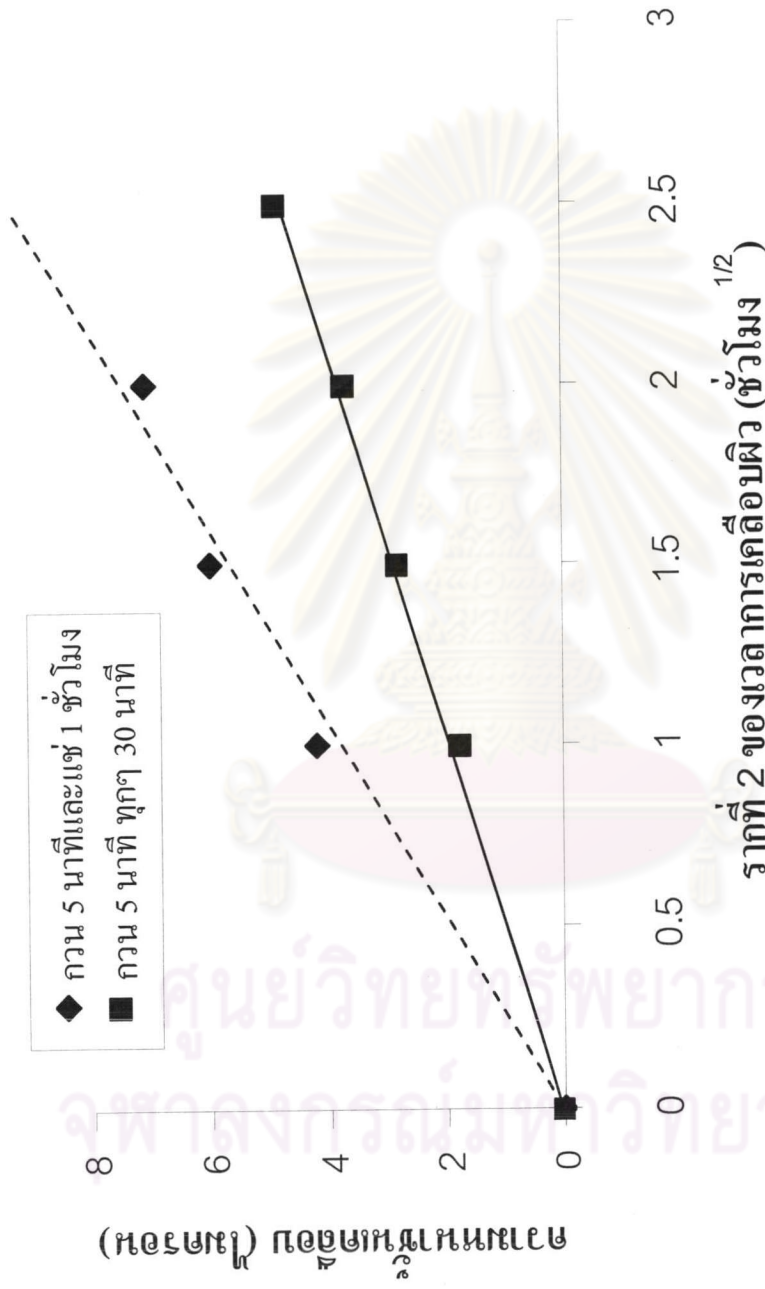


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.14 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานของเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% และ Al 1% โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 5 นาทีทุก 30 นาที และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25, (ค) 4 และ (ง) 6.25 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิว และความหนาชั้นเคลือบของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวโดยกวน Fe-V 15% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 5 นาทีและแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือ กวน Fe-V 5 นาทีทุกๆ 30 นาที ในบอแรกซ์ที่ลอมเหลว และเติม Al 1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1000°C

#### 4.2 อิทธิพลของเวลาการเคลือบต่อชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง แล้วเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเคลือบผิว  $1000^{\circ}\text{C}$  ทำการเคลือบตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั่วโมงพบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ทำการแช่บอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเคลือบผิว  $1000^{\circ}\text{C}$  ทำการเคลือบตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั่วโมงพบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 5 นาทีและแช่ 1 ชั่วโมง แล้วเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเคลือบผิว  $1000^{\circ}\text{C}$  ทำการเคลือบตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั่วโมงพบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.20

