บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

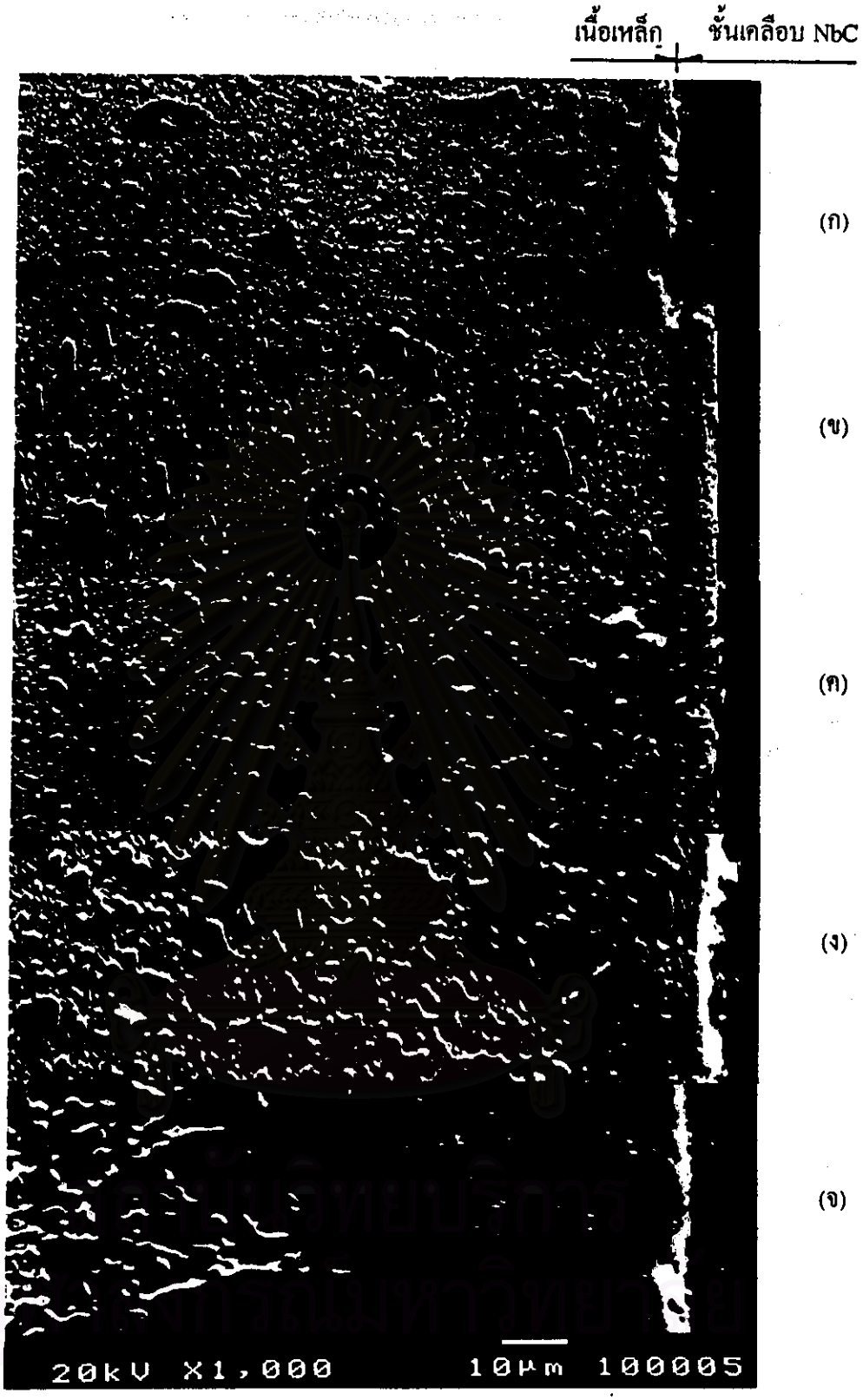
4.1 อิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลาที่ใช้เคลือบผิวในช่วง 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยเติมอะลูมิเนียมในช่วง 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้ผลดังนี้

กรณีที่ไม่เติมอะลูมิเนียมปรากฏว่า ไม่พบชั้นเคลือบเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงเวลาเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง ภาพโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงานที่เวลาเคลือบผิว 9 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และได้ทำการทดลองต่อโดยแช่อ่างเกลือที่ไม่เติมอะลูมิเนียมไว้ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 และ 18 ชั่วโมงก่อนเคลือบผิว จากนั้นนำชิ้นงานมาเคลือบผิวในอ่างเกลือเป็นเวลา 1 ถึง 9 ชั่วโมง ผลปรากฏว่ายังไม่เกิดชั้นเคลือบ

กรณีเติมอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดชั้นเคลือบที่ผิวชิ้นงานและชั้นเคลือบหนาขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการเคลือบผิวในช่วงเวลา 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลาเคลือบผิว 1, 4 และ 9 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเป็น 2.10, 4.33 และ 7.20 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และภาพโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงานที่เวลาเคลือบผิว 9 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 4.1(ข) จากรูปจะเห็นชั้นเคลือบและเนื้อเหล็กแบ่งแยกกันอย่างชัดเจน

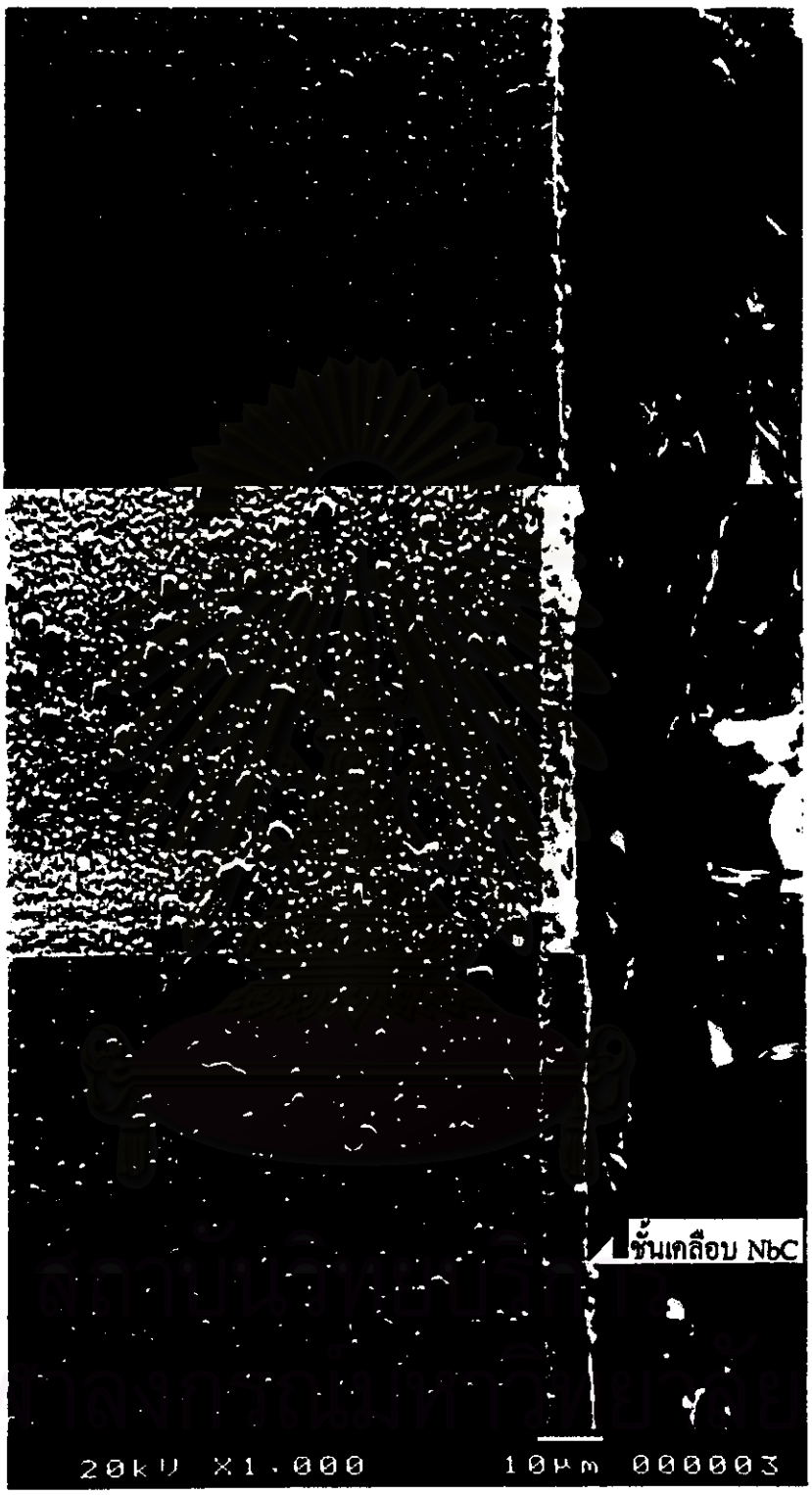
กรณีเติมอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดชั้นเคลือบที่ผิวชิ้นงานและชั้นเคลือบหนาขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการเคลือบผิวในช่วงเวลา 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยที่เวลาเคลือบผิว 1, 4 และ 9 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเป็น 2.17, 4.41 และ 7.53 ไมครอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และภาพโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงานที่เวลาเคลือบผิว 9 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 4.1(ค) เมื่อวิเคราะห์ชั้นเคลือบที่ได้ด้วย EDS ได้ผลการวิเคราะห์ธาตุที่ชั้นเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าที่ชั้นเคลือบนั้นประกอบด้วยธาตุไนโอเบียมและคาร์บอน เมื่อวิเคราะห์ธาตุที่บริเวณชั้นเคลือบด้วยวิธี X-ray mapping ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.1 ภาพโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบริเวณขอบผิวชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม (ก) 0, (ข) 1, (ค) 3, (ง) 5 และ (จ) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.2 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 4,และ (ค) 9 ชั่วโมง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