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่ทำการกวนบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรวานาเดียม 15 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 5 นาทีทุกๆ 30 นาที ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว  $1000^{\circ}\text{C}$  ทำการเคลือบตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั่วโมงพบว่าความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.21

ความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ที่วัดได้จากการทดลองนี้เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบที่เพิ่มมากขึ้น และยังเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในภาคผนวกรูปที่ ข.1 ถึง ข.6 แสดงว่าการเพิ่มความหนาของชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์เป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ซึม (diffusion control) โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) จากการทดลองได้จากการคำนวณค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง ความหนาชั้นเคลือบกับรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบ ในรูปที่ ข.1 ถึง ข.6

$$\text{จากสมการ } K = d^2/t$$

$$K^{1/2} = d/t^{1/2} = \text{ความชันของกราฟ}$$

$$K = (\text{ความชันของกราฟ})^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลองการเคลือบผิวด้วยวานเนเดียมคาร์ไบด์ แสดงในตารางที่ 4.1

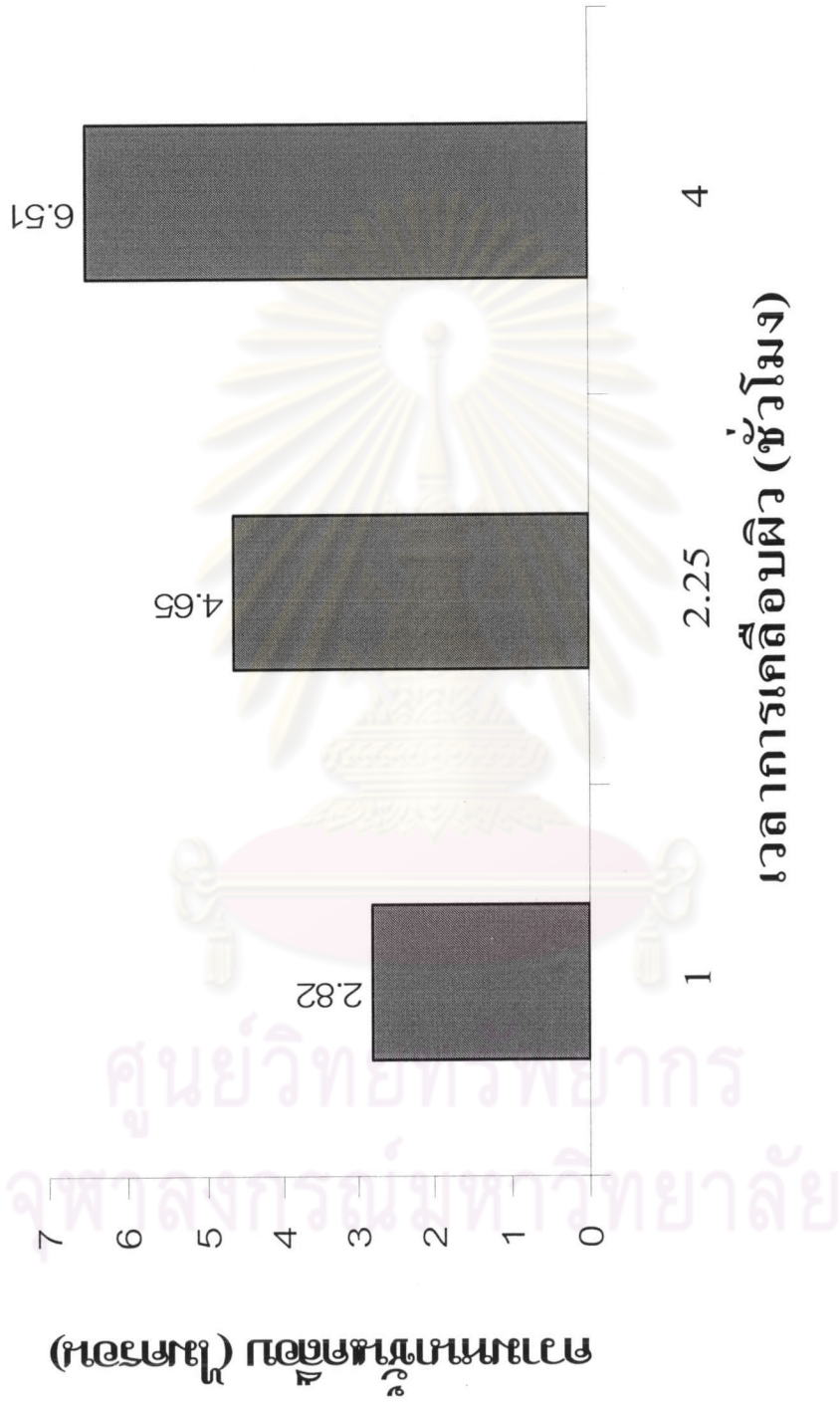
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K) ที่ได้จากการทดลอง

เวลาที่ทำการกวน หรือ แช่	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (K), $\text{cm}^2/\text{sec} \times 10^7$
กวน 1 ชั่วโมง	0.990
กวน 2 ชั่วโมง	1.393
กวน 3 ชั่วโมง	1.575
แช่ 3 ชั่วโมง	0.962
กวน 5 นาที แช่ 1 ชั่วโมง	1.322
กวน 5 นาที ทุก 30 นาที	0.356

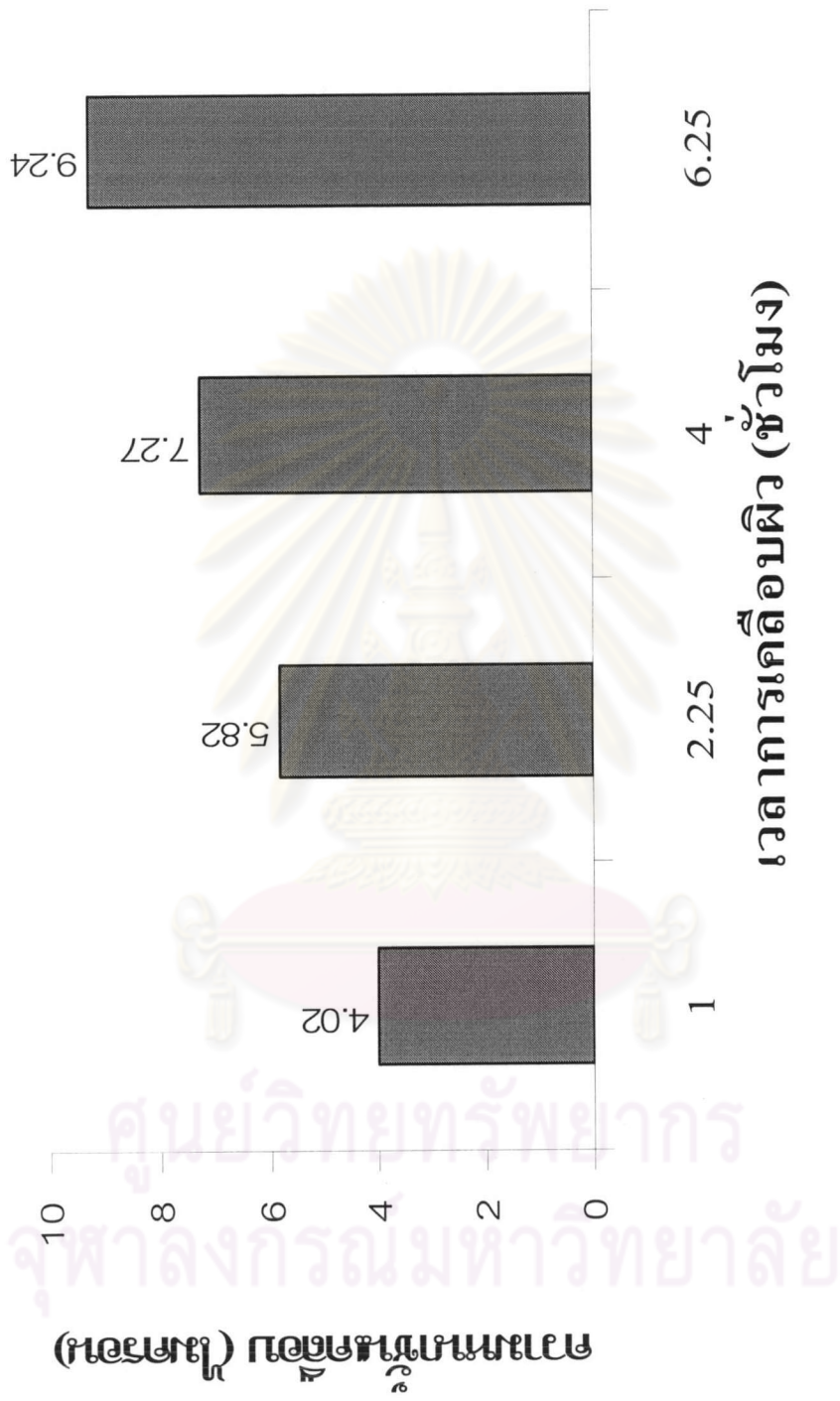
#### 4.3 อิทธิพลของการเติมรีดิวเซอร์ต่อชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น D2 ที่ทำการกวนเฟอร์โรวานเนเดียมในบอแรกซ์หลอมเหลว 4 ชั่วโมง โดยไม่ทำการเติมอะลูมิเนียมเป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ไม่พบชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ทุกเวลาการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.22