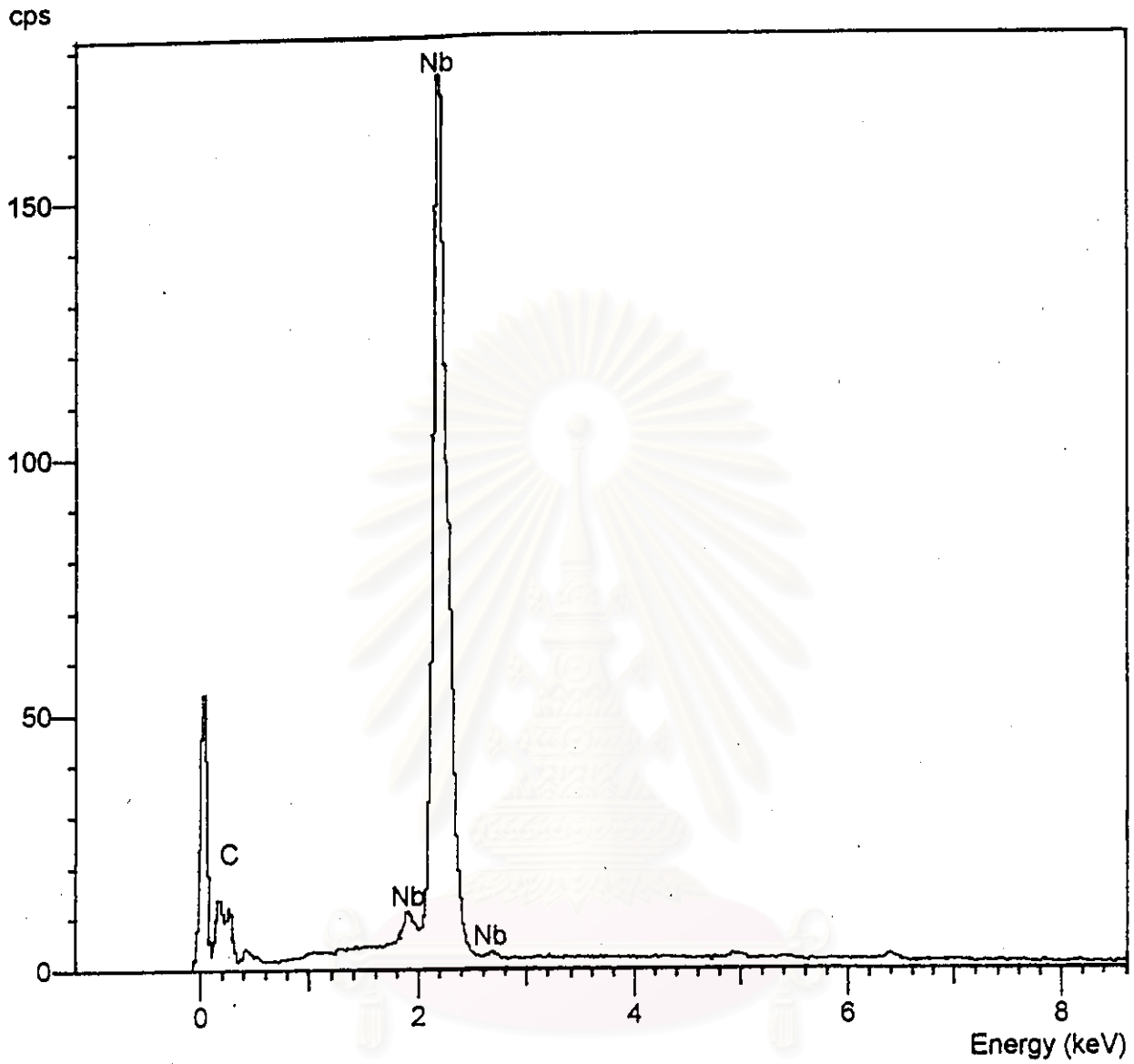


(ก)

(ข)

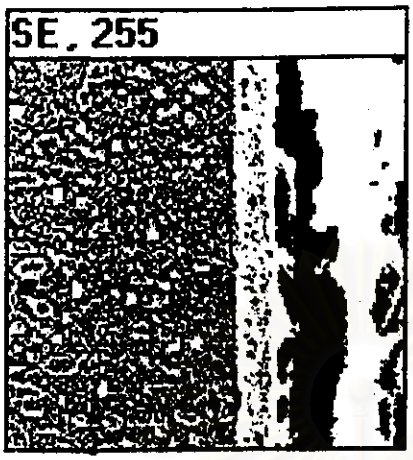
(ค)

รูปที่ 4.3 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 4,และ (ค) 9 ชั่วโมง

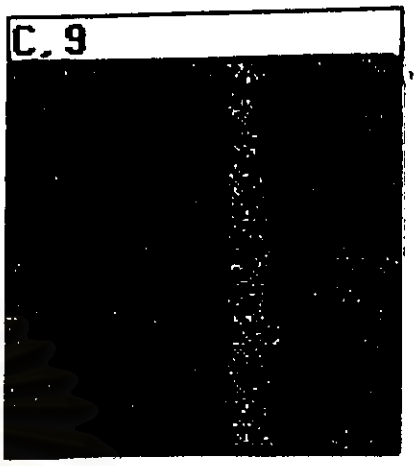


รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วย EDS ของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเคลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

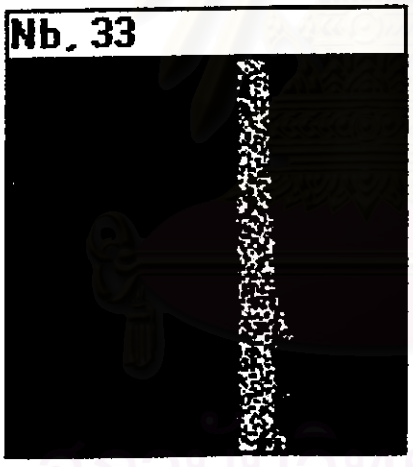
โดยรูป (ก) เป็นรูปโครงสร้างจุลภาค แสดงเนื้อพื้นเหล็กทางซ้ายมือและชั้นเคลือบเป็นแนวยาวอยู่ตรงกลาง ส่วนรูป (ข), (ค) และ (ง)เป็นรูป X-ray image แสดงบริเวณที่มีธาตุไนโอเบียม ธาตุคาร์บอนและธาตุเหล็กตามลำดับ จุดสีขาวคือตำแหน่งที่มีธาตุที่วิเคราะห์อยู่ พบว่าที่ชั้นเคลือบมีธาตุ



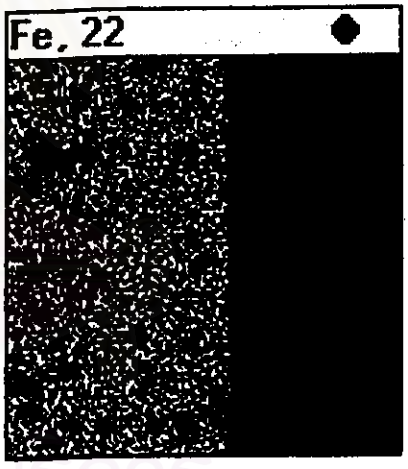
(ก) โครงสร้างจุลภาค



(ค) ธาตุคาร์บอน



(ข) ธาตุไนโอเบียม



(ง) ธาตุเหล็ก

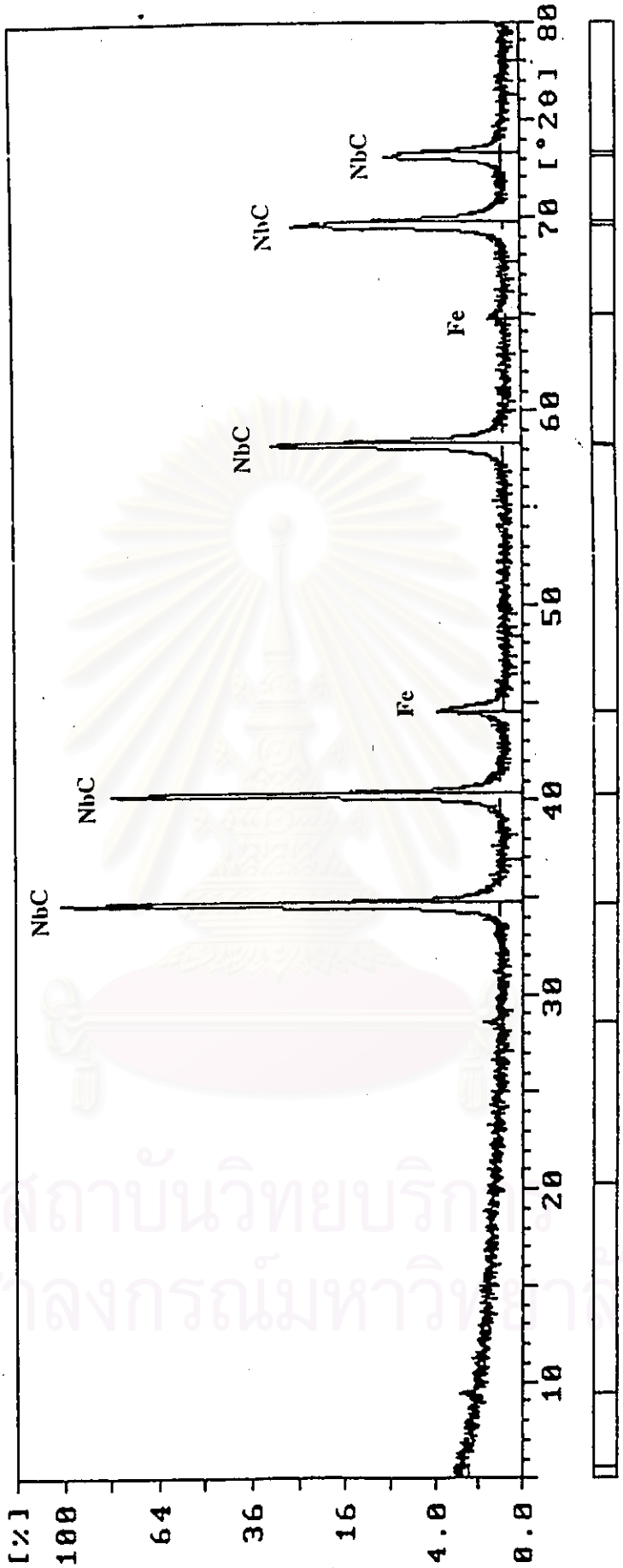
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่ชั้นเคลือบด้วย X-ray mapping ของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) โครงสร้างจุลภาค (ข), (ค) และ (ง) แสดง X-ray image ของธาตุไนโอเบียม คาร์บอนและเหล็กตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าองศาของมุม 2θ ที่เกิดพีคสูงสุด 3 พีค ของสารประกอบ