การเติมรีดิวเซอร์ในกระบวนการเคลือบนั้นเป็นการช่วยรีดิวซ์ออกซิเจนจากวานเนเดียมออกไซด์ในรูป  $\text{V}_2\text{O}_5$  ให้อยู่ในรูป  $\text{V}_2\text{O}_3$  ซึ่งทำให้วานเนเดียมในวานเนเดียมออกไซด์สามารถรวมตัวกับคาร์บอนในเนื้อเหล็กกลายเป็นวานเนเดียมคาร์ไบด์ได้ ดังนั้นการเติม อะลูมิเนียมในการทดลองนี้จึงเป็นการช่วยทำให้เกิดชั้นเคลือบวานเนเดียมคาร์ไบด์ได้ดีขึ้น

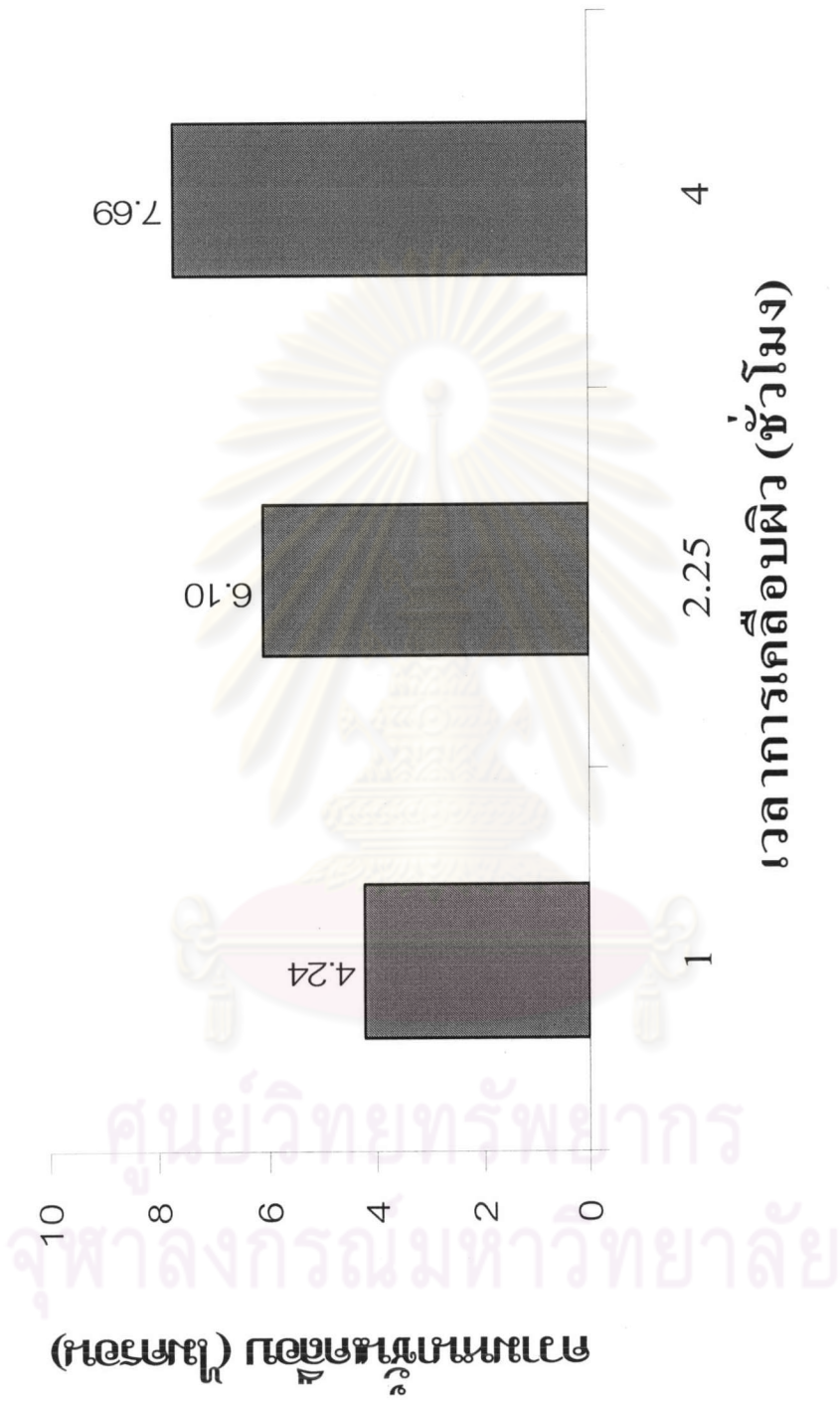


รูปที่ 4.16 ผลของความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกซ์ที่ ทำการกวานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

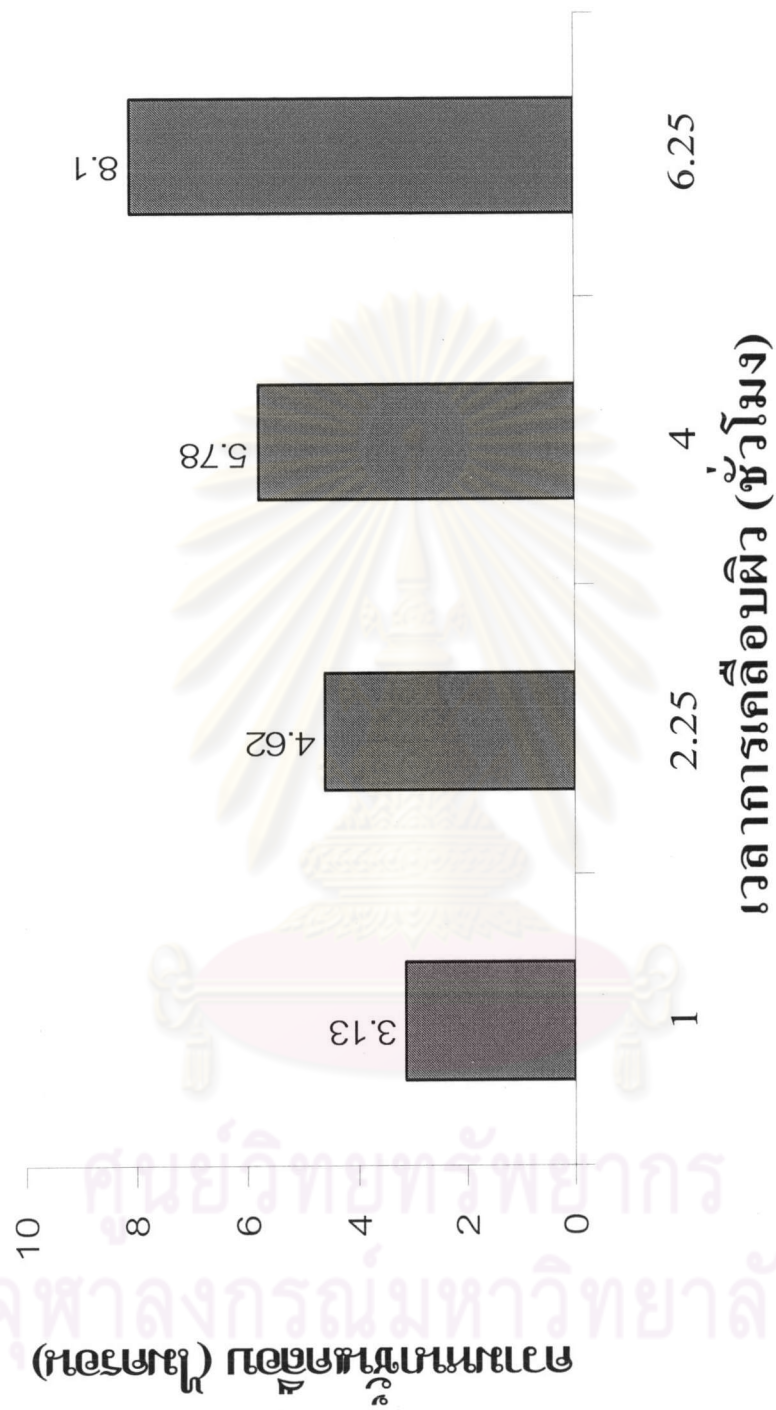


รูปที่ 4.17 ผลของความหนาชั้นเคลือบวานเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกที่ ทำการกวานเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