สารประกอบ	$2\theta_1$	$2\theta_2$	$2\theta_3$
NbC	34.8	40.4	58.4
NbB_2	33.4	43.6	59.7
FeB	37.7	41.2	45.1
Fe_2B	35.1	42.6	45.1
Fe	44.7	65.1	82.4

ไนโอเบียมอยู่มากและมีธาตุคาร์บอนอยู่ ในเนื้อเหล็กมีธาตุเหล็กอยู่มากและมีธาตุคาร์บอนอยู่เล็กน้อย จากตารางที่ 3.1 แสดงไว้ว่าเหล็กกล้า D2 ที่นำมาเคลือบผิวมีคาร์บอนเป็นส่วนผสม 1.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วยวิธี XRD ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่ามีพีคเกิดขึ้นที่มุม 34.8°, 40.4°, 58.4°, 69.8° และ 73.4° ซึ่งเป็นค่าพีคของ NbC ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ขณะเดียวกันพบพีคของเหล็กเกิดขึ้นที่มุม 44.7°และ 65.1° ซึ่งคือเหล็กกล้าD2 ที่ผ่านการเคลือบที่ 1000°C และเย็นตัวในอากาศนั้นเอง เมื่อนำชิ้นงานที่เคลือบผิวที่เวลา 9 ชั่วโมงมาวัดความแข็งของชั้นเคลือบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิคเกอร์ด้วยน้ำหนักกด 25 กรัม วัดรอยกดที่ชั้นเคลือบได้ 4.34 ไมครอน และสามารถคำนวณหาความแข็งได้เท่ากับ 2,462 Hv

กล่าวได้ว่าชั้นเคลือบที่ได้นี้เป็นชั้นไนโอเบียมคาร์ไบด์และอะลูมิเนียมมีส่วนสำคัญต่อการทำให้เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ทั้งนี้เป็นเพราะไนโอเบียมจากเฟอร์โรไนโอเบียมที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์ ไม่ได้ละลายในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวในรูปของอะตอมไนโอเบียมโดยตรง แต่ละลายอยู่ในรูปออกไซด์ของไนโอเบียม และเป็นไปได้ว่าละลายอยู่ในรูป Nb_2O_5 ซึ่งมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ -160 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของไนโอเบียม ต่ำกว่าออกไซด์ของไนโอเบียมในรูป Nb_2O_5 ซึ่งมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์เท่ากับ -135 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลของไนโอเบียม ทำให้ Nb_2O_5 มีเสถียรภาพสูง [3] จึงต้องการสารซึ่งทำหน้าที่รีดิวซ์ไนโอเบียมออกไซด์ให้เป็นไนโอเบียม (nascent Nb) หรือเกิดเป็นไนโอเบียม



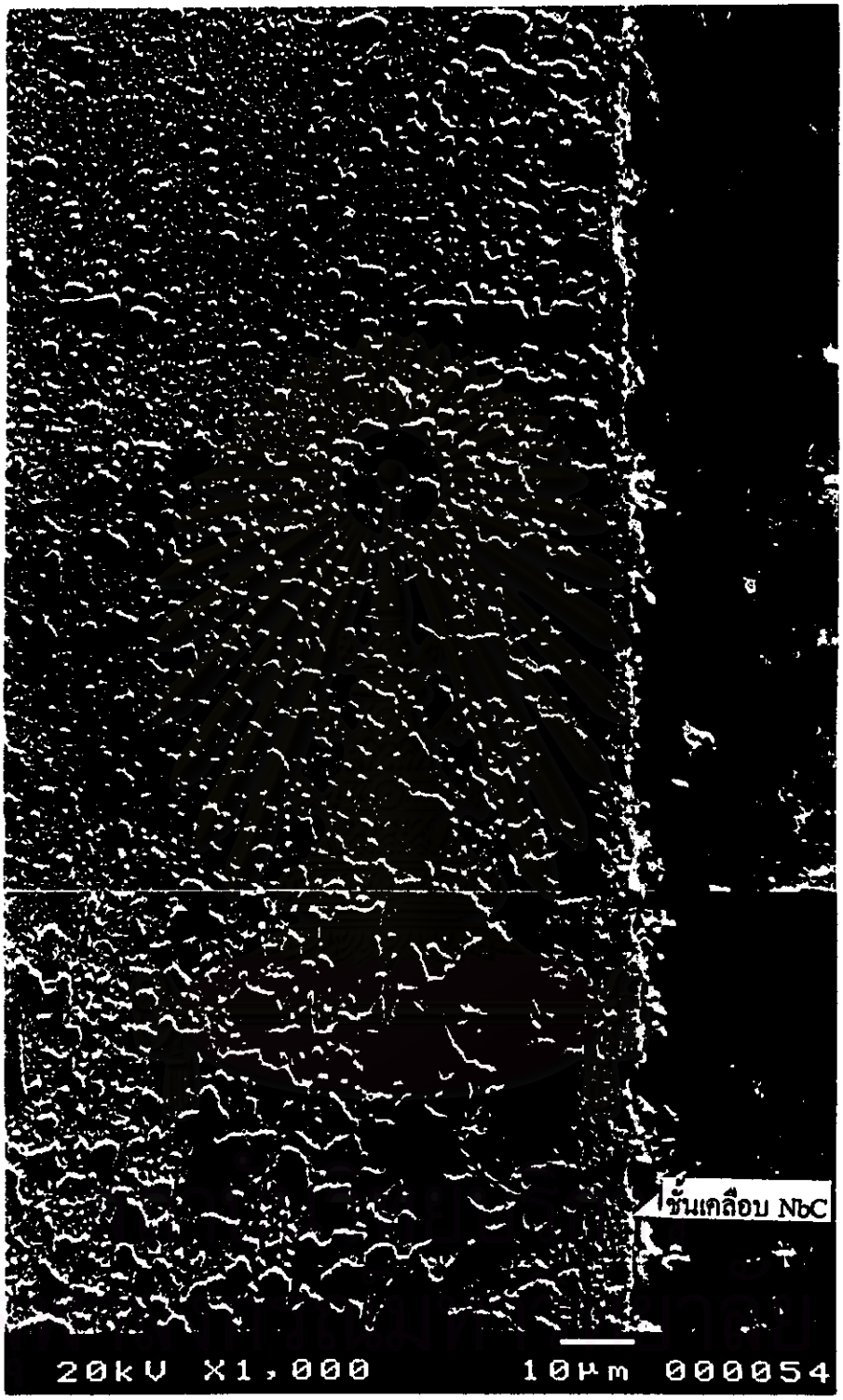
รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบพีค XRD ของพื้นผิวชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

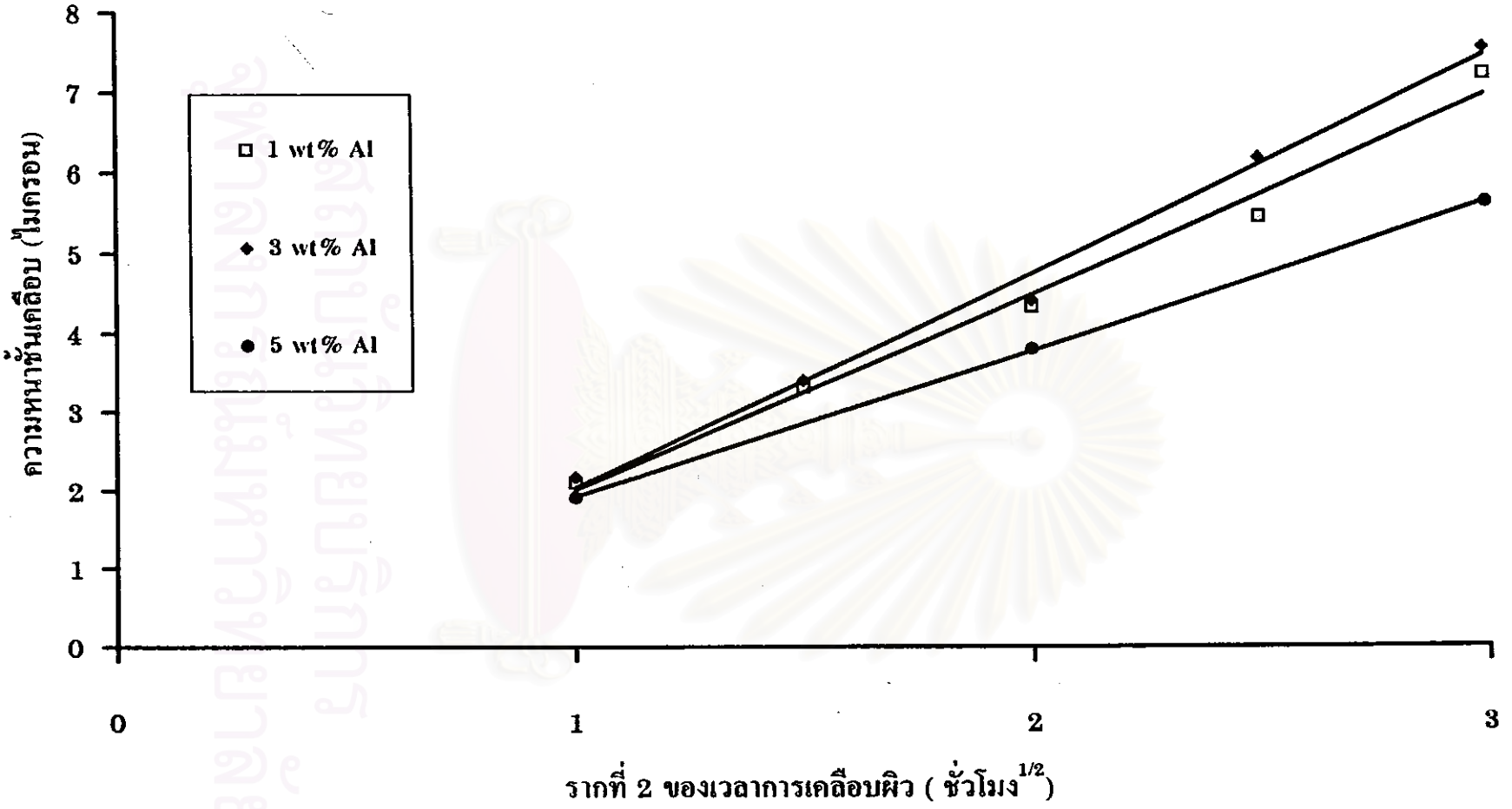
ออกไซด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ ก่อนที่จะไปรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนที่แพร่ซึมจากเนื้อเหล็กเกิดเป็นชั้นไนโอเบียมคาร์ไบด์

กรณีเติมอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดชั้นเคลือบในช่วงเวลาเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง ชั้นเคลือบที่ได้หนาขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการเคลือบแต่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ โดยที่เวลาเคลือบผิว 1, 4 และ 9 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบเป็น 1.91, 3.80 และ 5.61 ไมครอนตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงผลของปริมาณอะลูมิเนียมที่ใช้ต่อความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4 และ 9 ชั่วโมง ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบที่ได้มีความหนาน้อยกว่ากรณีที่เติมอะลูมิเนียม 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภาพโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงานที่เวลาเคลือบผิว 9 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 4.1(ค) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD พบว่า นอกจากมีพีคของ NbC และเหล็กแล้ว ยังพบว่าเกิดพีคของเหล็กบอไรด์ (FeB) ด้วยที่มุม 41.2° โดยมีปริมาณ NbC มากกว่าเหล็กบอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงว่าปริมาณอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่มากเกินกว่าความต้องในการรีดิวซ์ Nb_2O_5 จึงมีอะลูมิเนียมบางส่วนเหลืออยู่ และเนื่องจากอะลูมิเนียมมีค่าพลังงานอิสระในการเกิดออกไซด์ที่ต่ำ สามารถรีดิวซ์ B_2O_3 ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ทำให้ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวมีโบรอนอะตอมละลายอยู่ โบรอนเป็นธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็กจึงสามารถแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กและรวมตัวกับธาตุเหล็กที่มีอยู่ในเนื้อเหล็กเกิดเป็นเหล็กบอไรด์ และจากที่คาร์บอนไม่สามารถละลายในชั้นของเหล็กบอไรด์และถูกผลักดันเข้าไปในเนื้อเหล็ก[8, 9] เหล็กบอไรด์ที่เกิดขึ้นจึงขัดขวางการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนภายในเนื้อเหล็กมาที่ผิวชิ้นงาน ทำให้จำนวนอะตอมคาร์บอนที่จะรวมตัวกับไนโอเบียมมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ชั้นเคลือบไนโอเบียมที่ได้มีความหนาลดลงและหนาไม่สม่ำเสมอ

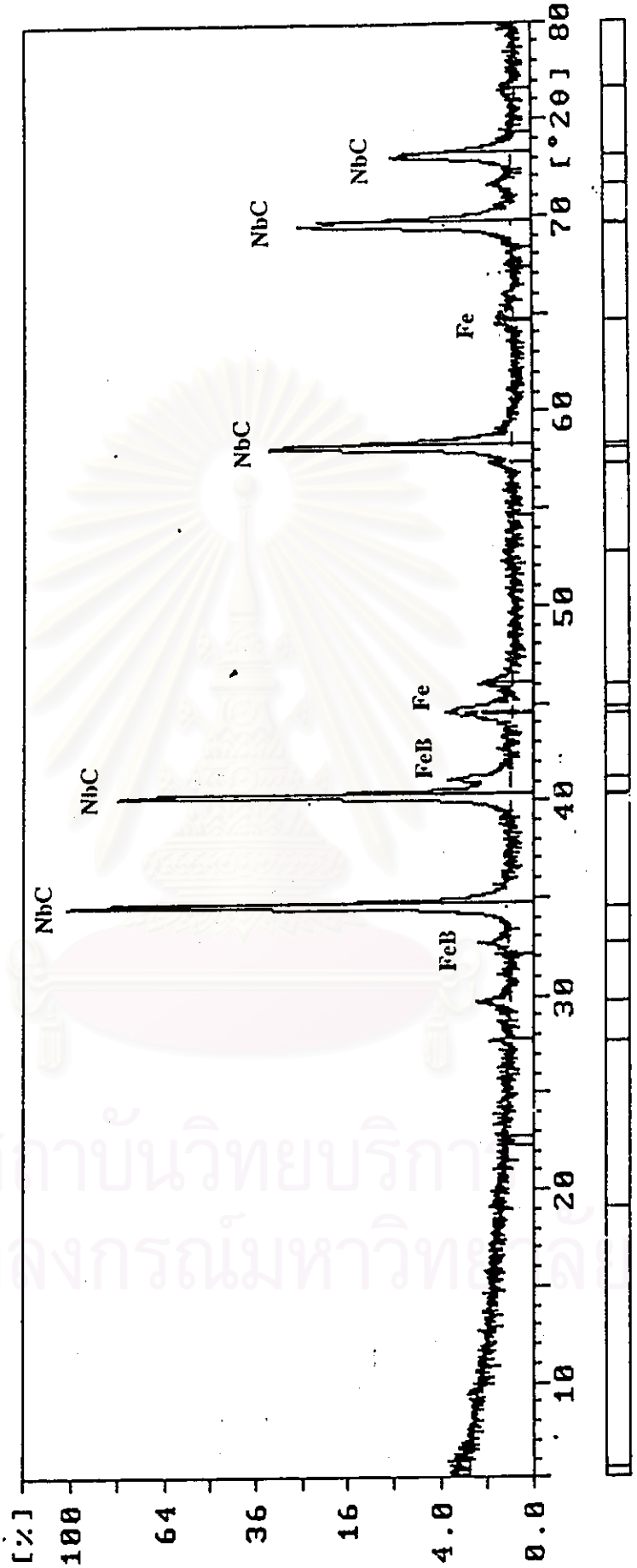
สำหรับกรณีเติมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ไม่พบชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ในช่วงเวลาเคลือบผิว 1 ถึง 9 ชั่วโมง แต่พบชั้นมีลักษณะคล้ายฟันใบเลื่อยและชั้นที่พบนี้มีความหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิวที่นานขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 ภาพโครงสร้างบริเวณผิวชิ้นงานที่เวลาเคลือบผิว 9 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 4.1(จ) ผลการวิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วยวิธี XRD พบว่ามีพีคของ NbC, NbB_2, FeB และ Fe_2B ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณอะลูมิเนียมที่ใช้มีปริมาณสูงมากเกินความต้องการในการรีดิวซ์ Nb_2O_5 อะลูมิเนียมที่เหลืออยู่จำนวนมากรีดิวซ์เกลือบอแรกซ์เกิดเป็นโบรอนอะตอมอยู่ในเกลือหลอมเหลว



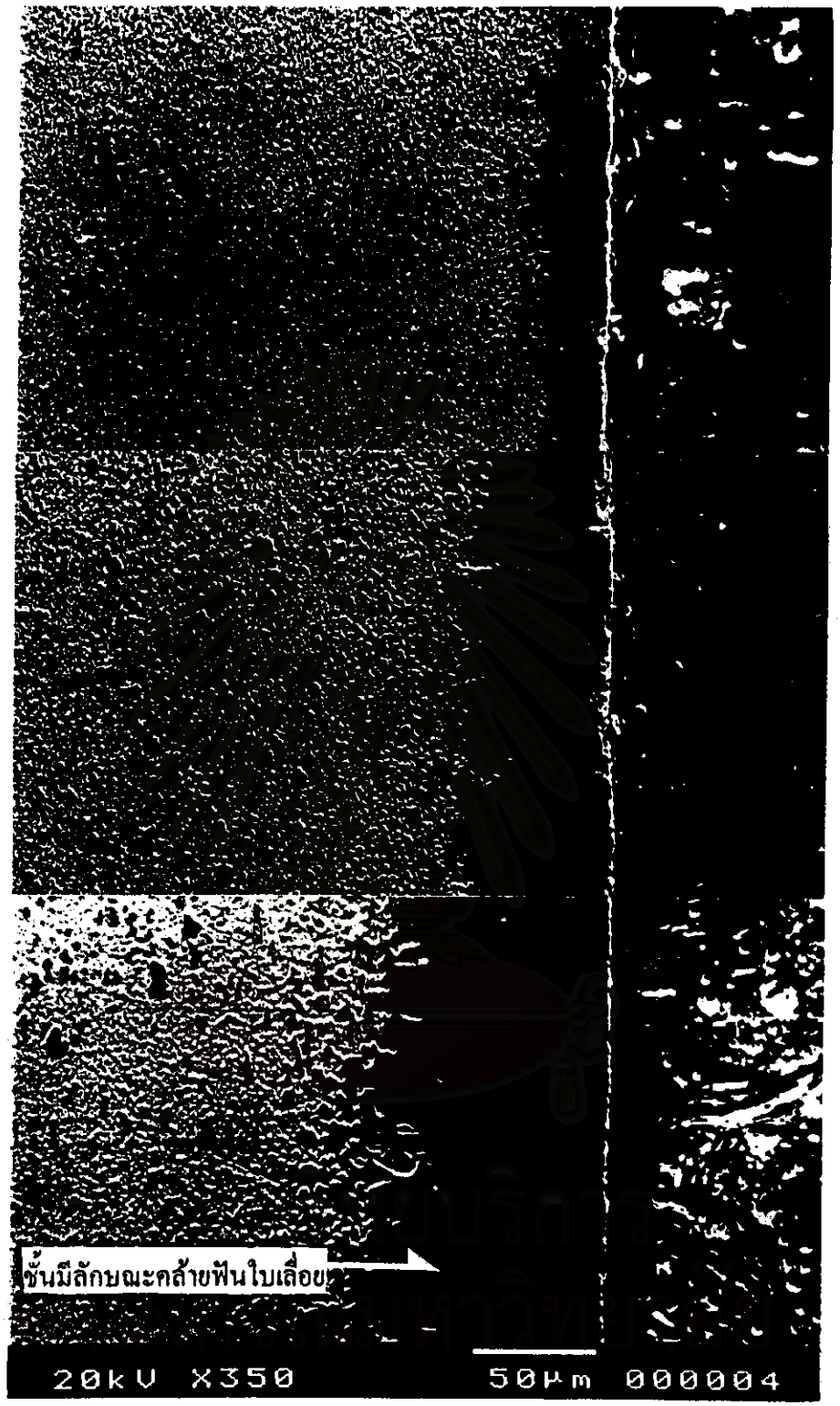
รูปที่ 4.7 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 4,และ (ค) 9 ชั่วโมง



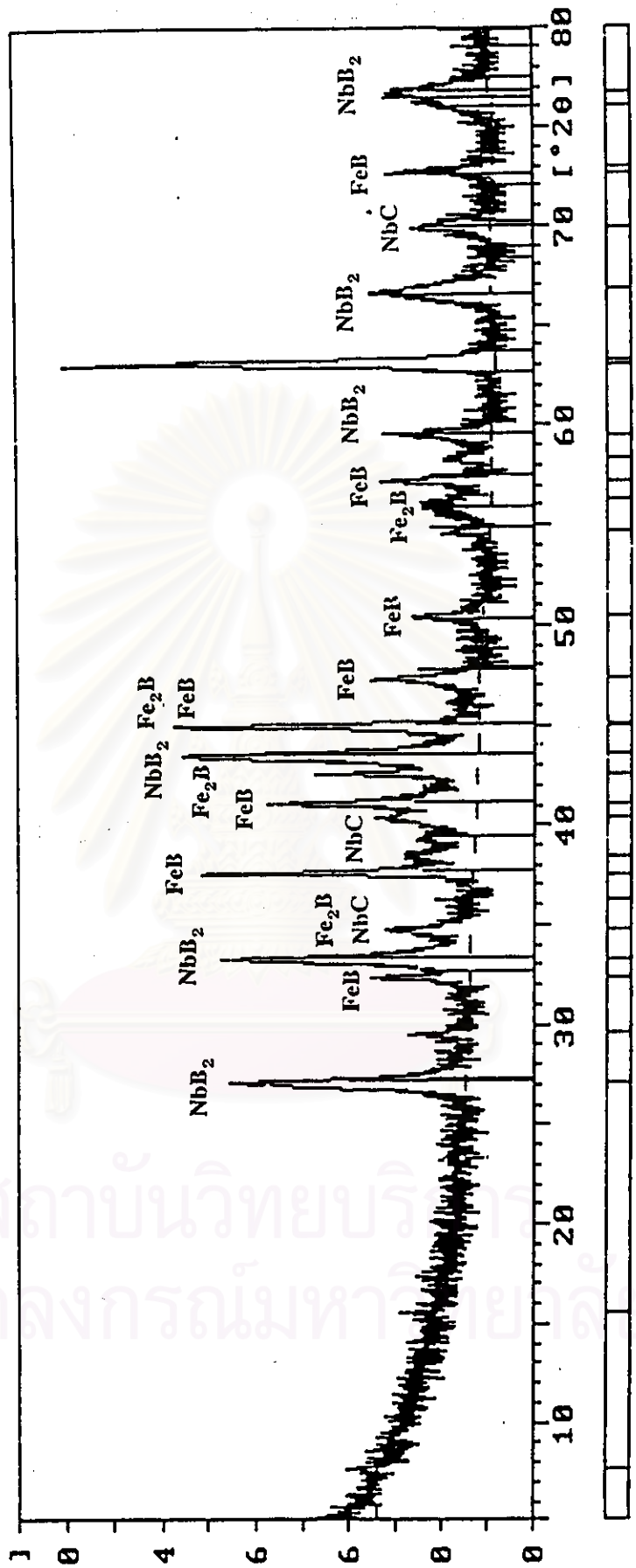
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิวและปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมที่เติมลงในอ่างเกลือต่อความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C



รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบพีค XRD ของพันธะผิวชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.10 ชั้นลักษณะคล้ายฟันใบเลื่อยของเหล็กกล้า D2 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเพลาที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 4,และ (ค) 9 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบพีค XRD ของพื้นผิวชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

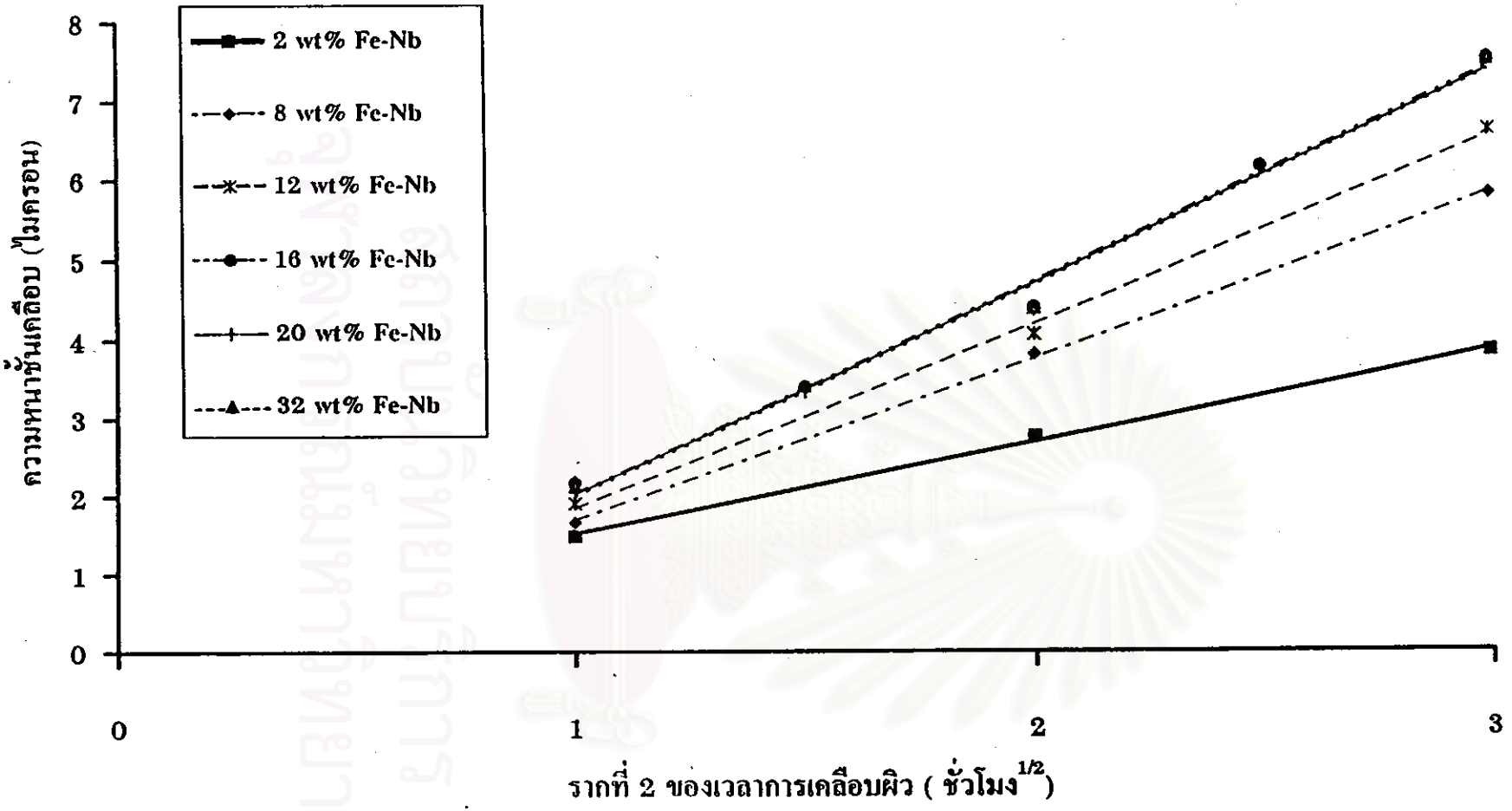
จำนวนมาก จนกระทั่งเกิดชั้นของเหล็กบอไรด์และไนโอเบียมบอไรด์นอกจากเกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์เพียงอย่างเดียว โดยมีสารประกอบของบอไรด์มากกว่าคาร์ไบด์

สรุปได้ว่าอะลูมิเนียมมีอิทธิพลต่อการเกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ถ้าไม่เติมอะลูมิเนียมลงในอ่างเกลือก็ไม่ได้ชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ แต่ในทางกลับกันถ้าอะลูมิเนียมที่เติมลงในอ่างเกลือมีอัตราส่วนสูง มีผลทำให้ชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์มีความหนาลดลง หรือถ้าสูงมากสุดท้ายอาจไม่เกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ก็ได้ และจากผลการศึกษาอิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ในการทดลองนี้ พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดสอบการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการ TD