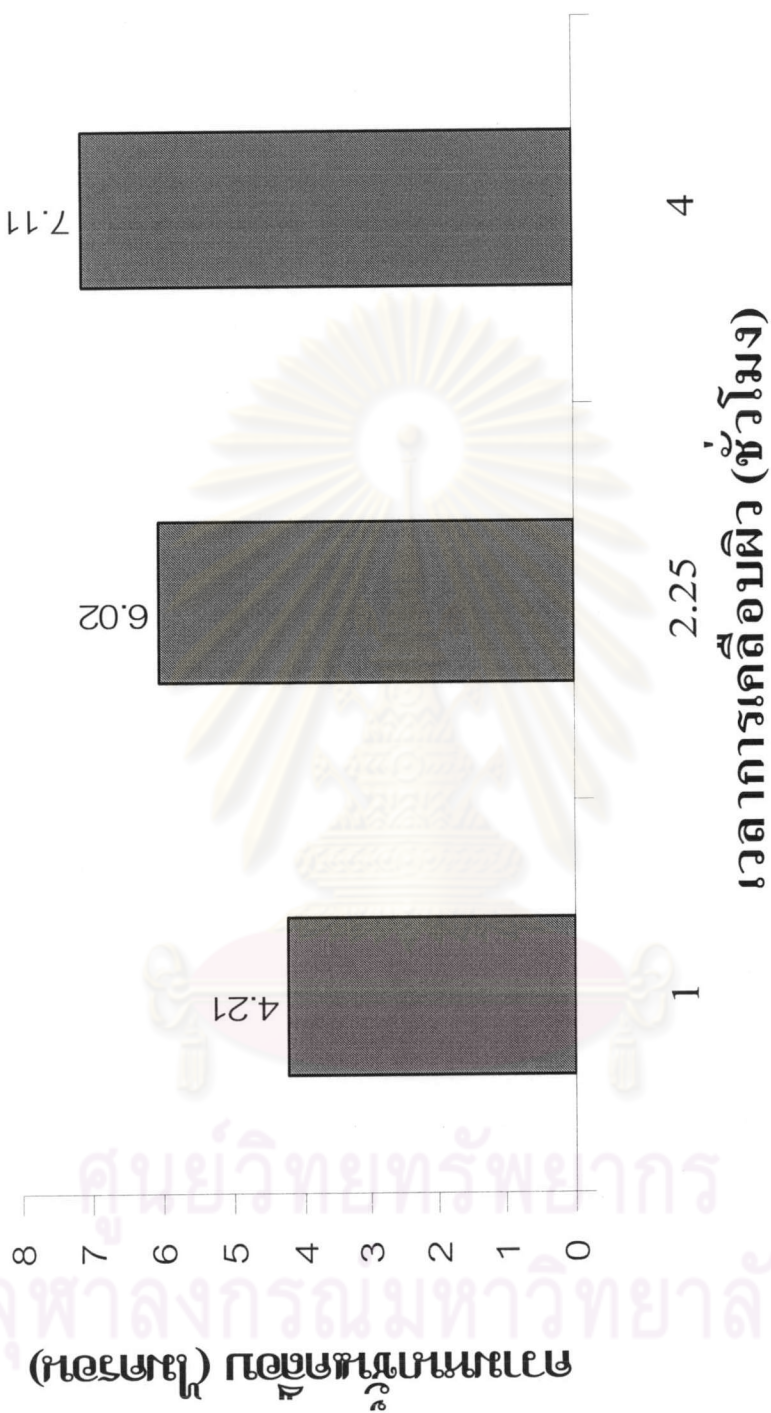




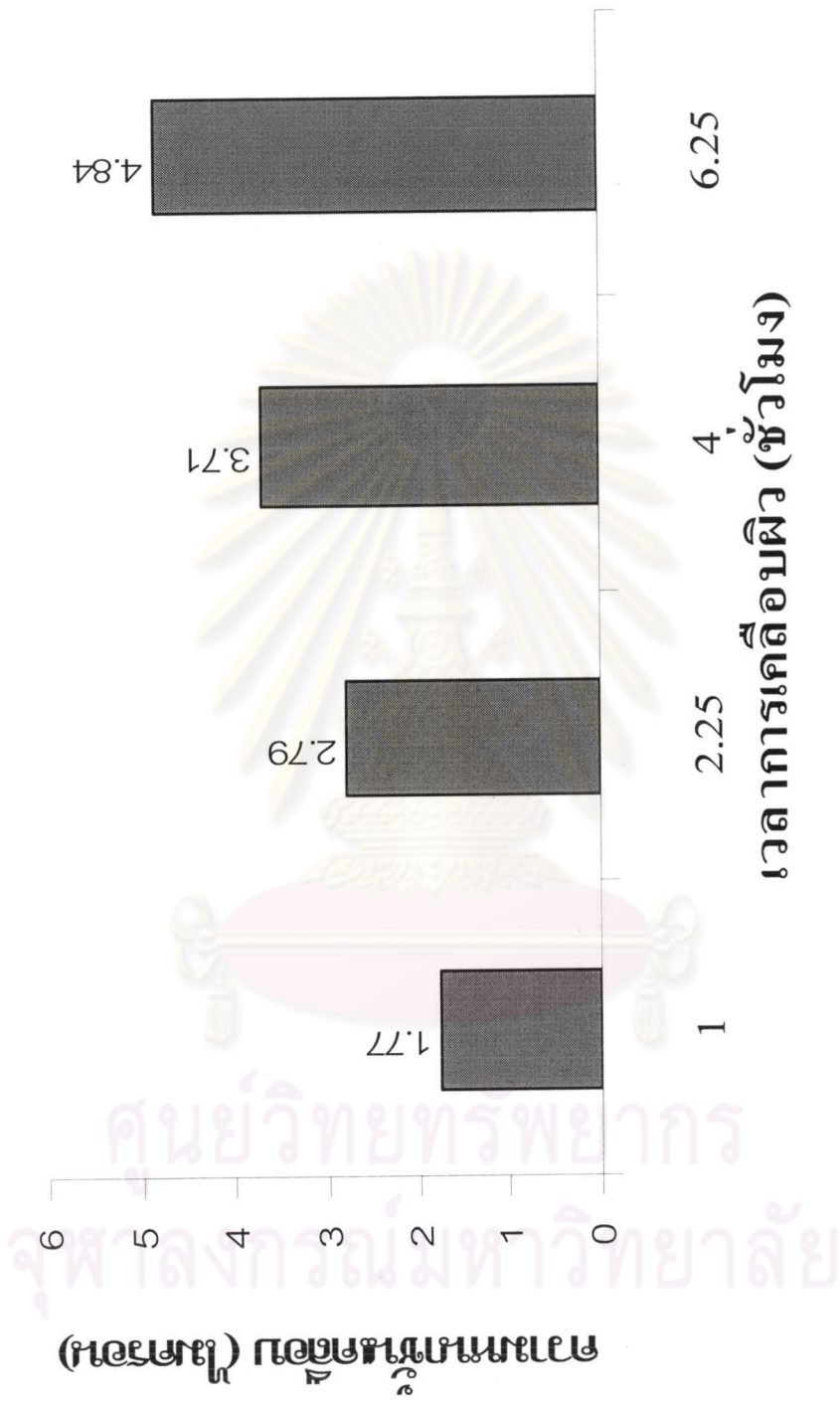
รูปที่ 4.18 ผลของความหนาชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกซ์ที่ ทำการวางเป็นเวลา 3 ชั่วโมง



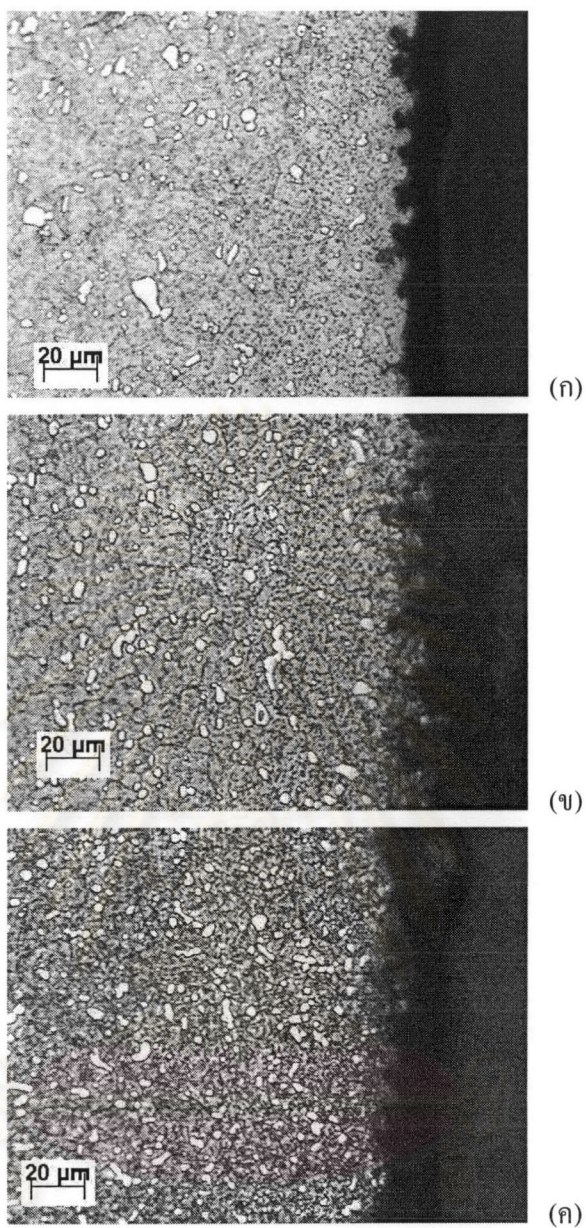
รูปที่ 4.19 ผลของความหนาแน่นของโปรตีนใน D2 ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกที่ทำการแช่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 ผลของความหนาชั้นเคลือบวานาเดียมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกที่ทำการงานเป็นเวลา 5 นาทีและเท่า 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 ผลของความหนาแน่นเชื้อบวามเดิมคาร์ไบด์ ของเหล็กกล้า D2 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเคลือบอบแรกๆที่ ทำการกวน เป็นเวลา 5 นาทีทุกๆ 30 นาที



รูปที่ 4.22 รูปโครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางของผิวชิ้นงานของเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติม Fe-V 15% โดยน้ำหนัก ทำการกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 2.25 และ (ค) 4 ชั่วโมง