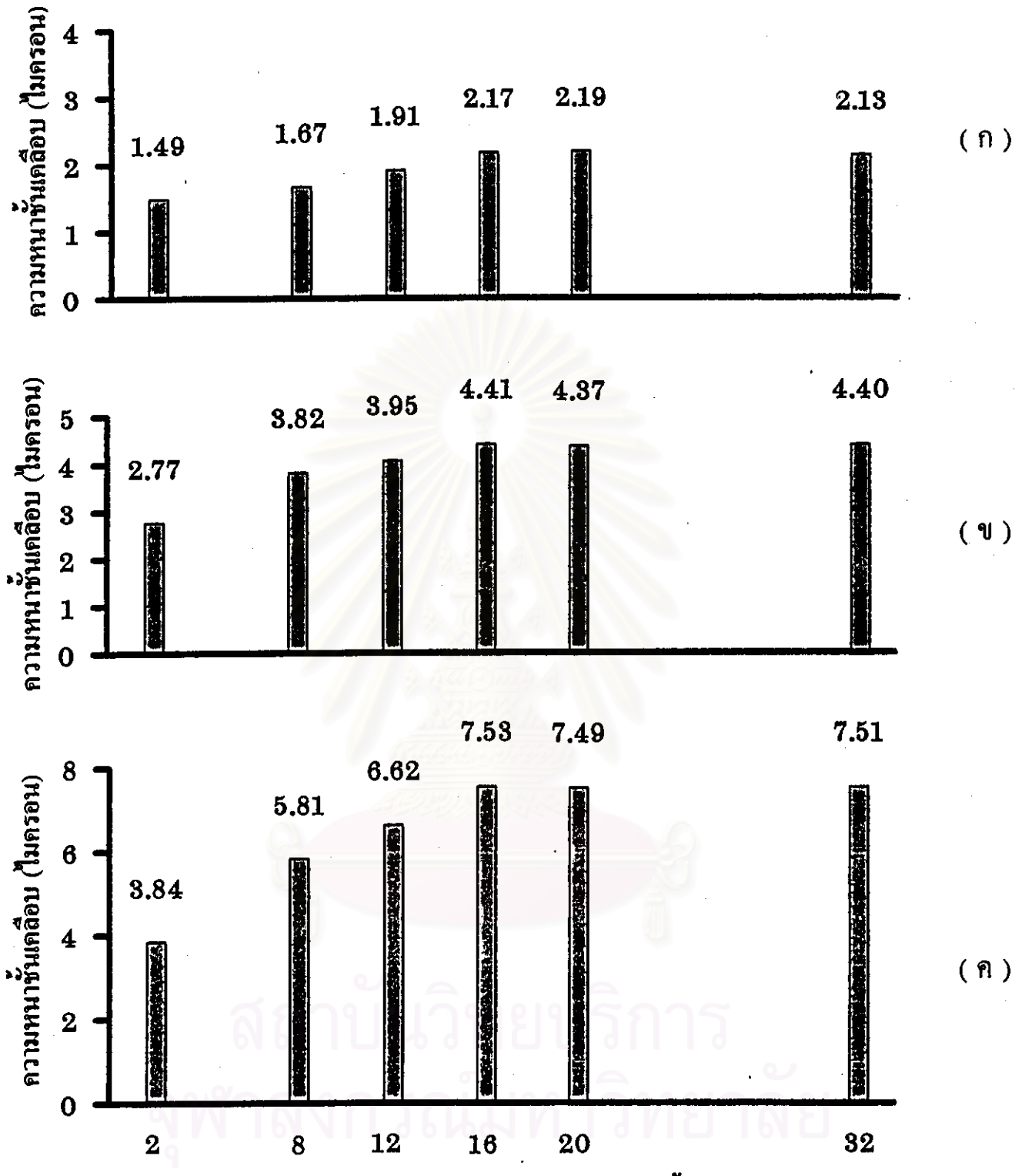
4.2 อิทธิพลของปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมต่อชั้นเคลือบ

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1000° C เป็นเวลาในช่วง 1 ถึง 9 ชั่วโมง โดยเติมอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมเฟอร์โรไนโอเบียมในช่วง 2 ถึง 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏว่าความหนาชั้นเคลือบที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบมีหน่วยเป็นชั่วโมง และความหนาของชั้นเคลือบที่ได้หนาขึ้นตามเวลาการเคลือบที่นานขึ้นจาก 1 ถึง 9 ชั่วโมง ไม่ว่าปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่ใช้จะเป็นเท่าไรจาก 2 ถึง 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แสดงได้ว่าการหนาขึ้นของชั้นเคลือบถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาการแพร่ซึม และเนื่องจากชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้ เกิดจากการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนจากเนื้อเหล็กมาที่ผิวเหล็กและรวมตัวกับไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวเกิดเป็นชั้นไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ผิวเหล็ก จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการที่ควบคุมการเกิดชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ คือการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนในเนื้อเหล็กมาที่ผิวเหล็ก

รูปที่ 4.13 (ก), (ข) และ(ค) แสดงความหนาชั้นเคลือบที่เวลาการเคลือบ 1, 4 และ 9 ชั่วโมงตามลำดับ โดยเปรียบเทียบความหนาชั้นเคลือบกับปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่เวลาการเคลือบแต่ละค่า พบว่าความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมเพิ่มจาก 2 เป็น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีความหนาสูงที่สุดเมื่อปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมเป็น 16 เปอร์เซ็นต์ และความหนาไม่หนาเพิ่มขึ้นแม้ว่าปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่ใช้เพิ่มขึ้นมากกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ เช่นที่เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง ปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียม 16, 20 และ 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้ความหนาชั้นเคลือบเป็น 4.41, 4.37 และ 4.40 ไมครอนตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิวและปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์โรไนโอเบียมที่เติมลงในอ่างเกลือต่อความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์



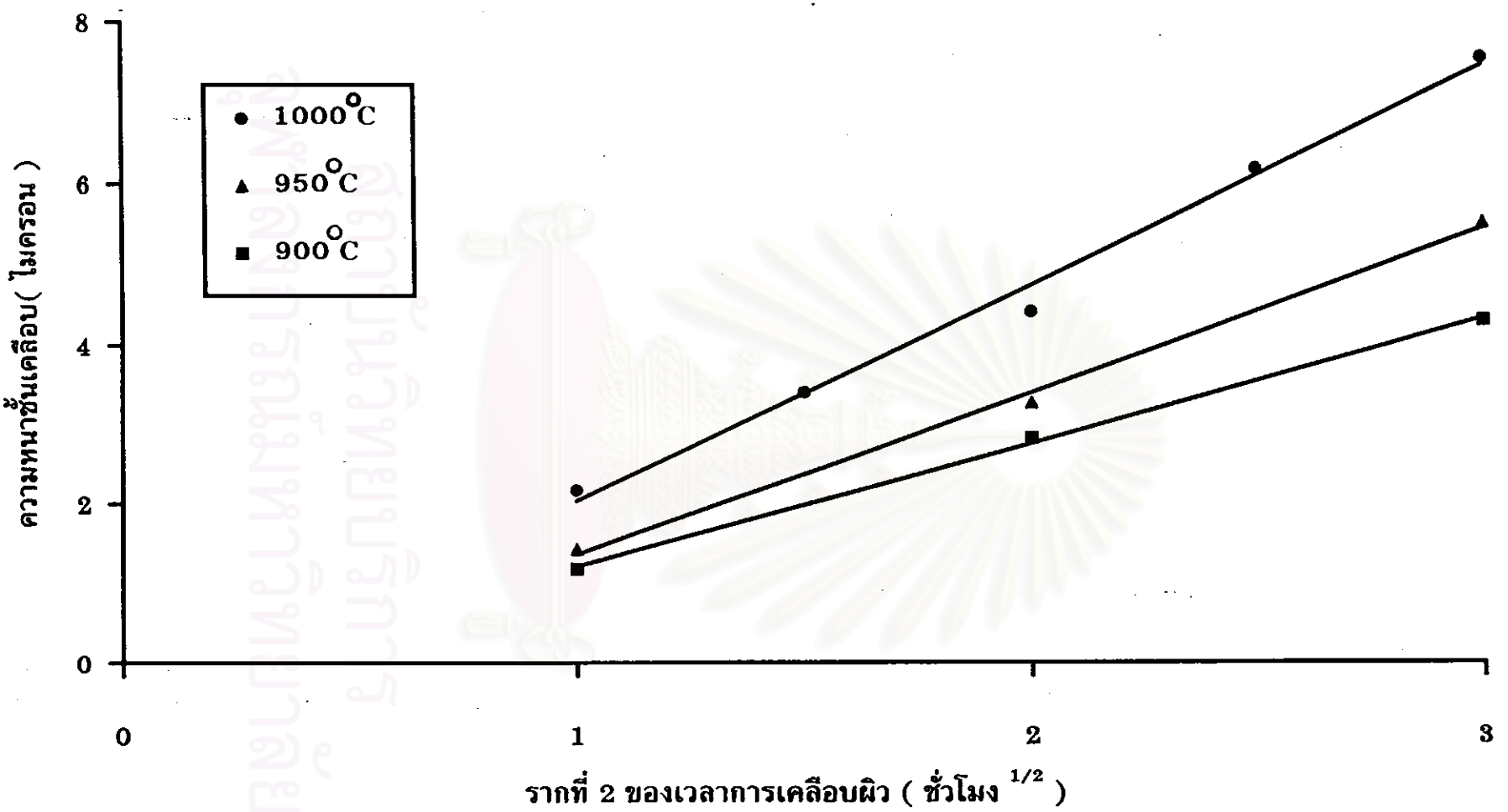
รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่ใช้ต่อความหนาชั้นเคลือบ ที่เวลาการเคลือบผิว (ก) 1, (ข) 4 และ (ค) 9 ชั่วโมง

เฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมลงในเกลือบอแรกซ์ เป็นค่าที่เพียงพอทำให้เกลือบอแรกซ์หลอมเหลวอิ่มตัวไปด้วยไนโอเบียม

ปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่เติมลงในอ่างเกลือมีผลต่อปริมาณไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์หลอมเหลว ถ้าไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในเกลือบอแรกซ์มีปริมาณน้อยกว่าจำนวนไนโอเบียมที่คาร์บอนที่ผิวเหล็กต้องการในการรวมตัวเกิดเป็นชั้นไนโอเบียมคาร์ไบด์ หรือสารละลายเกลือบอแรกซ์ไม่อิ่มตัวด้วยไนโอเบียม จะทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีความหนาน้อยลง ถ้าต้องการให้ได้ความหนาชั้นเคลือบหนาเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้เวลาในการเคลือบผิวให้นานขึ้น เช่น อ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C เวลาการเคลือบผิว 4 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ 4.41 ไมครอน ขณะเดียวกันอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C ต้องใช้เวลาในการเคลือบผิวประมาณ 5 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ความหนาชั้นเคลือบที่เท่ากัน นอกจากนี้อัตราในการละลายของไนโอเบียมในอ่างเกลือก็ยังขึ้นกับปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียมที่ใช้ด้วย [3]

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนาชั้นเคลือบ

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 ในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิวในช่วง 900°C ถึง 1000°C และเวลาการเคลือบผิวในช่วง 1 ถึง 9 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ได้ชั้นเคลือบหนาที่สุดในเวลาการเคลือบผิวที่เท่ากัน และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิวลดต่ำลงจาก 1000°C ถึง 900°C ทำให้ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้ในเวลาการเคลือบผิวที่เท่ากันมีความหนาน้อยลง ไม่ว่าเวลาการเคลือบผิวจะเป็นเท่าไรตั้งแต่ 1 ถึง 9 ชั่วโมง เช่นที่เวลาการเคลือบผิว 4 ชั่วโมง ความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C, 950°C และ 900°C มีค่าเป็น 4.41, 3.27 และ 2.83 ไมครอนตามลำดับ นอกจากนี้ความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 900°C ที่เวลาการเคลือบผิว 9 ชั่วโมง มีค่าเป็น 4.29 ไมครอน ขณะที่ความหนาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C ที่เวลาเคลือบผิว 4 ชั่วโมง มีค่าเป็นเป็น 4.41 ไมครอน การเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวสูงขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดเวลาในการใช้เคลือบผิวลงได้ถึงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบผิวมีอิทธิพลต่อความหนาชั้นเคลือบมากกว่าเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว กล่าวโดยรวมแล้วการหนาขึ้นของชั้นเคลือบเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนภายในเนื้อเหล็กมาที่ผิวชิ้นงาน โดยการแพร่ซึมของคาร์บอนที่อุณหภูมิ 1000°C เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 950°C และ 900°C จึง



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิวและอุณหภูมิต่อความหนาชั้นเคลือบ ไนโอเบียมคาร์ไบด์ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

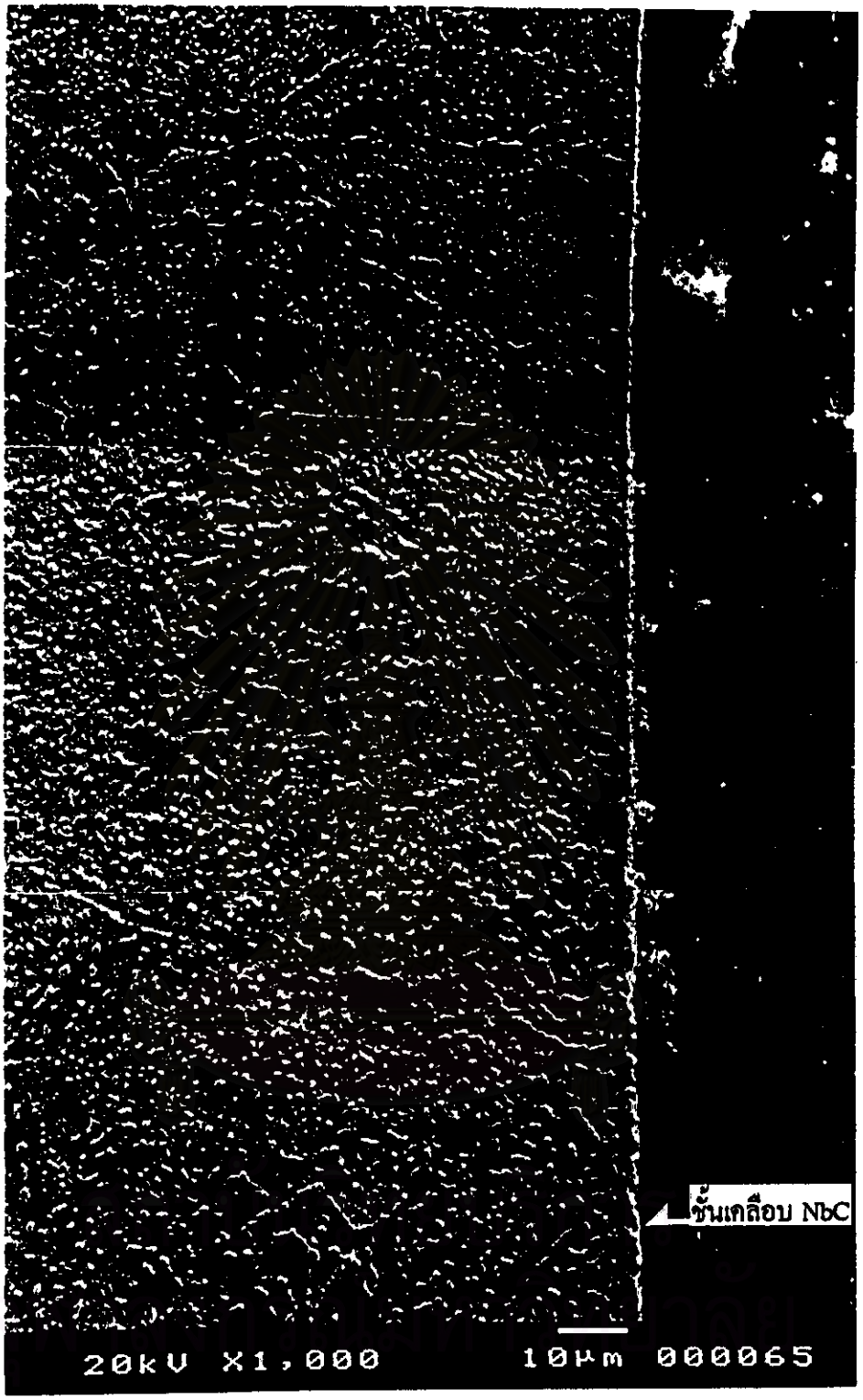
ทำให้ได้ชั้นเคลือบหนากว่า และการแพร่ซึมที่อุณหภูมิ 1000°C และระยะเวลาสั้นเกิดขึ้นได้เร็วมากกว่าที่อุณหภูมิ 900 °C และระยะเวลานาน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (D) ของคาร์บอนในเหล็กออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิในช่วง 900 ถึง 1000°C แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ค่า D ในตารางได้จากคำนวณในสมาการ $D = D_o e^{-Q/RT}$ โดยใช้ค่า frequency factor (D_o) และค่า activation energy (Q) ของการแพร่ซึมอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างเหล็กออสเทนไนท์โดยประมาณเท่ากับ 0.021 cm^2/sec และ 33,800 cal/gram-mol ตามลำดับ โดยค่า T ในสมการคืออุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน (K) และค่า R คือค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเป็น 1.987 cal/gm-mol /K

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมโดยประมาณของคาร์บอนในเหล็กออสเทนไนท์

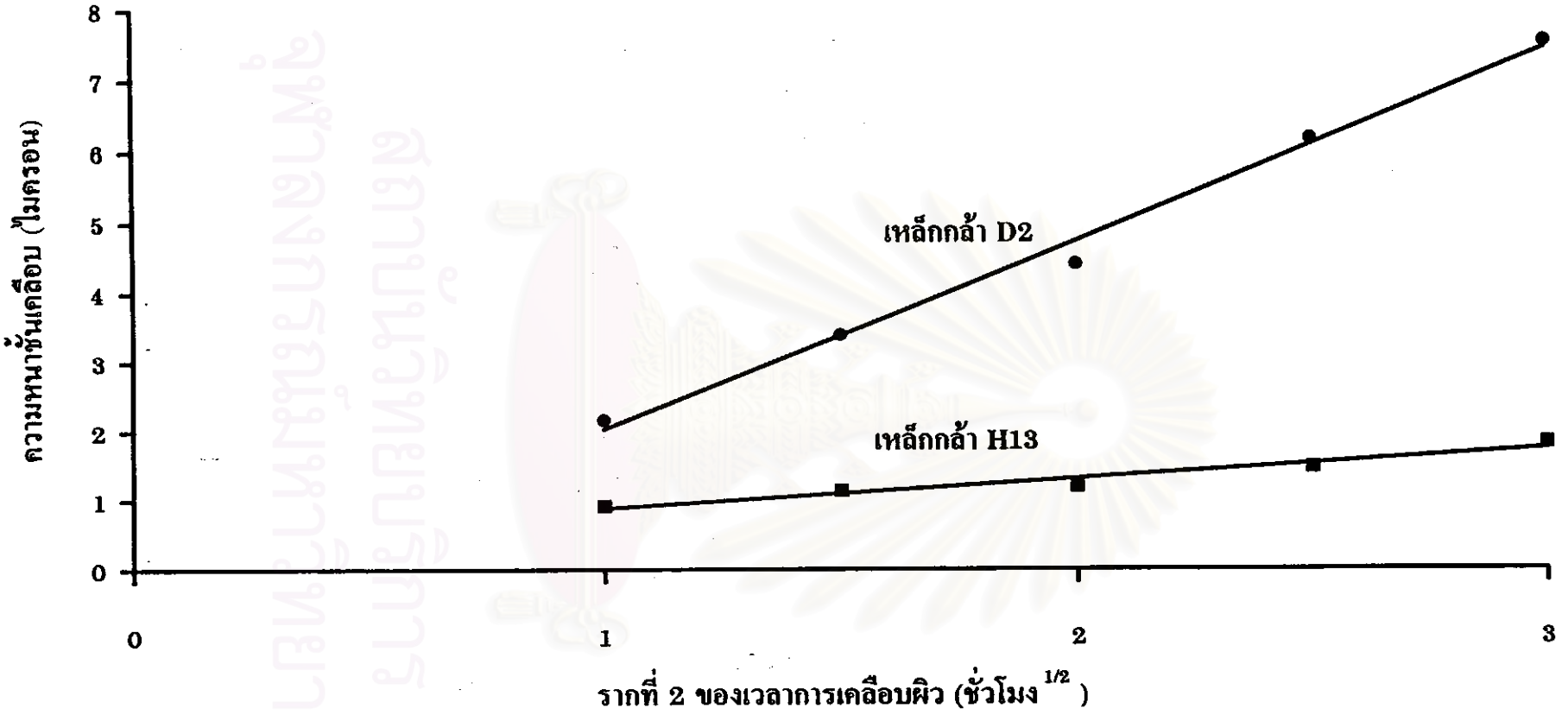
อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (D),$cm^2/sec \times 10^{-7}$
900	1.0573
950	1.9128
1000	3.3031

4.4 อิทธิพลของชนิดเหล็กต่อความหนาชั้นเคลือบ

ผลการเคลือบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมปริมาณเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาเคลือบผิวชิ้นงานในช่วง 1 ถึง 9 ชั่วโมง พบว่าความหนาของชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์บนผิวเหล็กกล้า H13 เพิ่มขึ้นตามเวลาการเคลือบผิว โดยที่เวลาการเคลือบผิว 1, 4 และ 9 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์เป็น 0.92, 1.20 และ 1.83 ไมครอนตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.15 และความหนาชั้นเคลือบที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามรากที่ 2 ของเวลาการเคลือบผิว เช่นเดียวกับเหล็กล้า D2 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แต่ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า H13 อยู่ในช่วง 0.92 ถึง 1.83 ไมครอน ขณะที่เหล็กกล้า D2 ในสภาวะการเคลือบผิว



รูปที่ 4.15 ความหนาชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวเป็นเวลา (ก) 1, (ข) 4,และ (ค) 9 ชั่วโมง



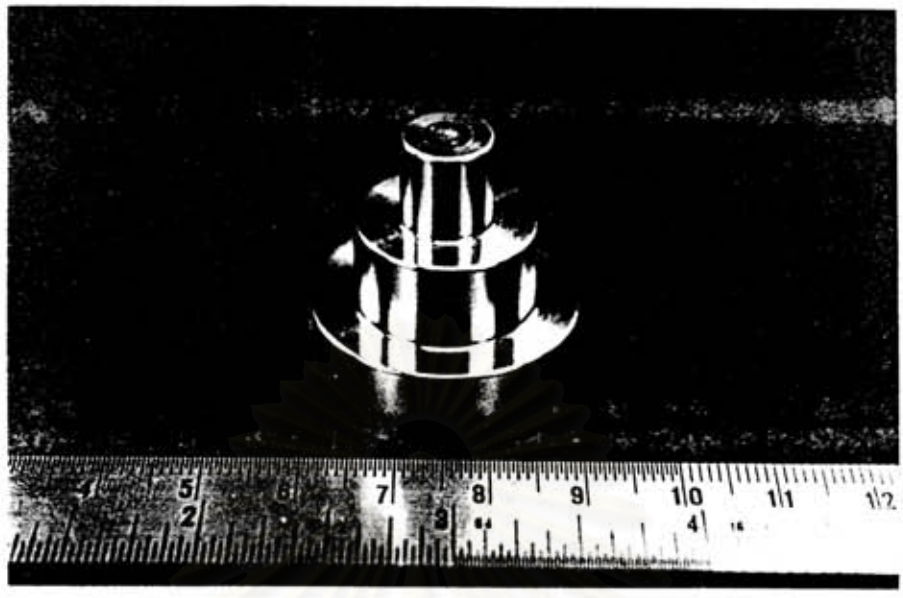
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นเคลือบของเหล็กกล้า H13 และ D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือบอแรกซ์ที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเคลือบผิว 1000°C

เดียวกันได้ความหนาชั้นเคลือบในช่วง 2.17 ถึง 7.53 ไมครอน เมื่อพิจารณาส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กทั้ง 2 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าเหล็กกล้า D2 และเหล็กกล้า H13 ที่ใช้ในการทดลอง มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม 1.09 และ0.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เหล็กกล้า D2 มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กที่สูงกว่าเหล็กกล้า H13 ทำให้ที่อุณหภูมิการเคลือบผิวเหล็กกล้า D2 มีปริมาณคาร์บอนที่สามารถแพร่ซึมมาที่ผิวชิ้นงานมากกว่าและรวมตัวกับไนโอเบียมเกิดเป็นชั้นเคลือบคาร์ไบด์ที่หนากว่าเหล็กกล้า H13 และเมื่อพิจารณาดูธาตุโครเมียมที่สามารถเกิดเป็นคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าทั้ง 2 ชนิด พบว่าปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้า H13 ที่ใช้มีสูงถึง 16.91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขณะที่เหล็กกล้า D2 มีเพียง 12.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้คาร์บอนอะตอมของเหล็กกล้า H13 บางส่วนไปรวมตัวกับโครเมียมเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ คาร์บอนอะตอมที่อยู่ในเนื้อพื้นของเหล็กกล้า H13 จึงน้อยลง ปริมาณคาร์บอนที่จะแพร่ซึมไปที่ผิวเหล็กน้อยลงและเกิดเป็นชั้นไนโอเบียมคาร์ไบด์ได้น้อยลง

4.5 ขนาดที่เปลี่ยนแปลงภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์

ผลการวัดขนาดชิ้นงานก่อนและหลังการเคลือบผิวในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1000°C ของเหล็กกล้าเครื่องมือ D2 ซึ่งมีรูปทรงพันช์ขั้นบันได (step punch) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยเติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาเคลือบผิว 4, 6 และ 9 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 รูปทรงพันช์ขั้นบันไดมีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการ TD โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d1, d2 และ d3 ของชิ้นงานภายหลังการเคลือบผิวเป็นเวลา 4, 6 และ 9 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเคลือบผิวที่นานขึ้น ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d1 มีการเพิ่มของขนาดมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง d2 และ d3 เช่นที่เวลาการเคลือบผิว 9 ชั่วโมง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d1, d2 และ d3 มีค่าเพิ่มขึ้น 0.042, 0.021 และ 0.010 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับค่าความหนาของชิ้นงาน h1, h2 และ h3 มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการเคลือบผิว และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวนานขึ้นเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของชิ้นงานเกิดจากความหนาของชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ได้ภายหลังการเคลือบผิวและการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากการชุบแข็งและอบคืนตัวชิ้นงานภายหลังการเคลือบผิว สำหรับค่าความหนาของชั้นเคลือบไนโอเบียมคาร์ไบด์ภายหลังการเคลือบผิวชิ้นงานรูปทรงพันช์ขั้นบันไดที่เวลา 4, 6 และ 9 ชั่วโมง มีค่าเป็น 6.9, 8.1 และ 9.3 ไมครอนตามลำดับ และที่เวลาการเคลือบผิว 9 ชั่วโมง



(ก) ก่อนการเคลือบผิว

(ข) ภายหลังการเคลือบผิว

รูปที่ 4.17 ชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดภายหลังการเคลือบผิวเป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1000°C ในอ่างเกลือบอแรกซ์หลอมเหลวที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.3 ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

	d1	d2	d3	h1	h2	h3
ขนาดก่อนการเคลือบผิว	9.990	20.009	30.010	10.006	20.009	29.997
ขนาดภายหลังการเคลือบผิว	10.020	20.021	30.020	10.014	20.008	30.018
ขนาดที่เปลี่ยนแปลง	0.030	0.012	0.010	0.008	-0.001	0.021

ตารางที่ 4.4 ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

	d1	d2	d3	h1	h2	h3
ขนาดก่อนการเคลือบผิว	9.990	20.009	30.010	10.009	20.011	29.999
ขนาดภายหลังการเคลือบผิว	10.023	20.023	30.022	10.020	20.022	30.015
ขนาดที่เปลี่ยนแปลง	0.033	0.014	0.012	0.011	0.011	0.016

ตารางที่ 4.5 ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่เคลือบผิวในอ่างเกลือที่เติมเฟอร์โรไนโอเบียม 16 เปอร์เซ็นต์และอะลูมิเนียม 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

	d1	d2	d3	h1	h2	h3
ขนาดก่อนการเคลือบผิว	9.991	20.008	30.010	10.007	20.010	29.997
ขนาดภายหลังการเคลือบผิว	10.033	20.029	30.020	10.028	20.026	30.016
ขนาดที่เปลี่ยนแปลง	0.042	0.021	0.010	0.021	0.016	0.019

ได้ชั้นเคลือบหนาที่สุด จึงทำให้ชิ้นงานที่เวลาการเคลือบผิวที่นานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเพิ่มมากกว่าชิ้นงานที่ใช้เวลาในการเคลือบผิวที่สั้นกว่า ดังนั้นชิ้นงานที่มีความต้องการขนาดที่เที่ยงตรงสูงต้องมีการคำนึงถึงขนาดที่เปลี่ยนแปลงภายหลังกระบวนการเคลือบผิว และมีการเผื่อขนาดชิ้นงานก่อนนำมาเคลือบผิวเพื่อให้ได้ขนาดสุดท้ายตามต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย