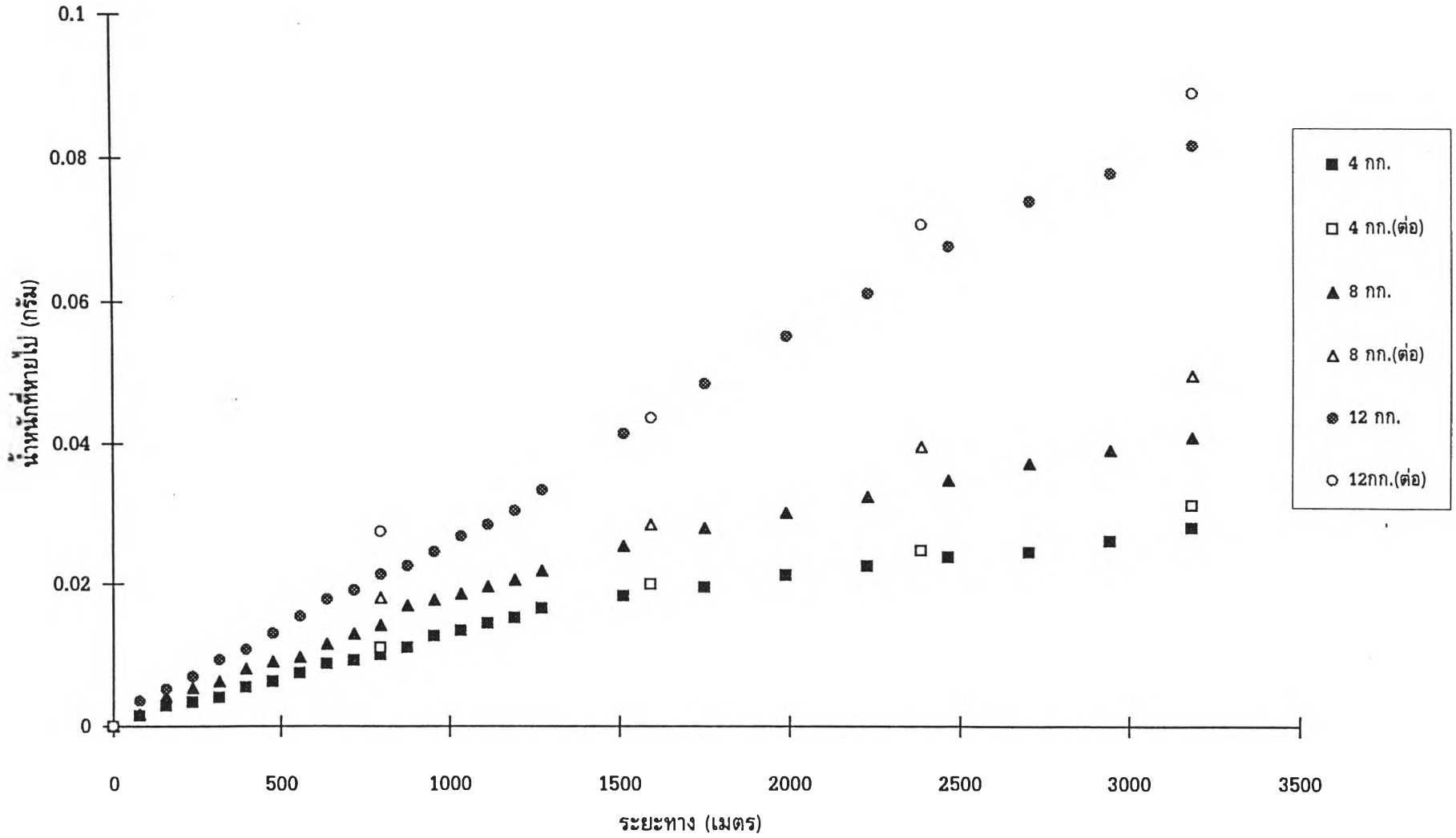
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของน้ำหนักกดชิ้นงานต่อการสึกหรอ

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปที่มีหน่วยเป็นกรัมกับระยะทางการทดสอบการเสียดสีที่มีหน่วยเป็นเมตร ความเร็วเชิงเส้นการทดสอบของจานคือ 1.3 เมตรต่อวินาที จากการทดสอบการเสียดสีของชิ้นงานเหล็กกล้า D2 ที่ไม่ได้เคลือบผิวกับระยะทางทดสอบกรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง ที่น้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม จะเห็นว่าที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม ช่วงระยะทางทดสอบจาก 0 ถึง 1272 เมตร ความเร็วของน้ำหนักที่หายไปต่อระยะทางการทดสอบมีค่าเป็น 1.31×10^{-5} กรัมต่อเมตร และ 1.72×10^{-5} กรัมต่อเมตร ตามลำดับ จากนั้นความเร็วของน้ำหนักที่หายไปมีค่าลดลงเหลือค่าเป็น 5.81×10^{-6} กรัมต่อเมตร และ 9.34×10^{-6} กรัมต่อเมตร ตามลำดับ แต่ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม การสึกหรอที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม ตั้งแต่ระยะทางเริ่มต้นการทดสอบจาก 0 ถึง 3180 เมตร โดยความเร็วของน้ำหนักที่หายไปมีค่าเป็น 2.72×10^{-5} กรัมต่อเมตร จะเห็นว่าที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม มีความชันของน้ำหนักที่หายไปแบ่งออกเป็นสองช่วง ซึ่งความชันช่วงแรกเป็นช่วงที่ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบเสียดสีกับพื้นผิวรอบจานเพื่อปรับผิวหน้าให้เข้าหากัน[7] เป็นพฤติกรรมการสึกหรอที่สังเกตได้ในช่วงแรกของการไถลเสียดสี เรียกว่าช่วง running-in อัตราการสึกหรออาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าช่วงหลังของการไถลเสียดสีขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการ running-in[3] ในความชันช่วงแรกของน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม ลักษณะพฤติกรรมการสึกหรอเกิดจากการเสียดสีบริเวณผิวหน้าสัมผัสส่วนที่นูน (asperity contact) ระหว่างสองผิวหน้าที่ไถลเสียดสีกันจนเกิดการสึกหรอขึ้นโดยส่วนที่นูนถูกทำลายจากแรงกดและแรงเฉือน เกิดการสึกหรอหลุดออกมาในรูปของเศษโลหะ (debris) พื้นที่ระหว่างผิวสัมผัสส่วนที่นูนเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสก็เพิ่มขึ้นด้วย สัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้เกี่ยวพันกับแรงที่เอาชนะแรงเสียดทานเริ่มต้นทดสอบ จึงเป็นสาเหตุให้ช่วงแรกของการเสียดสีมีความเร็วของการสึกหรอมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลงานของ Horst Czichos[6] กล่าวคือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดสอบการเสียดสีก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ ส่วนความเร็วของการสึกหรอในช่วงหลังช้าลงนั้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับรอยเสียดสีของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวระหว่างการทดสอบเกิดเป็นชั้นออกไซด์ขึ้น ซึ่งช่วยลดการสึกหรอและแรงเสียดทาน ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม มีความเร็วการสึกหรอมากตั้งแต่ระยะทางเริ่มต้นการทดสอบจาก 0 ถึง 3180 เมตร นั้นเป็นเพราะว่าน้ำหนักกดสูงสามารถ

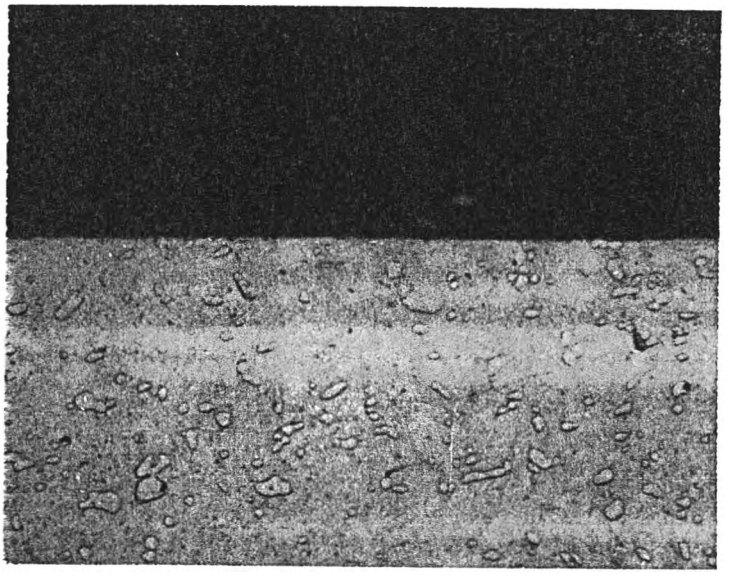


รูปที่ 4.1 การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก . ความเร็วเชิงเส้นจาน 1.3 เมตรต่อวินาที

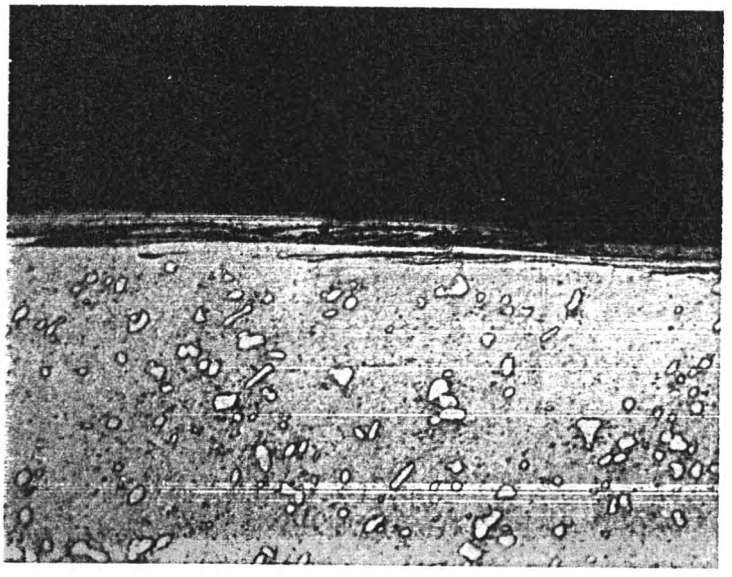
ทำลายชั้นออกไซด์ให้แตกและหลุดออกมาพร้อมกับเศษโลหะที่ถูกเสียดสีเกิดการสึกหรอขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะรอยเสียดสีที่เกิดขึ้นพบว่ามีความกว้างมากกว่าลักษณะรอยเสียดสีของน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม เนื่องจากการสึกหรอที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม น้ำหนักที่หายไปของการสึกหรอมาก ดังนั้นการสูญเสียเศษโลหะที่เกิดจากการเสียดสีก็มากขึ้นด้วย ความลึกของรอยเสียดสีจึงมีความลึกกว่ากรณีน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างผิวจานกับผิวชิ้นงานทดสอบสัมผัสกันได้มากขึ้น เมื่อดูจากภาคตัดขวางรอยเสียดสีของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม พบว่าผิวเนื้อโลหะบริเวณรอยเสียดสีไม่เกิดการแปรรูปแบบ plastic ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก) ซึ่งลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการสึกหรอแบบไม่รุนแรง ขณะที่การทดสอบที่น้ำหนักกดขนาด 12 กิโลกรัมนั้น ผิวเนื้อโลหะบริเวณรอยเสียดสีเกิดการแปรรูปแบบ plastic สังเกตได้จากที่ผิวด้านบนของเนื้อเหล็ก D2 ถูกเบียดลู่ไปตามทิศทางการไถล โดยมีทิศทางการไถลจากซ้ายไปขวา ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ข) ซึ่งลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการสึกหรอแบบรุนแรง[8] กล่าวได้ว่าสภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม 8 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบไม่รุนแรงและที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบรุนแรง จากการศึกษาของ Eyre[7] พบว่าเมื่อทดสอบที่น้ำหนักกดต่ำการสึกหรอไม่รุนแรง อัตราการสึกหรอต่ำ แต่ที่น้ำหนักกดค่าหนึ่งขึ้นไปการสึกหรอเปลี่ยนไปเป็นแบบรุนแรงมีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นสูง โดยอัตราการสึกหรอแบบรุนแรงมีค่าไม่ต่ำกว่า 10 เท่าของอัตราการสึกหรอแบบไม่รุนแรง อัตราการสึกหรอที่หาได้เป็นการวัดการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งน้อยกว่าเสียดสีกับจานที่มีความแข็งมากกว่า อย่างไรก็ดีในการทดลองนี้วัดการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้า D2 ที่มีความแข็งมากกว่าความแข็งของจานที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 และน้ำหนักกดที่ใช้ทดลองมีค่าเพียง 3 ค่าเท่านั้นแต่ก็พบลักษณะของการสึกหรอแบบรุนแรงที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม และการสึกหรอแบบไม่รุนแรงที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม แสดงว่าช่วงระยะจากน้ำหนักกด 8 กิโลกรัม ถึง 12 กิโลกรัม มีค่าน้ำหนักกดที่เปลี่ยนการสึกหรอไม่รุนแรงเป็นแบบรุนแรง นอกจากนี้ในกรณีวัดการสึกหรอของชิ้นงานที่แข็งกว่าของคู่ชิ้นงานที่ทดสอบการเสียดสีนี้พบว่าอัตราการสึกหรอแบบรุนแรงที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม มีค่ามากกว่าอัตราการสึกหรอแบบไม่รุนแรงที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม 4.7 เท่า ความแตกต่างของอัตราการสึกหรอนี้มีค่าไม่มากเท่ากับกรณีวัดการสึกหรอจากชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยกว่าอย่างผลงานของ Eyre[7] เนื่องจากว่าชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งน้อยมีอัตราการสึกหรอที่มากกว่าชิ้นงานที่มีความแข็งมาก เมื่อทดสอบด้วยคู่เสียดสีและวิธีทดสอบชนิดเดียวกัน

เมื่อน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้นน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอก็เพิ่มขึ้น โดยการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม เป็น 8 กิโลกรัม ไม่มากเท่ากับเมื่อเพิ่มน้ำหนักกดจาก 8 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม เช่นที่ระยะทางการทดสอบการเสียดสี 3180 เมตร น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม และ น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ทำให้เกิดการสึกหรอไป 0.0313 กรัม 0.0498 กรัม และ 0.0892 กรัม ตามลำดับ การสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักกด 4 กิโลกรัมเป็น 8 กิโลกรัม คือ 0.0185 กรัม และการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจาก

ก)



ข)



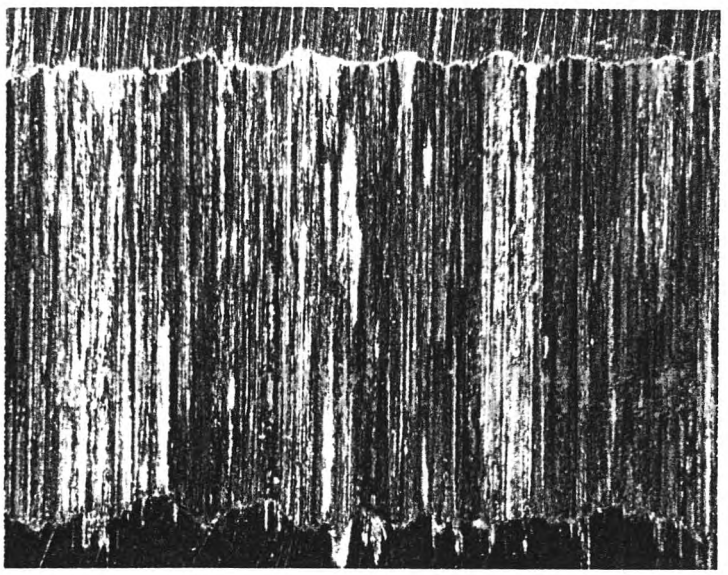
รูปที่ 4.2 ลักษณะการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว ที่ระยะทางการทดสอบ 3180 เมตร ความเร็วจาน 1.3 เมตรต่อวินาที ก) การสึกหรอแบบไม่รุนแรง (น้ำหนักกด 4 กก.) ข) การสึกหรอแบบรุนแรง (น้ำหนักกด 12 กก.) ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า

น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม คือ 0.0394 กรัม กล่าวได้ว่า น้ำหนักกดมีอิทธิพลต่อการสึกหรอ เมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นการสึกหรอเพิ่มขึ้น โดยที่น้ำหนักกดต่ำขนาด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอต่ำเพียง 0.0313 กรัม และ 0.0498 กรัม รอยเสียดสีมีลักษณะที่แคบและตื้น เมื่อทดสอบที่น้ำหนักกดสูงขนาด 12 กิโลกรัม น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอสูงถึง 0.0892 กรัม รอยเสียดสีมีลักษณะที่กว้างและลึกเพิ่มขึ้น มีความขรุขระมากกว่าที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม และ 8 กิโลกรัม ทั้งนี้การทดสอบที่น้ำหนักกดสูง 12 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบรุนแรงจึงมีน้ำหนักที่หายไปสูงถึง 0.0892 กรัม ขณะที่การทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัมและ 8 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบไม่รุนแรงมีน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่ากันมาก

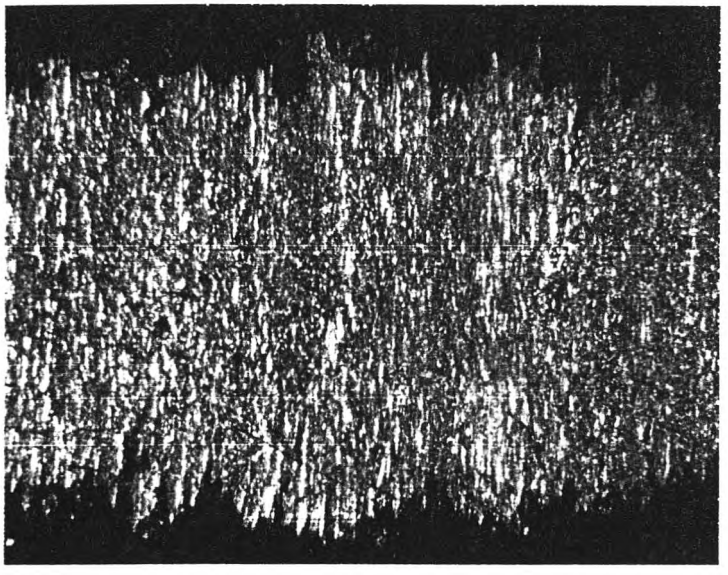
สำหรับกรณีการทดสอบแบบต่อเนื่องของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว ที่ระยะทางการทดสอบ 795 เมตร, 1590 เมตร, 2385 เมตร และ 3180 เมตร พบว่าที่น้ำหนักกดทั้ง 3 ค่า น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอกรณีการทดสอบแบบต่อเนื่องมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง เมื่อทำการศึกษาลักษณะรอยเสียดสีกรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ระยะทางการทดสอบ 3180 เมตร พบว่าลักษณะรอยเสียดสีเกิดร่องขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก) ขณะที่ลักษณะรอยเสียดสีกรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง พบว่ารอยเสียดสีมีความขรุขระ มีลักษณะการเกาะติดของเนื้อโลหะบริเวณรอยเสียดสี ซึ่งผิวที่ขรุขระหรือการเกาะติดนี้คงเป็นเป็นเนื้อโลหะจากจานดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข) การเสียดสีแบบต่อเนื่องนั้นเศษโลหะเศษคาร์ไบด์อาจสะสมอยู่ระหว่างผิวเหล็กกล้า D2 และจาน ความแข็งของเศษคาร์ไบด์นี้มีความแข็งมากกว่าเนื้อเหล็ก D2 ทำให้เกิดการเสียดสีจนผิวชิ้นงานเหล็กกล้า D2 สึกหรอเป็นร่องแบบ abrasive wear ในขณะที่การเสียดสีแบบเป็นช่วงนั้นไม่เกิดการสะสมของเศษโลหะเศษคาร์ไบด์ระหว่างผิวเหล็กกล้า D2 กับจาน ทำให้การสึกหรอบริเวณรอยเสียดสีมีลักษณะขรุขระและการเกาะติดของเนื้อโลหะไม่เป็นร่องเหมือนกรณีเสียดสีแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปที่มีหน่วยเป็นกรัมกับระยะทางการทดสอบการเสียดสีที่มีหน่วยเป็นเมตร ความเร็วเชิงเส้นการทดสอบของจานคือ 1.3 เมตรต่อวินาที จากการทดสอบการเสียดสีของชิ้นงานที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์กับระยะทางทดสอบกรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง ที่น้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม พบว่าน้ำหนักกดทั้ง 3 ค่า ในช่วงแรกของระยะทางทดสอบจาก 0 ถึง 1272 เมตร มีความเร็วของน้ำหนักที่หายไปต่อระยะทางการทดสอบเป็น 4.87×10^{-6} กรัมต่อเมตร, 7.63×10^{-6} กรัมต่อเมตร และ 9.28×10^{-6} กรัมต่อเมตรตามลำดับ ส่วนในช่วงของระยะทางการทดสอบจาก 1272 เมตร ถึง 3180 เมตร มีความเร็วของน้ำหนักที่หายไปต่อระยะทางการทดสอบเป็น 1.62×10^{-6} กรัมต่อเมตร, 2.41×10^{-6} กรัมต่อเมตร และ 4.41×10^{-6} กรัมต่อเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าการสึกหรอเร็วในช่วงแรกคือช่วงระยะทางการทดสอบจาก 0 ถึง 1272 เมตร และช้าลงในช่วงหลังตั้งแต่ระยะทางการทดสอบประมาณ 1272 เมตรขึ้นไป เนื่องจากรูปแบบการเสียดสีที่สัมผัสกันเป็นแบบ ชั้นเคลือบวาเนเดียม

ก)

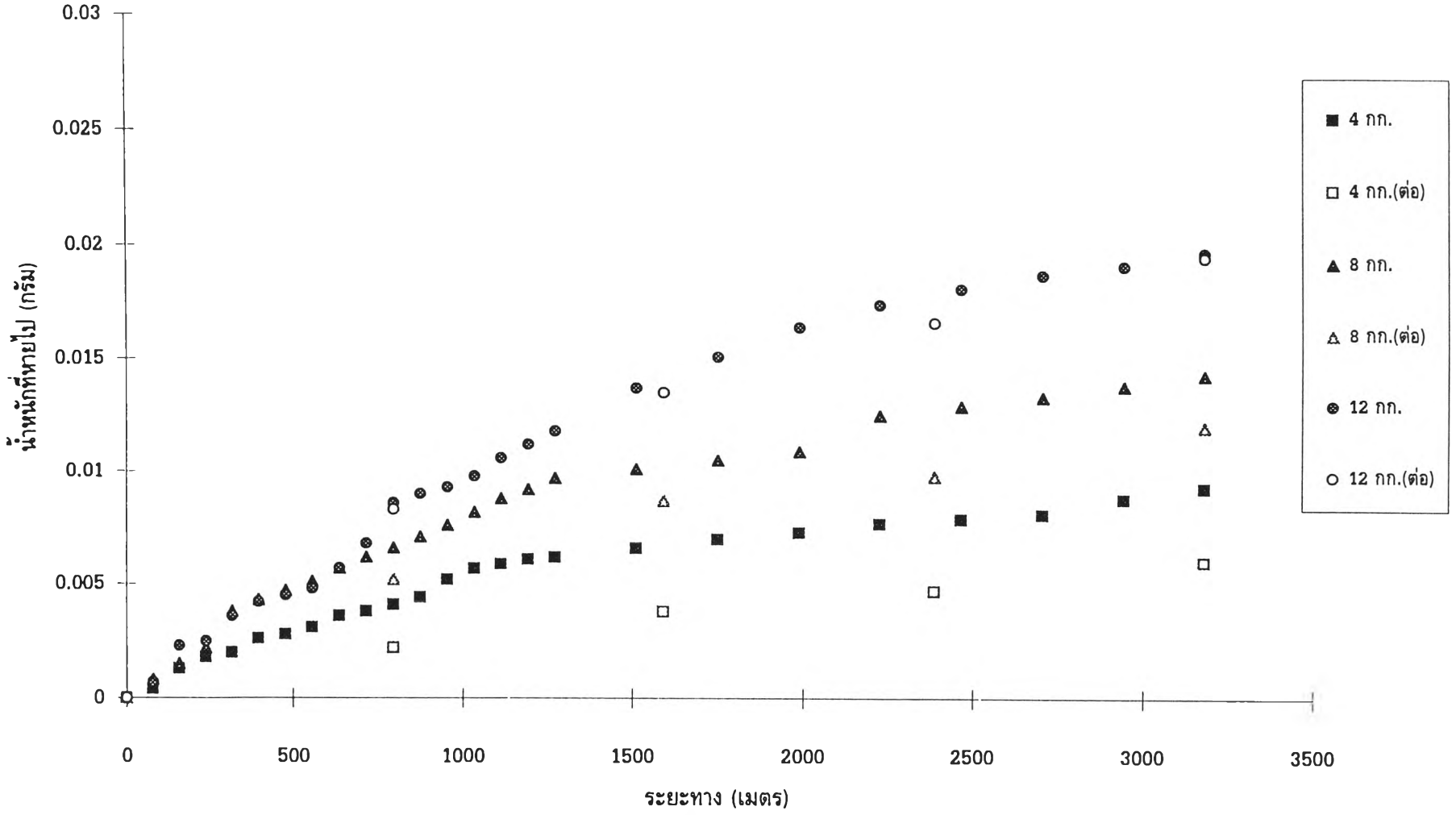


ข)



รูปที่ 4.3 ลักษณะการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ระยะทางการทดสอบ 3180 เมตร ความเร็วจาน 1.3 เมตรต่อวินาที

ก) การเสียดสีแบบต่อเนื่อง ข) การเสียดสีแบบเป็นช่วง ขนาดกำลังขยาย 0.67 เท่า



รูปที่ 4.4 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4, 8 และ 12 กิโลกรัม ความเร็วเชิงเส้นจาน 1.3 เมตรต่อวินาที

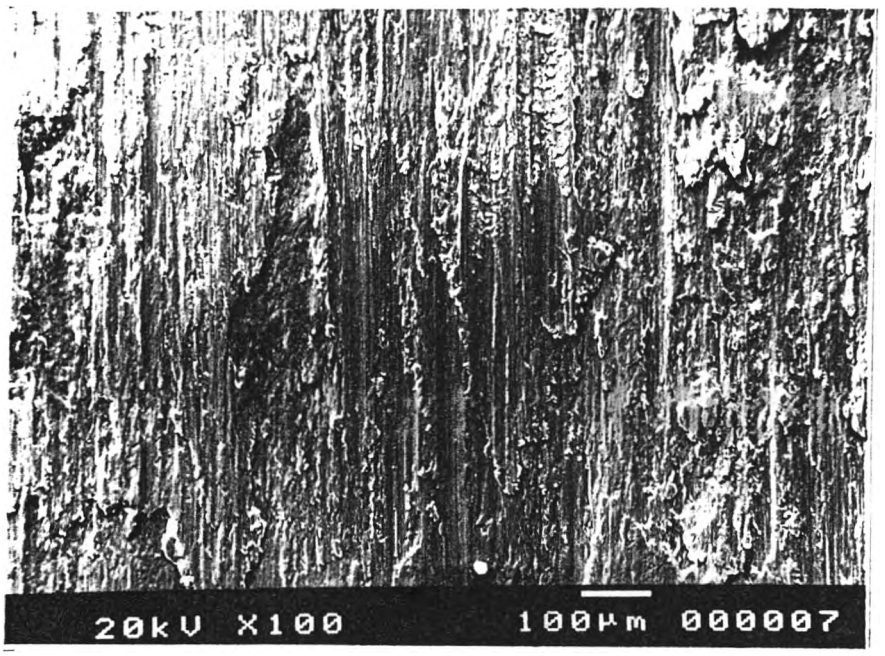
คาร์ไบด์-โลหะ ในขณะที่รูปแบบการเสียดสีงานของ Horst Czichos[6] เป็นแบบ โลหะ-โลหะ ดังนั้นพฤติกรรมการสึกหรอต่างกัน ปัจจัยหนึ่งเป็นเพราะว่าความแข็งของผิวเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์มีความแข็งมากกว่าเหล็กกล้า D2 มาก และอีกปัจจัยหนึ่งเป็นเพราะผิวเคลือบพวกคาร์ไบด์มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ กรณีผิวเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์นี้ น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นจาก 4 กิโลกรัม เป็น 8 กิโลกรัม ใกล้เคียงกับเมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้นจาก 8 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม เมื่อสิ้นสุดที่ระยะทดสอบ 3180 เมตร โดยที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม และน้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ทำให้เกิดการสึกหรอไป 0.0093 กรัม 0.0143 กรัม 0.0197 กรัม ตามลำดับ การสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจาก 4 กิโลกรัม เป็น 8 กิโลกรัม คือ 0.0050 กรัม การสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจาก 8 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม คือ 0.0054 กรัม จะพบว่าน้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ไม่เกิดการสึกหรอแบบรุนแรง เมื่อเทียบกับกรณีเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว จากการศึกษาของ Braza[10] พบว่าชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าเหล็กกล้าที่ไม่เคลือบผิว ดังนั้นชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์จึงลดแรงเสียดทานในการเสียดสีกับจานได้ดีกว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว การสึกหรอของชั้นเคลือบจึงเกิดขึ้นน้อยกว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว

ในกรณีการทดสอบแบบต่อเนื่องของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่ระยะทางทดสอบ 795 เมตร, 1590 เมตร, 2385 เมตร และ 3180 เมตร พบว่าน้ำหนักกดทั้ง 3 ค่า น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอน้อยกว่ากรณีการทดสอบแบบเป็นช่วงตลอดช่วงระยะทางการทดสอบทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดระยะทางทดสอบ 3180 เมตร การทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม และน้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ทำให้เกิดการสึกหรอไป 0.0060 กรัม 0.0120 กรัม และ 0.0195 กรัม ตามลำดับ การสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักกด 4 กิโลกรัมเป็น 8 กิโลกรัม คือ 0.0060 กรัม และการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักกด 8 กิโลกรัมเป็น 12 กิโลกรัม คือ 0.0075 กรัม การสึกหรอของชั้นเคลือบกรณีทดสอบแบบต่อเนื่องน้อยกว่ากรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง ซึ่งในกรณีการทดสอบแบบต่อเนื่องนั้นเศษคาร์ไบด์เกิดการสะสมระหว่างชิ้นงานกับจานทำให้การเสียดสีมีลักษณะคล้ายชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์เสียดสีกับเศษคาร์ไบด์ ในขณะที่กรณีการทดสอบแบบเป็นช่วงนั้นไม่เกิดการสะสมของเศษคาร์ไบด์ ลักษณะการเสียดสีจึงเป็นแบบชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์เสียดสีกับจานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 เนื่องจากว่าเศษคาร์ไบด์มีความแข็งมากกว่าจานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 มาก ดังนั้นลักษณะการสึกหรอจึงต่างกัน ซึ่งคู่เสียดสีระหว่างคาร์ไบด์กับคาร์ไบด์นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าคู่เสียดสีระหว่างคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า[11] จึงกล่าวได้ว่าการเสียดสีแบบต่อเนื่องมีลักษณะการเสียดสีเป็นแบบเศษคาร์ไบด์เสียดสีกับชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าการเสียดสีแบบเป็นช่วงที่มีลักษณะการเสียดสีเป็นแบบชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์เสียดสีกับจานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปจากสึกหรอของชั้นเคลือบกรณีการทดสอบแบบต่อเนื่องจึงน้อยกว่ากรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง

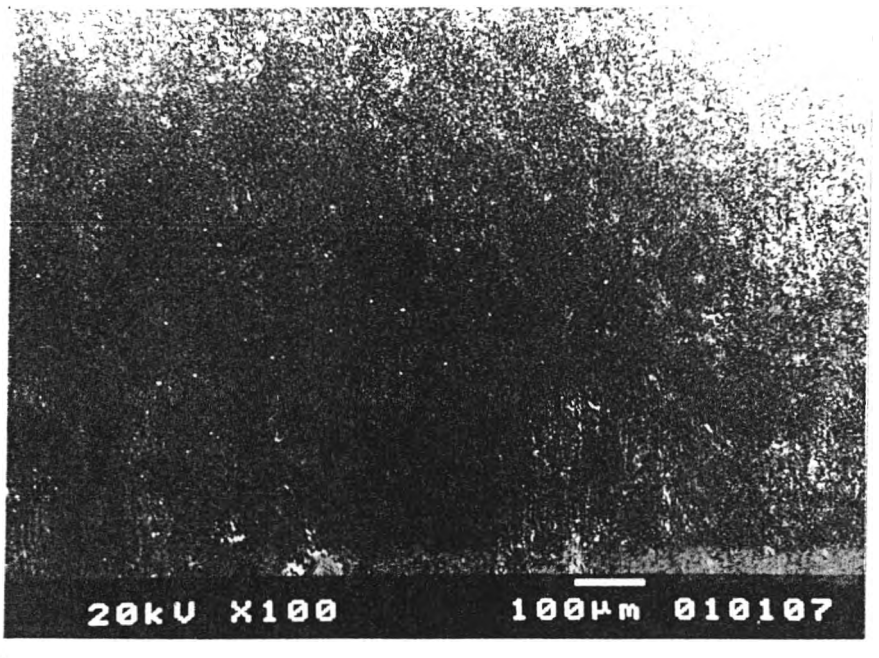
เมื่อทำการศึกษาลักษณะรอยเสียดสีของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ และเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด กรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็วเชิงเส้นจาน 1.3 เมตรต่อวินาที โดยศึกษาบริเวณกลางรอยเสียดสี พบว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว มีลักษณะพื้นผิวขรุขระและเกิดการแยกชั้นเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ก) ในขณะที่เหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ไม่เกิดการแยกชั้นขึ้นและพื้นผิวบริเวณรอยเสียดสีมีลักษณะที่เรียบกว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.5 ข) เนื่องจากชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์มีความแข็งมากกว่าเหล็กกล้าที่ไม่เคลือบผิวมากรวมทั้งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ ทำให้ชั้นเคลือบมีความต้านทานแรงเฉือนได้มากกว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว การสึกหรอที่เกิดขึ้นจึงน้อยกว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว

จากรูปที่ 4.1 เมื่อคำนวณอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวความเร็วเชิงเส้นของจาน คือ 1.3 เมตรต่อวินาที จากบริเวณที่มีความลาดเป็นเส้นตรงในช่วงระยะทางการทดสอบจาก 1272 เมตร ถึง 3180 เมตรได้ว่าที่น้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม ได้ค่าอัตราการสึกหรอเป็น $5.81x10^{-6}$, $9.34x10^{-5}$ และ $2.72x10^{-5}$ กรัมต่อเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อคำนวณอัตราการสึกหรอจากรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกรณีเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ ที่น้ำหนักกดชิ้นงานเป็น 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัมและ 12 กิโลกรัม ได้ค่าอัตราการสึกหรอเป็น $1.62x10^{-6}$, $2.41x10^{-6}$ และ $4.41x10^{-6}$ กรัมต่อเมตรตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.6 การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวเมื่อน้ำหนักกดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจาก 4 กิโลกรัมเป็น 12 กิโลกรัม ความเร็วการสึกหรอเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 4.7 เท่า การสึกหรอของเหล็กกล้าที่เคลือบผิว เมื่อน้ำหนักกดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจาก 4 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม ความเร็วการสึกหรอเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2.6 เท่า แสดงว่าน้ำหนักกดขนาด 12 กิโลกรัมมีอิทธิพลต่อเหล็กกล้า D2 ที่ไม่ได้เคลือบผิวมากกว่าชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ชั้นเคลือบลดอัตราการสึกหรอเมื่อน้ำหนักกดชิ้นงานเพิ่มขึ้นสูงจากน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม ซึ่งต่างจากเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว ที่อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเร็วในช่วงน้ำหนักกดชิ้นงาน 8 กิโลกรัม ถึง 12 กิโลกรัม ซึ่งจากคุณสมบัติของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่มีความแข็งมากและมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ ทำให้ความเร็วการสึกหรอจึงเพิ่มขึ้นไม่มากเท่ากับเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปที่มีหน่วยเป็นกรัมกับระยะทางการทดสอบการเสียดสีที่มีหน่วยเป็นเมตรโดยเปรียบเทียบการสึกหรอของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า D2 ที่ไม่ได้เคลือบผิว ด้วยความเร็วเชิงเส้นของจาน 1.3 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม จะเห็นว่าเมื่อระยะทางทดสอบการเสียดสีเท่ากัน น้ำหนักที่หายไปของชั้นเคลือบมีค่าน้อยกว่าเหล็กกล้าที่ไม่ได้เคลือบผิวในทุกกรณีของน้ำหนักกดชิ้นงาน ที่ระยะทางทดสอบ 3180 เมตร ที่น้ำหนักกด 4

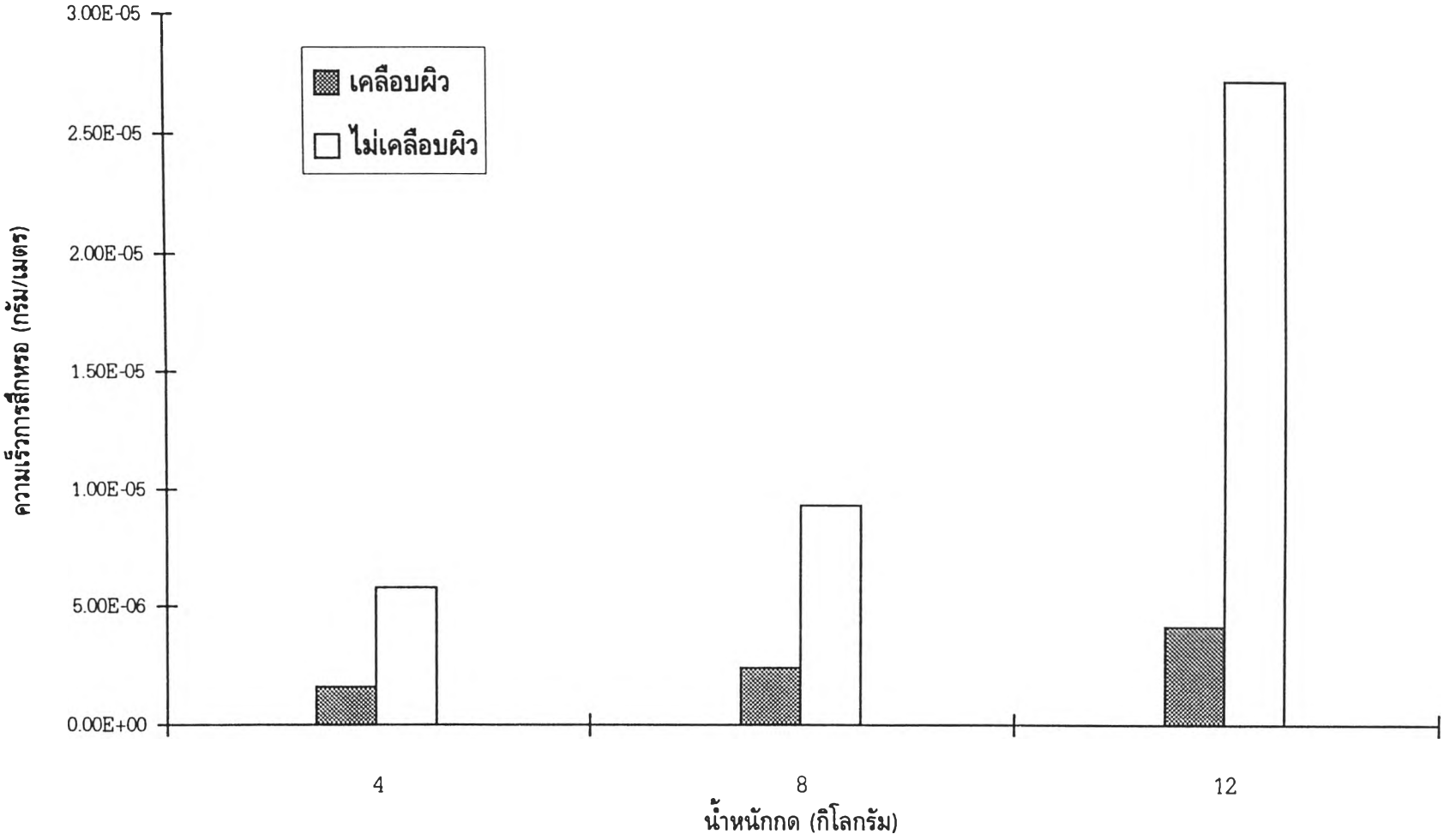


(ก) ไม่เคลือบผิว

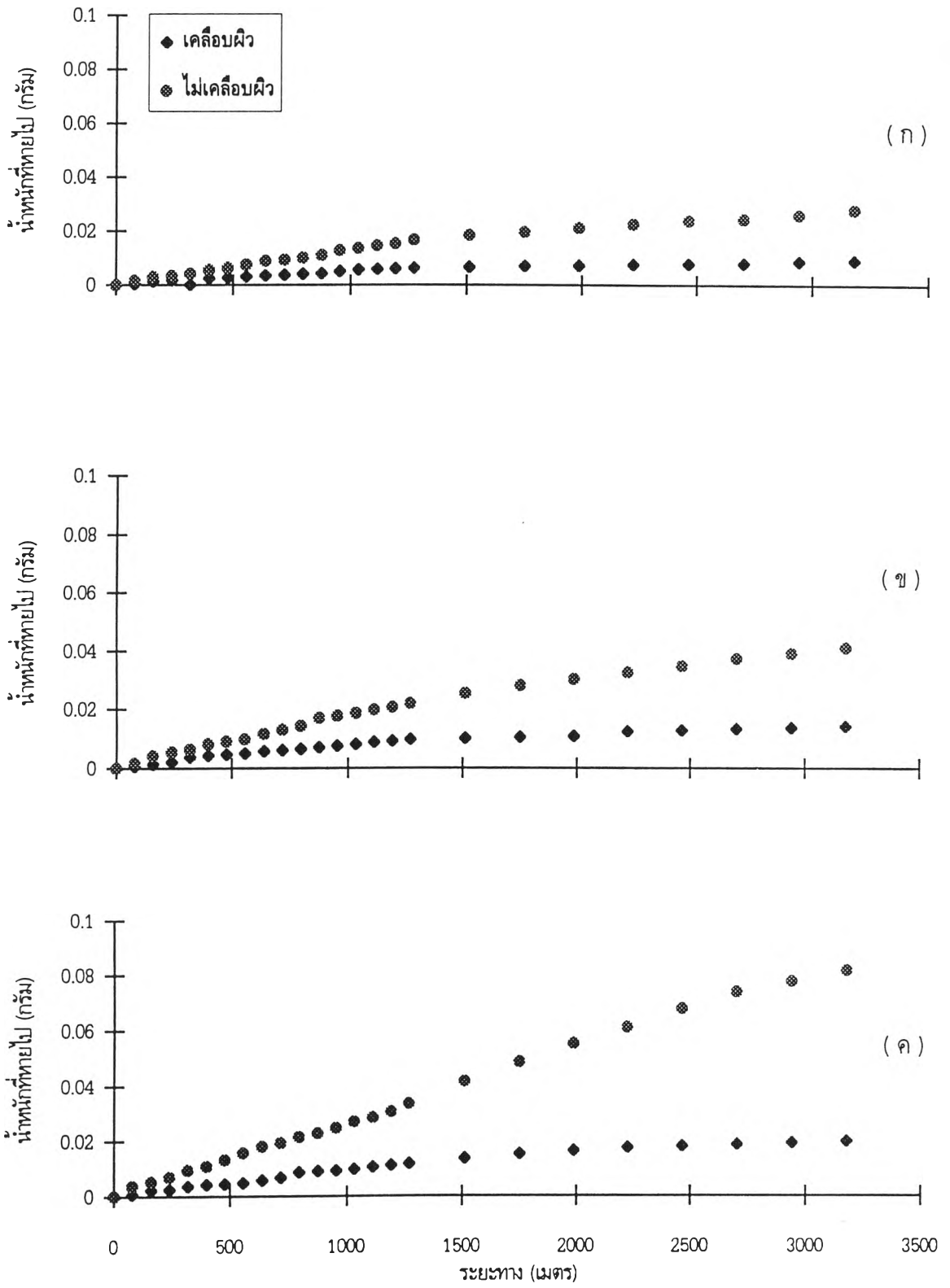


(ข) เคลือบผิว

รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ลักษณะบริเวณกลางรอยเสียดสีของเหล็กกล้า D2 ไม่เคลือบผิวและเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีการทดสอบเป็นช่วง ความเร็วจาน 1.3 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม
(ก) ไม่เคลือบผิว (ข) เคลือบผิว



รูปที่ 4.6 ความเร็วการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์และไม่เคลือบผิว สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 , 8 และ 12 กิโลกรัม ความเร็วจาน 1.3 เมตรต่อวินาที

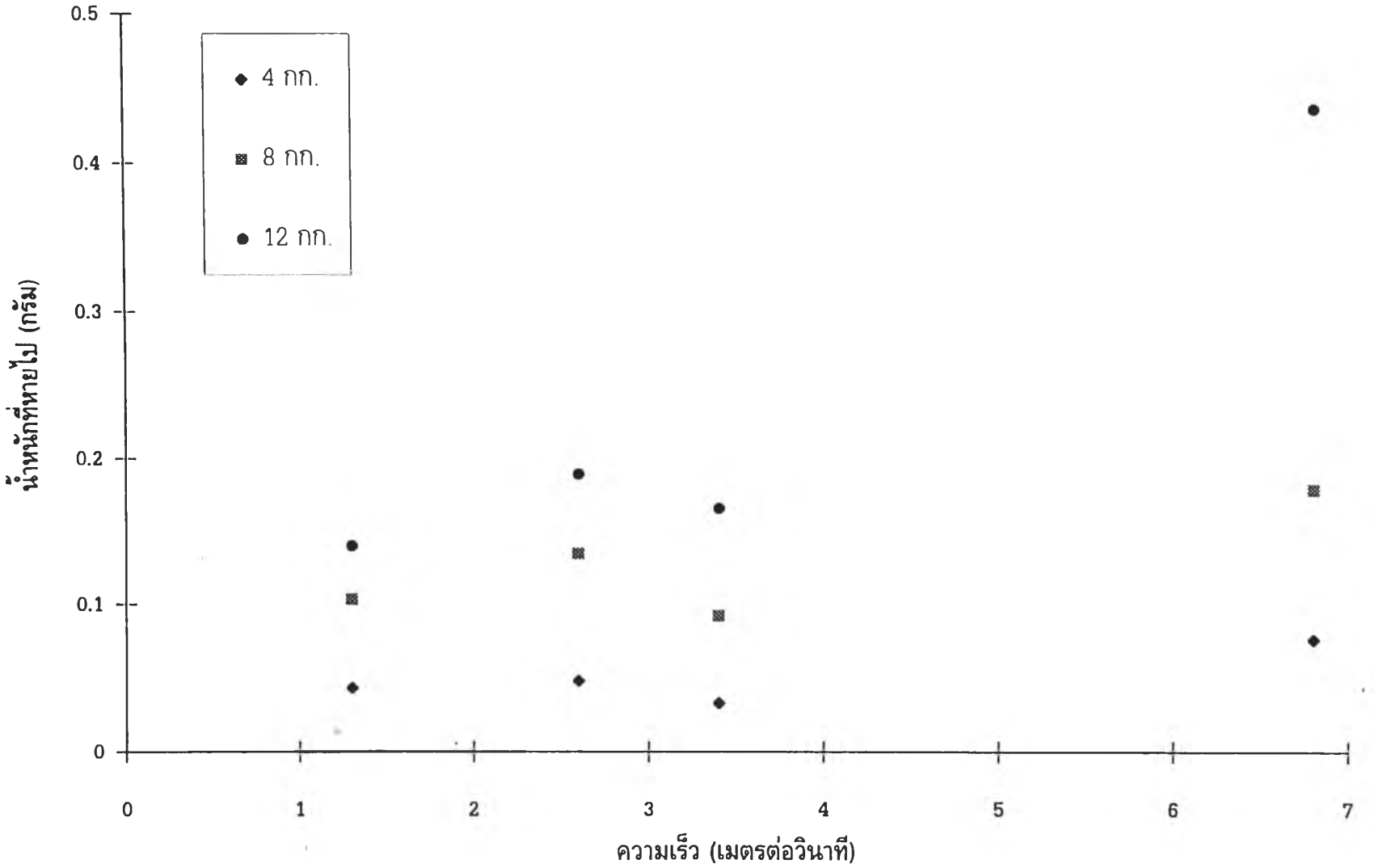


รูปที่ 4.7 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์และไม่เคลือบผิว สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด (ก) 4 กก., (ข) 8 กก. และ (ค) 12 กก. ความเร็วเชิงเส้นจาน 1.3 เมตรต่อวินาที กรณีการทดสอบแบบเป็นช่วง

กิโลกรัม น้ำหนักที่หายไปของเหล็กที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวเป็น 0.0093 กรัมและ 0.0281 กรัม ตามลำดับ การสึกหรอของเหล็กไม่เคลือบผิวคิดเป็น 3.0 เท่าของเหล็กเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ ที่น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม น้ำหนักที่หายไปของเหล็กที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ และไม่เคลือบผิวเป็น 0.0143 กรัม และ 0.0410 กรัมตามลำดับ การสึกหรอของเหล็กไม่เคลือบผิวคิดเป็น 2.9 เท่าของเหล็กเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ และ ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม น้ำหนักที่หายไปของเหล็กที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวเป็น 0.0197 กรัม และ 0.0819 กรัมตามลำดับ การสึกหรอของเหล็กไม่เคลือบผิวคิดเป็น 4.2 เท่าของเหล็กเคลือบผิว จะเห็นว่าที่น้ำหนักกดสูง 12 กิโลกรัม เกิดการสึกหรอแบบรุนแรง ขณะที่ชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ไม่เกิดการสึกหรอแบบรุนแรง ดังนั้นการสึกหรอของเหล็กกล้าที่ไม่เคลือบผิวมีค่ามากกว่าเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์มาก เมื่อเทียบกับที่น้ำหนักกดต่ำ 4 กิโลกรัม ทั้งนี้แสดงว่าชั้นเคลือบที่เป็นชั้นวาเนเดียมคาร์ไบด์สามารถต้านทานการสึกหรอที่น้ำหนักกดขนาด 12 กิโลกรัม ได้ดีโดยชั้นเคลือบป้องกันการสึกหรอด้วยการช่วยลดแรงเสียดทาน มีความต้านทานแรงเฉือนที่กระทำกับพื้นผิวสัมผัส

4.2 อิทธิพลของความเร็วจานต่อการสึกหรอ

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปที่มีหน่วยเป็นกรัมกับความเร็วเชิงเส้นของจานที่มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที โดยการทดสอบแบบต่อเนื่องของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวที่น้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม โดยทดสอบเป็นระยะทางเสียดสี 8250 เมตร ด้วยความเร็วเชิงเส้นจาน 1.3, 2.6, 3.4 และ 6.8 เมตรต่อวินาที จะพบว่าที่ความเร็วเชิงเส้นจาน 6.8 เมตรต่อวินาที การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ต่างก็มีค่ามากกว่าที่ความเร็วอื่นๆ สำหรับน้ำหนักกดทั้ง 3 ค่าคือ 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม มีการสึกหรอสูงมากถึง 0.4368 กรัม ที่ความเร็ว 6.8 เมตรต่อวินาทีนี้เมื่อเทียบกับความเร็ว 3.4, 2.6 และ 1.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งน้ำหนักที่หายไปเป็น 0.1662, 0.1895 และ 0.1401 กรัมตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นว่าที่ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาทีมีการสึกหรอลดลงเมื่อเทียบกับความเร็วอีก 3 ค่า ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าที่ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาที ผิวเหล็กกล้า D2 เกิดชั้นออกไซด์ของเหล็กขึ้นได้ดีทำให้ลดอัตราการสึกหรอลงได้[3] ซึ่งสอดคล้องกับงานของ N.Saka และคณะ[9] แม้ว่าที่ความเร็วมากกว่า 1.3 เมตรต่อวินาที และ 2.6 เมตรต่อวินาที ซึ่งผิวเหล็กยังเป็นเนื้อโลหะมากกว่าเป็นออกไซด์ของโลหะจึงมีการสึกหรอมากกว่า อย่างไรก็ดีที่ความเร็วสูงสุด 6.8 เมตรต่อวินาที การสึกหรอมีค่ามากที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม นั้นอาจเป็นไปได้ว่าที่น้ำหนักกดและความเร็วจานสูงขนาดนี้ชั้นออกไซด์ไม่สามารถเกิดขึ้นมาต้านทานการสึกหรอออกไปของเนื้อโลหะได้ทัน การสึกหรอจึงเกิดขึ้นได้เร็ว[12] เมื่อพิจารณาการทดสอบที่ความเร็วจานต่ำขนาด 1.3 เมตรต่อวินาที การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดจาก 4 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.0437 กรัมเป็น 0.1401 กรัม การ



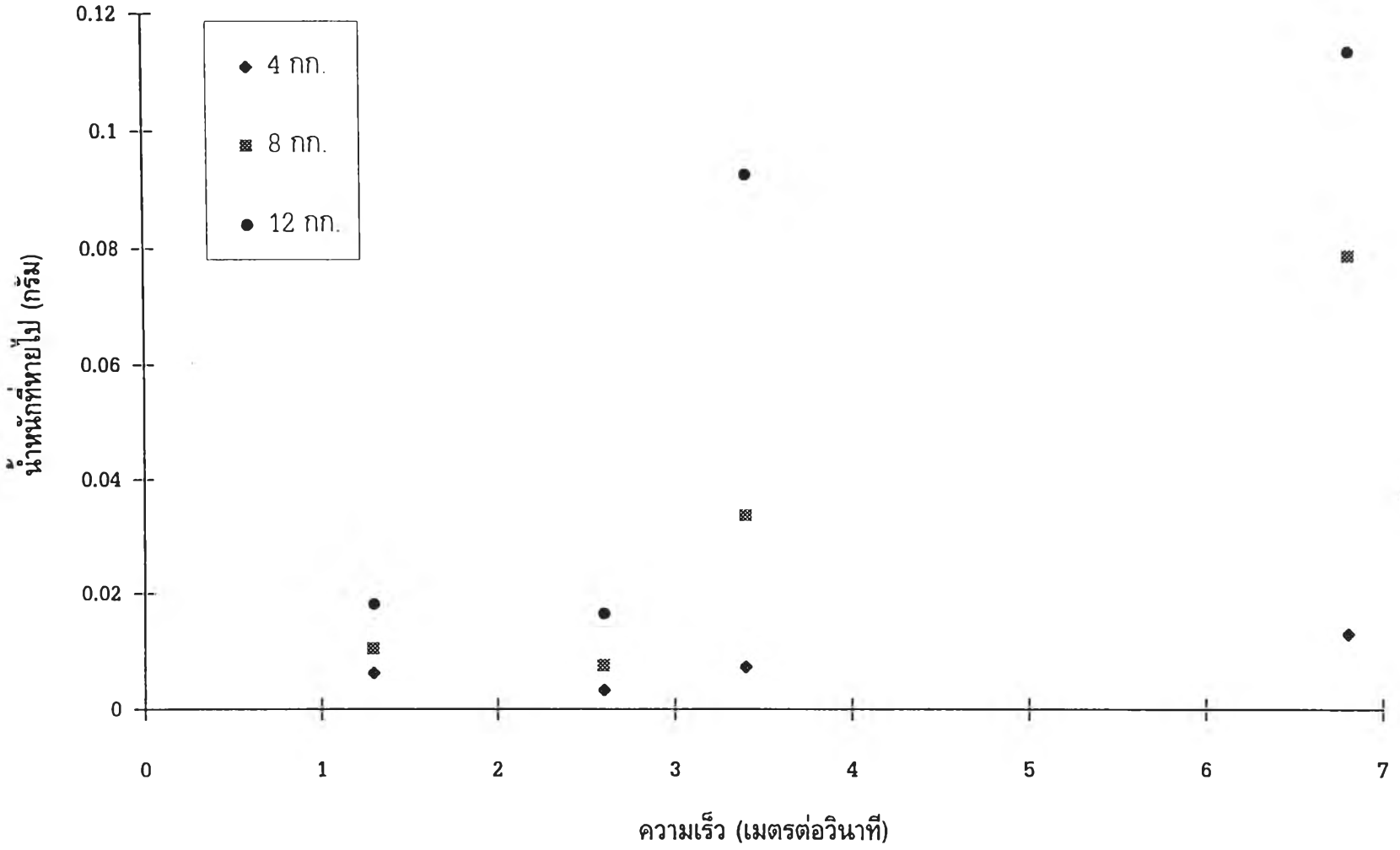
รูปที่ 4.8 การสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ระยะทางการทดสอบ 8250 เมตร

สึกหรอเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 3.2 เท่า ขณะที่การทดสอบที่น้ำหนักกดต่ำขนาด 4 กิโลกรัม การเพิ่มขึ้นของความเร็วจานจาก 1.3 เมตรต่อวินาที เป็น 6.8 เมตรต่อวินาที การสึกหรอเพิ่มขึ้นจาก 0.0437 กรัม เป็น 0.0769 กรัม การสึกหรอเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 1.8 เท่า เป็นการแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักกดมีอิทธิพลต่อความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวมากกว่าความเร็วจาน

ตารางที่ 4.1 หนักที่หายไปเมื่อระยะทางทดสอบ 8250 เมตร

ชนิดชิ้นงาน	น้ำหนักกด (กิโลกรัม)	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)			
		1.3 (ม/วินาที)	2.6 (ม/วินาที)	3.4 (ม/วินาที)	6.8 (ม/วินาที)
เหล็กกล้า	4	0.0437	0.0485	0.0333	0.0769
D2 ไม่	8	0.1036	0.1349	0.0926	0.1792
เคลือบผิว	12	0.1401	0.1895	0.1662	0.4368
เหล็กกล้า	4	0.0063	0.0033	0.0073	0.013
เคลือบผิว	8	0.0105	0.0076	0.0338	0.0789
VC	12	0.0182	0.0165	0.0926	0.1136

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปที่มีหน่วยเป็นกรัมกับความเร็วเชิงเส้นของจานที่มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ระยะทางการทดสอบการเสียดสี 8250 เมตร โดยการทดสอบการเสียดสีเป็นการทดสอบแบบต่อเนื่องของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ด้วยความเร็วเชิงเส้นจาน 1.3, 2.6, 3.4 และ 6.8 เมตรต่อวินาทีด้วยน้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม พบว่าการสึกหรอที่ความเร็ว 2.6 เมตรต่อวินาทีมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็ว 1.3 เมตรต่อวินาทีเล็กน้อย แต่การสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อความเร็วเป็น 3.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปสำหรับน้ำหนักกด 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม การสึกหรอมีค่าน้อยที่สุดเมื่อความเร็วเป็น 2.6 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่ความเร็วสูงขึ้นการสึกหรอของชั้นเคลือบเกิดได้ง่ายขึ้น หากพิจารณาการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดจาก 8 กิโลกรัม เป็น 12 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 2.6 เมตรต่อวินาที การสึกหรอของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 0.0076 กรัม เป็น 0.0165 กรัม การสึกหรอเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2.2 เท่า แต่ที่น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม การเพิ่มความเร็วจาก 2.6 เมตรต่อวินาที เป็น 3.4 เมตรต่อวินาที การสึกหรอเพิ่มจาก 0.0076 กรัม เป็น 0.0338 กรัม การสึกหรอเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 4.4 เท่า เป็นการแสดงให้เห็นว่าความเร็วจานมีอิทธิพลต่อความต้านทานการสึกหรอของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์มากกว่าน้ำหนักกด



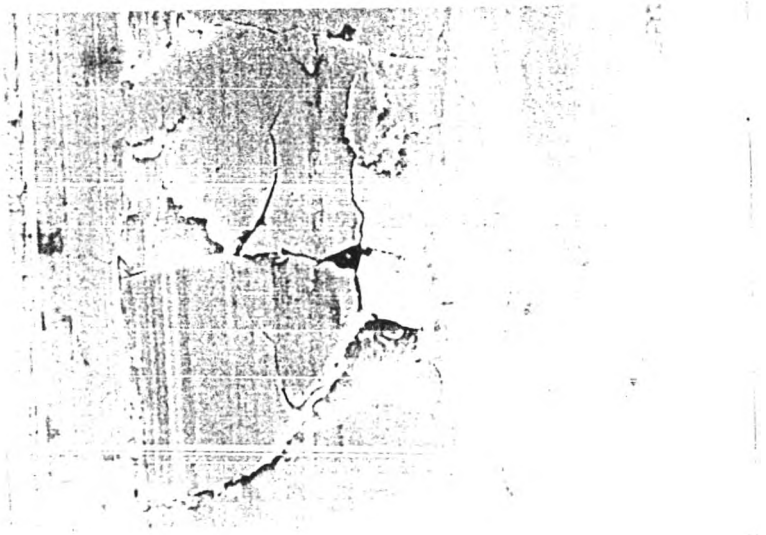
รูปที่ 4.9 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กก., 8 กก. และ 12 กก. ระยะทางการทดสอบ 8250 เมตร

เมื่อศึกษาลักษณะรอยเสียดสีของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์และเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว บริเวณที่ความเร็วการเสียดสีสูง 3.4 เมตรต่อวินาทีและ 6.8 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกด 8 กิโลกรัม และ 12 กิโลกรัม พบว่าลักษณะรอยเสียดสีของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว มีลักษณะเป็นร่อง เนื่องจากเศษโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าสัมผัสของคู่เสียดสี ทำหน้าที่เป็นเศษอนุภาค abrasive ระหว่างหน้าสัมผัส รอยเสียดสีที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นร่อง รวมทั้งยังพบบริเวณที่เกิดการแยกชั้นและเกิดการแตกขึ้น แสดงว่าพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีทั้งการสึกหรอแบบ adhesive wear และ abrasive wear ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ส่วนเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ พบลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นรุนแรงน้อยกว่าเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว แต่ก็พบรอยแตกเกิดขึ้นภายหลังการทดสอบการเสียดสีดังแสดงในรูปที่ 4.11 กล่าวได้ว่าเมื่อน้ำหนักกดและความเร็วเปลี่ยนไป พฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะที่ต่างกัน โดยกรณีความเร็วต่ำแรงเฉือนที่กระทำบริเวณพื้นผิวสัมผัสส่วนที่นูนต่ำการสึกหรอเกิดน้อย แต่กรณีความเร็วสูงแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสึกหรอได้ง่ายบริเวณพื้นผิวสัมผัสส่วนที่นูน แรงเฉือนนี้มากพอที่จะเฉือนให้พื้นที่ส่วนที่นูนเกิดการแตกหักออกมาในรูปของเศษโลหะ ยิ่งเมื่อมีน้ำหนักกดที่มากช่วยเสริมที่ความเร็วสูงการแตกก็เกิดขึ้นได้ง่าย ดังนั้นจึงพบลักษณะการแตกเกิดขึ้นภายในรอยเสียดสี กรณีการทดสอบที่ความเร็วสูง น้ำหนักกดสูง

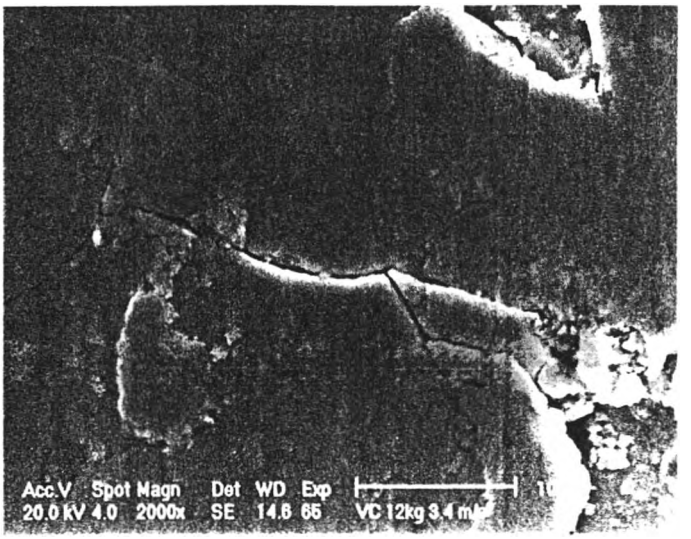
เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุบริเวณรอยเสียดสีภายหลังจากการทดสอบการเสียดสีโดยการทำ X-ray mapping แสดงธาตุวาเนเดียมและธาตุเหล็กเพื่อศึกษาลักษณะชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ พบว่ากรณีน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอเป็น 0.0063 กรัม และ 0.0033 กรัม ที่สภาวะการทดสอบน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 1.3 เมตรต่อวินาทีและ 2.6 เมตรต่อวินาทีตามลำดับนั้นยังคงมีชั้นเคลือบเหลืออยู่หลังจากการเสียดสี ดังจะเห็นได้จากลักษณะการกระจายตัวของธาตุวาเนเดียมและธาตุเหล็กในรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นกรณีน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอเป็น 0.0033 กรัม โดยรูปที่ 4.12 ก) แสดงพื้นที่ส่วนบนที่มีสีขาวและสว่างกว่าซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่ถูกเสียดสี ส่วนพื้นที่ด้านล่างที่มีสีดำกว่าพื้นที่ด้านบนนั้นเป็นบริเวณพื้นที่ที่ถูกเสียดสี รูปที่ 4.12 ข) แสดงลักษณะการกระจายตัวของธาตุเหล็กพบว่ามีธาตุเหล็กน้อยบริเวณพื้นที่ที่ไม่ถูกเสียดสี แต่มีธาตุเหล็กมากบริเวณรอยต่อของรอยเสียดสีระหว่างพื้นที่ด้านบนและด้านล่าง บริเวณด้านล่างสุดมีธาตุเหล็กน้อยเป็นบริเวณพื้นที่ถูกเสียดสี รูปที่ 4.12 ค) แสดงลักษณะการกระจายตัวของธาตุวาเนเดียม ซึ่งพบว่ามีธาตุวาเนเดียมมากบริเวณพื้นที่ที่ไม่ถูกเสียดสี มีธาตุวาเนเดียมน้อยบริเวณรอยต่อของรอยเสียดสีระหว่างพื้นที่ด้านบนและพื้นที่ด้านล่างและมีธาตุวาเนเดียมมากบริเวณพื้นที่ที่ถูกเสียดสี เมื่อดูจากภาคตัดขวางของรอยเสียดสีเพื่อดูลักษณะของชั้นเคลือบพบว่าชั้นเคลือบถูกเสียดสีหลุดออกไปบ้างบริเวณขอบรอยเสียดสีตามตำแหน่งของลูกศรชี้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ก) ส่วนรูปที่ 4.13 ข) แสดงภาพขยายชั้นเคลือบบริเวณที่ถูกเสียดสีหลุดออกไปขนาด 1000 เท่า

(ก)

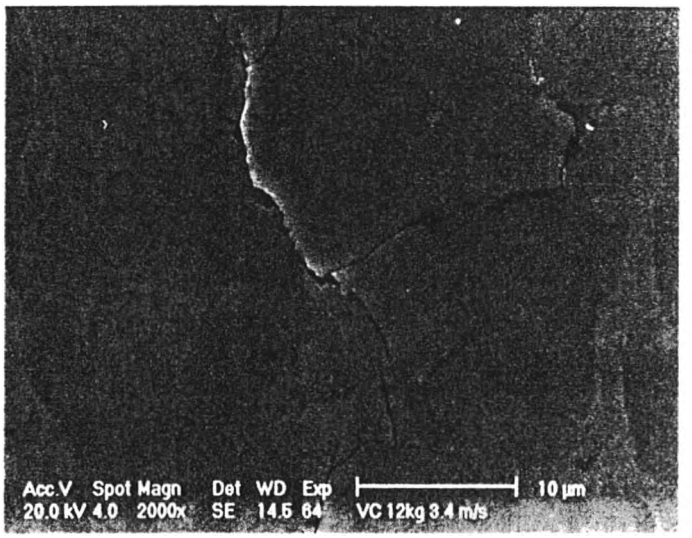
(ข)



รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ลักษณะบริเวณกลางรอยเสียดสีของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิว กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง ความเร็วจาน 6.8 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ระยะทดสอบ 8250 เมตร
(ก) ลักษณะการเกิดร่อง, (ข) ลักษณะการแตก



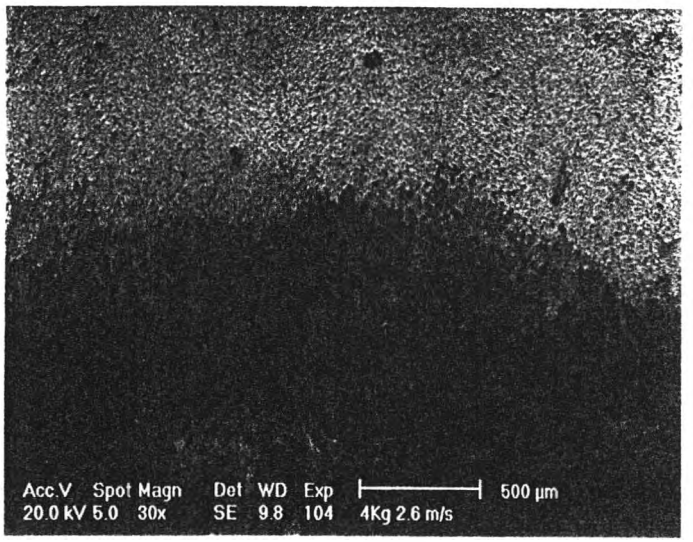
ลักษณะการแตกบริเวณกลางรอยเสียดสี



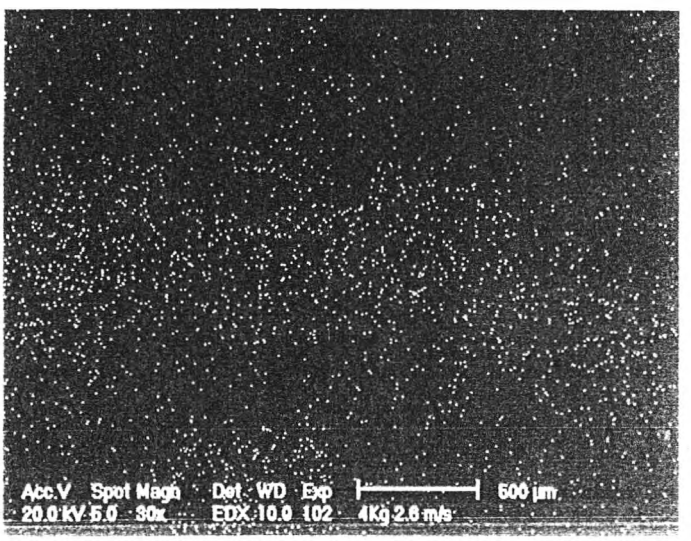
ลักษณะการแตกบริเวณกลางรอยเสียดสี

รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ลักษณะบริเวณกลางรอยเสียดสีของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง ความเร็วจาน 3.4 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ระยะทดสอบ 8250 เมตร

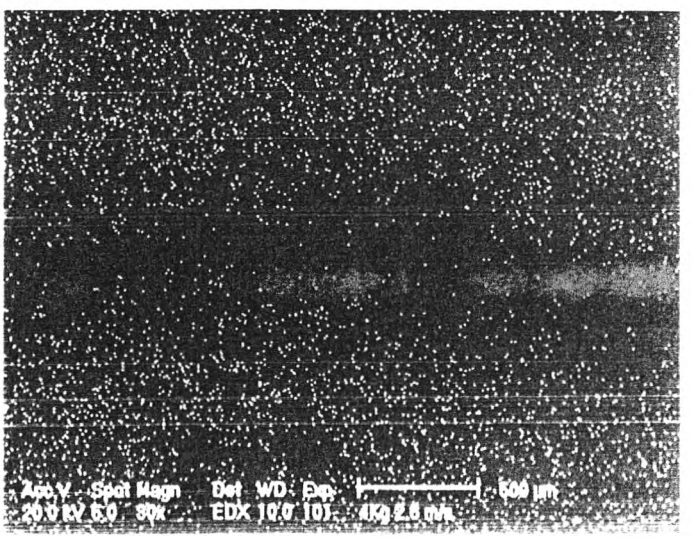
ก)



ข)

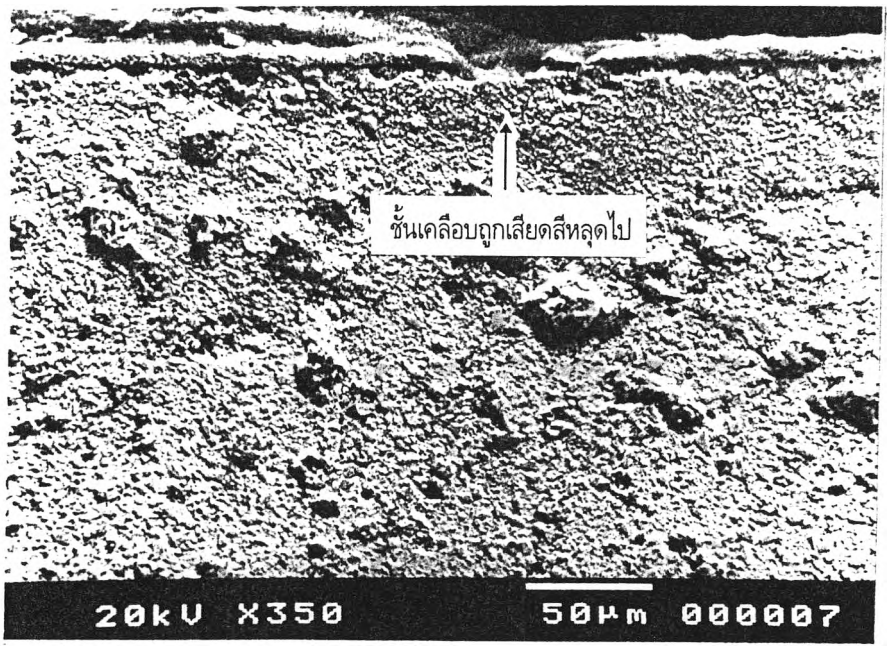


ค)

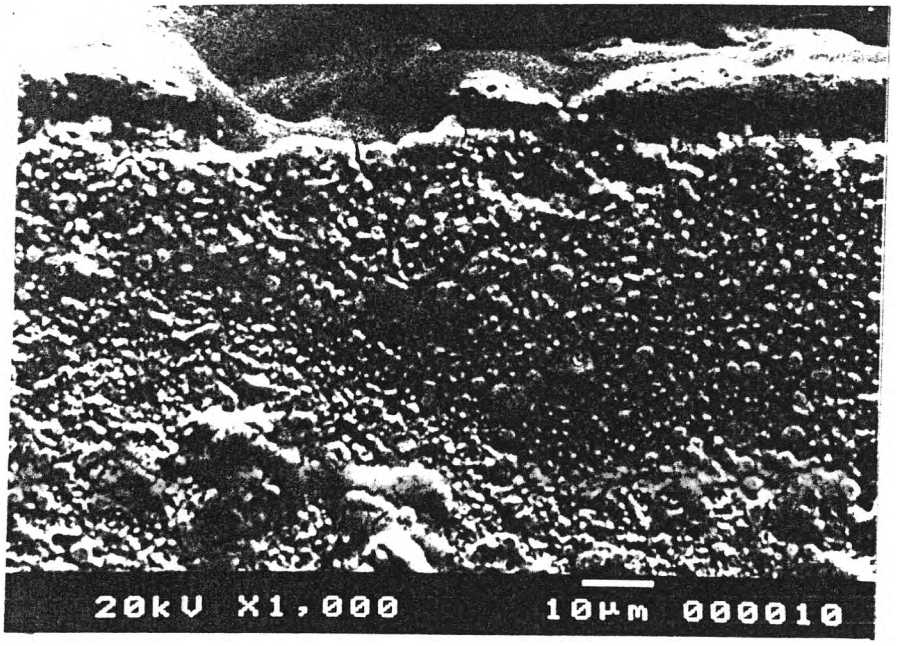


รูปที่ 4.12 ลักษณะการวิเคราะห์ธาตุของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0033 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็วจาน 2.6 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร
ก) บริเวณขอบรอยเสียดสี ข) ธาตุเหล็ก ค) ธาตุวาเนเดียม

ก)



ข)

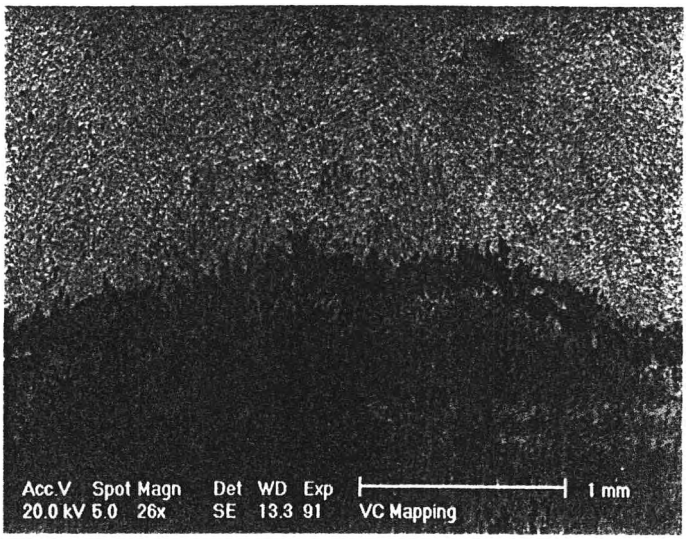


รูปที่ 4.13 ลักษณะภาคตัดขวางของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0033 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 2.6 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร
ก) ชั้นเคลือบถูกเสียดสีหลุดไป ข) ภาพกำลังขยาย 1000 เท่า.

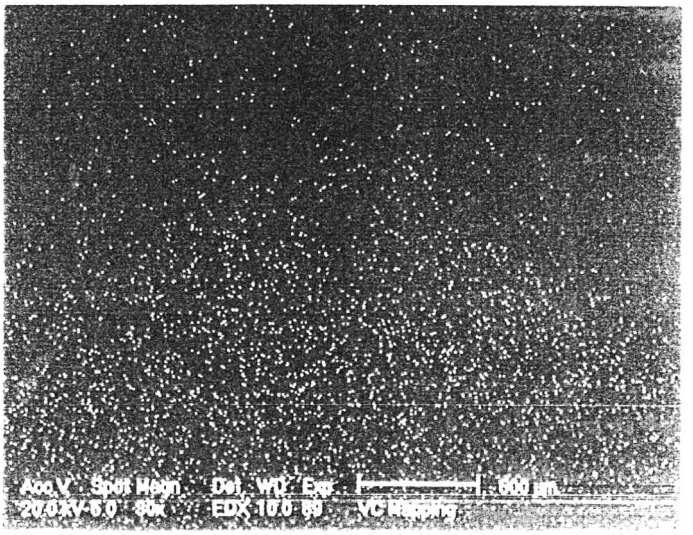
ในกรณีน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอเป็น 0.0073 กรัม ที่สภาวะการทดสอบน้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาทีนั้น ชั้นเคลือบถูกเสียดสีออกไปหลังจากการทดสอบ ดังจะเห็นได้จากลักษณะการกระจายตัวของธาตุเหล็กและวาเนเดียมในรูปที่ 4.14 โดยรูปที่ 4.14 ก) แสดงพื้นที่ส่วนบนที่มีสีขาวและสว่างกว่าซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่ถูกเสียดสี ส่วนพื้นที่ด้านล่างที่มีสีดำกว่าเป็นบริเวณพื้นที่ที่ถูกเสียดสี รูป 4.14 ข) แสดงลักษณะการกระจายตัวของธาตุเหล็ก พบว่ามีธาตุเหล็กน้อยบริเวณพื้นที่ที่ไม่ถูกเสียดสี มีธาตุเหล็กมากบริเวณพื้นที่ที่ถูกเสียดสี รูปที่ 4.14 ค) แสดงลักษณะการกระจายตัวของธาตุวาเนเดียม พบว่ามีธาตุวาเนเดียมมากบริเวณพื้นที่ที่ไม่ถูกเสียดสี มี ธาตุวาเนเดียมน้อยบริเวณพื้นที่ที่ถูกเสียดสี เมื่อดูจากภาคตัดขวางของรอยเสียดสีทั้งด้านขาเข้าและด้านขาออกพบว่าชั้นเคลือบถูกเสียดสีออกไป โดยด้านขาเข้าตามตำแหน่งที่ลูกศรชี้แสดงในรูปที่ 4.15 ก) นั้นชั้นเคลือบสึกหรอในลักษณะที่ถูกเสียดสีออกไป ส่วนรูปที่ 4.15 ข).แสดงภาพขยายบริเวณขอบรอยต่อของชั้นเคลือบบริเวณที่ถูกเสียดสีและไม่ถูกเสียดสีขนาด 1000 เท่า ส่วนลักษณะของการสึกหรอของชั้นเคลือบด้านขาออกนั้นลักษณะการสึกหรอของชั้นเคลือบจะค่อยๆบางลงจนหมดไปดังแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อศึกษาลักษณะชั้นเคลือบบริเวณกลางรอยเสียดสีพบว่าไม่มีชั้นเคลือบเหลืออยู่อย่างเช่นกรณีน้ำหนักที่หายไปเป็น 0.0073 กรัมที่แสดงในรูปที่ 4.17 ก) ขณะที่ลักษณะชั้นเคลือบที่สึกหรอมีลักษณะขรุขระบางลงเหลือติดอยู่กับเนื้อเหล็ก D2 บริเวณกลางรอยเสียดสีอย่างเช่นกรณีน้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอเป็น 0.0063 กรัมที่แสดงในรูป 4.17 ข) พอจะกล่าวได้ว่าในช่วงน้ำหนักที่หายไปจาก 0.0063 กรัม และ 0.0073 กรัม เป็นช่วงที่ชั้นเคลือบถูกเสียดสีออกไปจนเห็นเนื้อโลหะพื้นที่อยู่ด้านล่าง

ดังนั้นลักษณะการสึกหรอของชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ ที่เสียดสีกับจานที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 ด้วยวิธีการทดสอบแบบ block on ring คือชั้นเคลือบเริ่มเกิดการสึกหรอขึ้นเมื่อผิวเคลือบเสียดสีกับจาน โดยรอยเสียดสีชั้นเคลือบขยายกว้างและลึกตามระยะทางการทดสอบ สามารถแบ่งบริเวณการสึกหรอเป็นด้านขาเข้า กลาง และด้านขาออก โดยชั้นเคลือบบริเวณรอยเสียดสีด้านขาเข้าอาจจะเกิดการแตก[10] แต่ยังไม่หลุดออก ส่วนชั้นเคลือบบริเวณกลางรอยเสียดสีมีลักษณะขรุขระและบาง รอยเสียดสีด้านขาออกเกิดการสึกหรอค่อยๆบางลงจนหมดไป เมื่อถูกเสียดสีต่อไปที่ด้านขาเข้าที่เกิดการแตกอยู่แล้วหลุดออกบ้างสังเกตได้จากรูปที่ 4.13 ส่วนกลางรอยเสียดสีชั้นเคลือบถูกเสียดสีออกไปจนเห็นเนื้อโลหะพื้นและรอยเสียดสีด้านขาออกมีพื้นที่ที่สัมผัสกับจานเพิ่มขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นรอยโค้งตามจาน ถึงแม้ว่าบริเวณกลางรอยเสียดสีของชั้นเคลือบถูกเสียดสีไปหมดแล้วแต่พื้นที่สัมผัสด้านข้างของชั้นเคลือบบริเวณขอบรอยเสียดสีกับจานช่วยชะลอการสึกหรอของเนื้อโลหะพื้นได้ ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากความแข็งของชั้นเคลือบที่แข็ง 2630 วิกเกอร์ ซึ่งแข็งกว่าจานเหล็ก AISI 1020 ที่มีความแข็งเพียง 260 วิกเกอร์ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชั้นเคลือบมีค่าต่ำประมาณ 0.050 - 0.055 [10] ทำให้การสึกหรอของชั้นเคลือบเกิดขึ้นน้อย นอกจากนี้การยึดเกาะกับเนื้อโลหะพื้นได้ดีของชั้นเคลือบทำให้ชั้นเคลือบที่แตกยังเกาะติดแน่นกับโลหะพื้น ไม่ค่อยหลุดออกไปหรือหลุดออกไปน้อย แม้ว่าชั้นเคลือบบางส่วนจะถูกเสียดสีจนเห็นเนื้อโลหะพื้น ส่วนที่เหลืออยู่ก็ยังคงเกาะติดแน่น

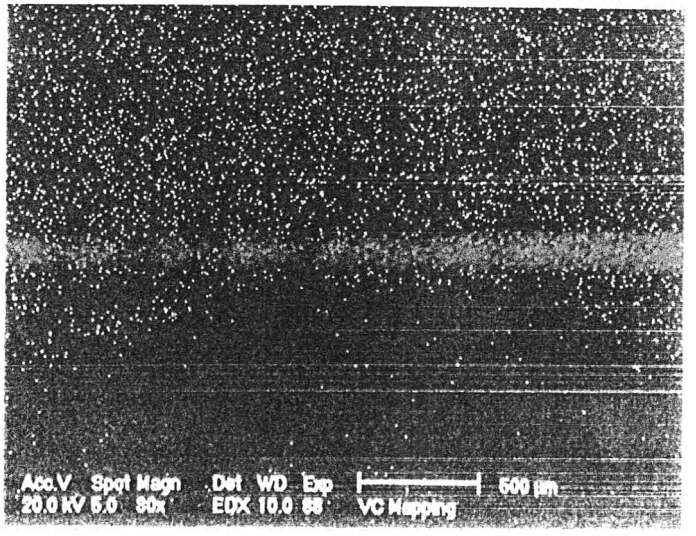
ก)



ข)



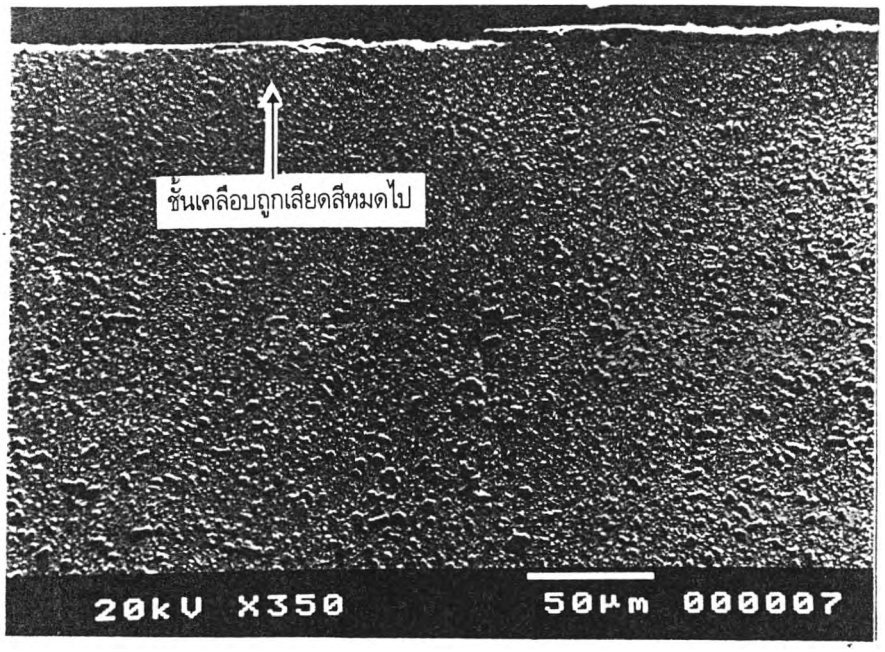
ค)



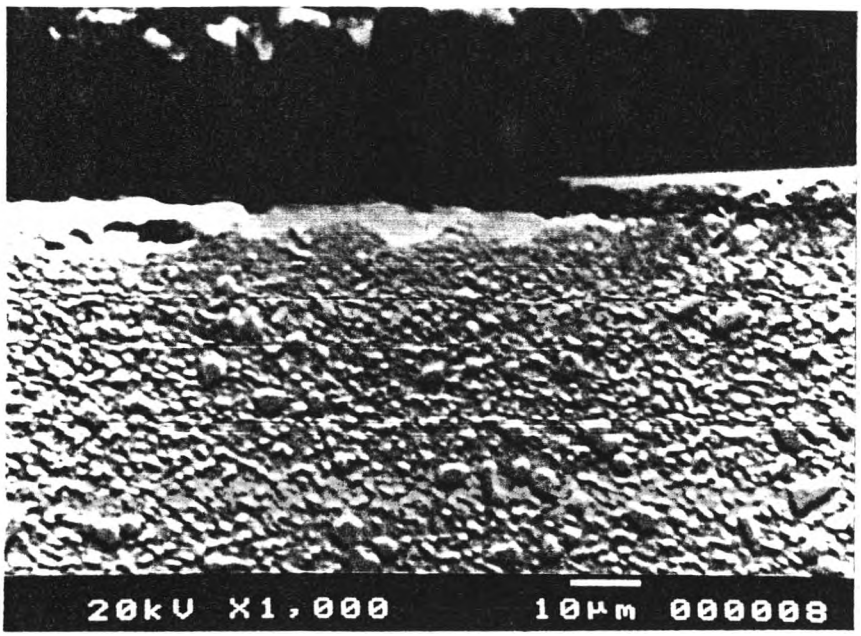
รูปที่ 4.14 ลักษณะการวิเคราะห์ธาตุของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็วจาน 3.4 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร

ก) บริเวณขอบรอยเสียดสี ข) ธาตุเหล็ก ค) ธาตุวาเนเดียม

ก)



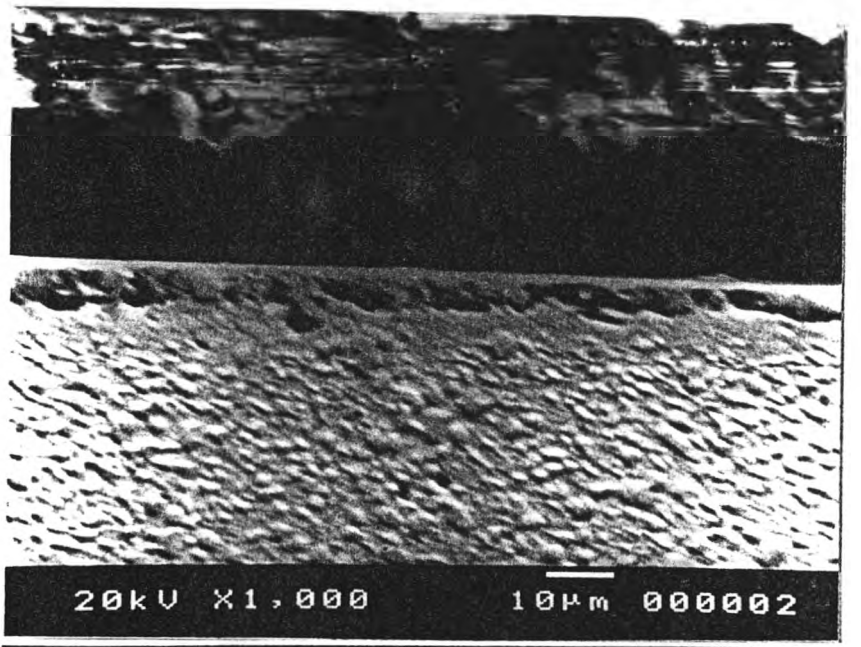
ข)



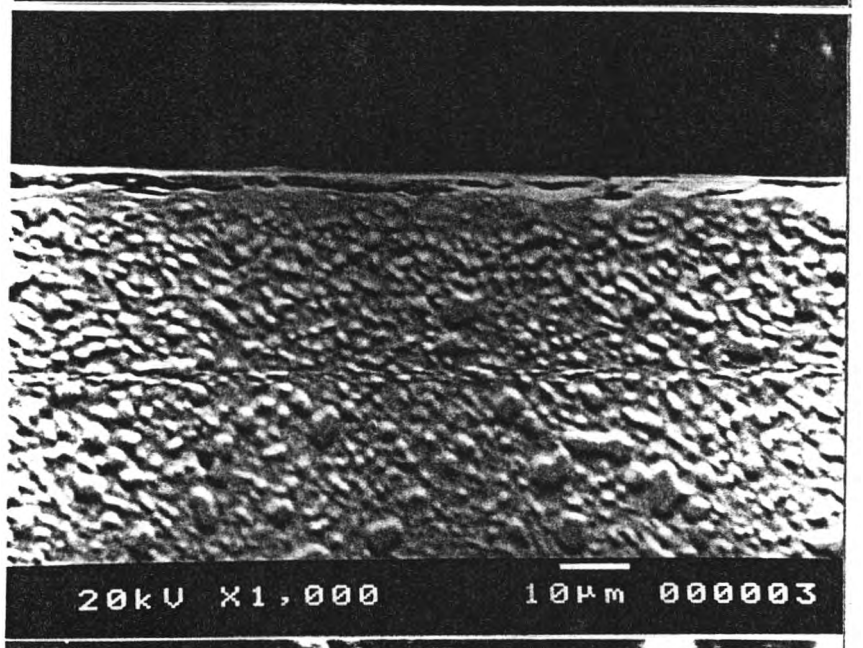
รูปที่ 4.15 ลักษณะภาคตัดขวางของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม ที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็ว 3.4 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร

ก) ชั้นเคลือบถูกเสียดสีหมดไป ข) ภาพกำลังขยาย 1000 เท่า.

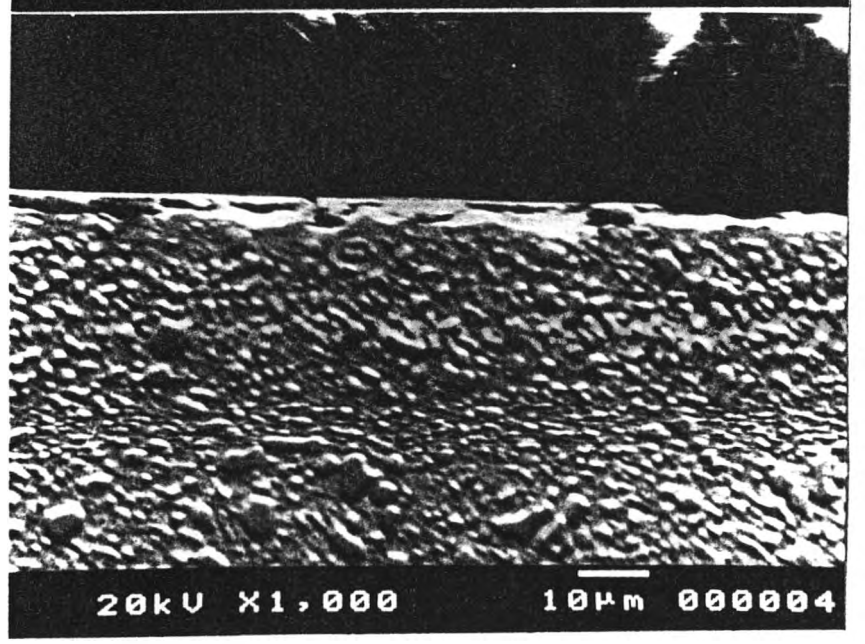
ก)



ข)

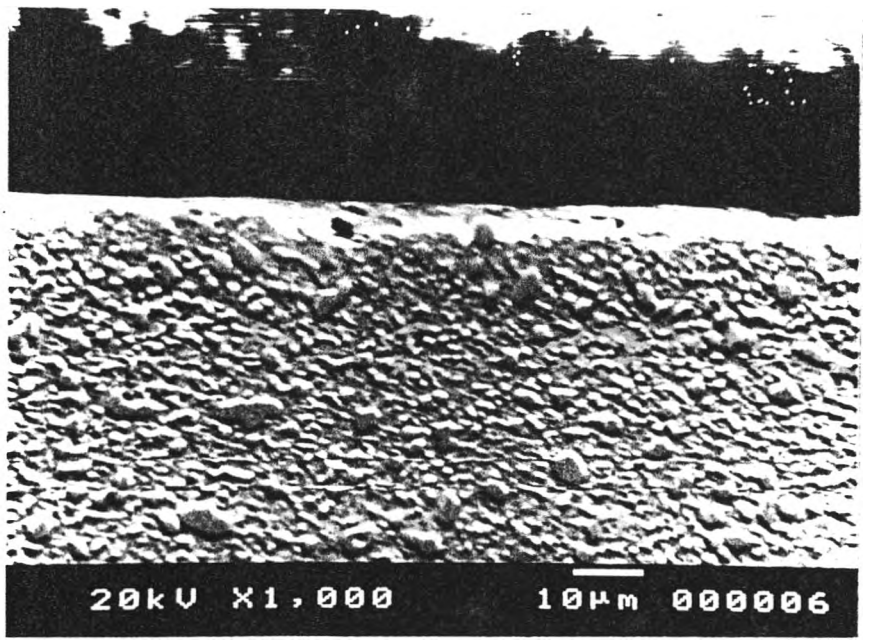


ค)

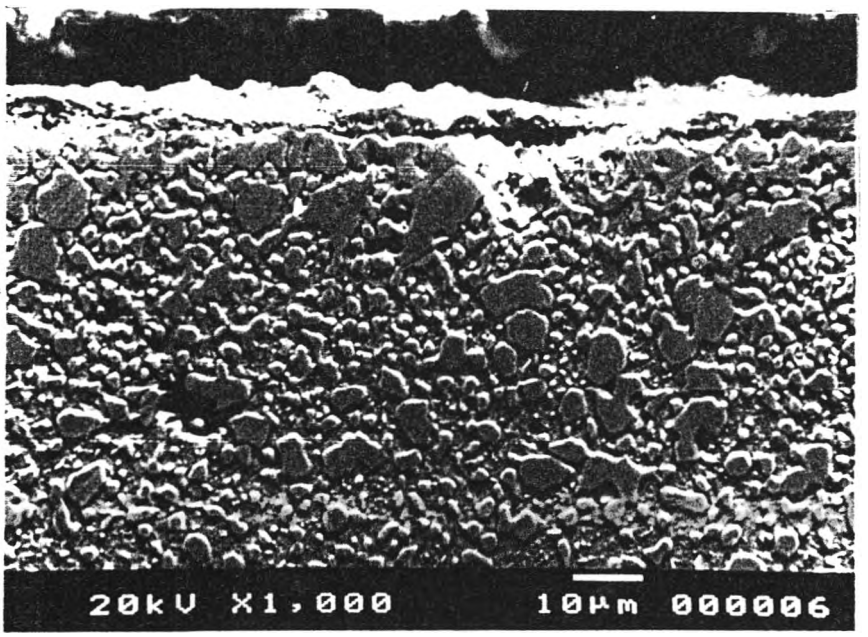


รูปที่ 4.16 ลักษณะชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ที่สึกหรอบางลง บริเวณรอยเสียดสีด้านขาออก กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม ความเร็วจาน 3.4 เมตรต่อวินาที ระยะทดสอบ 8250 เมตร ก) ชั้นเคลือบเริ่มบางลง ข) ชั้นเคลือบบางลง ค) ชั้นเคลือบบางและหมดไป

ก)



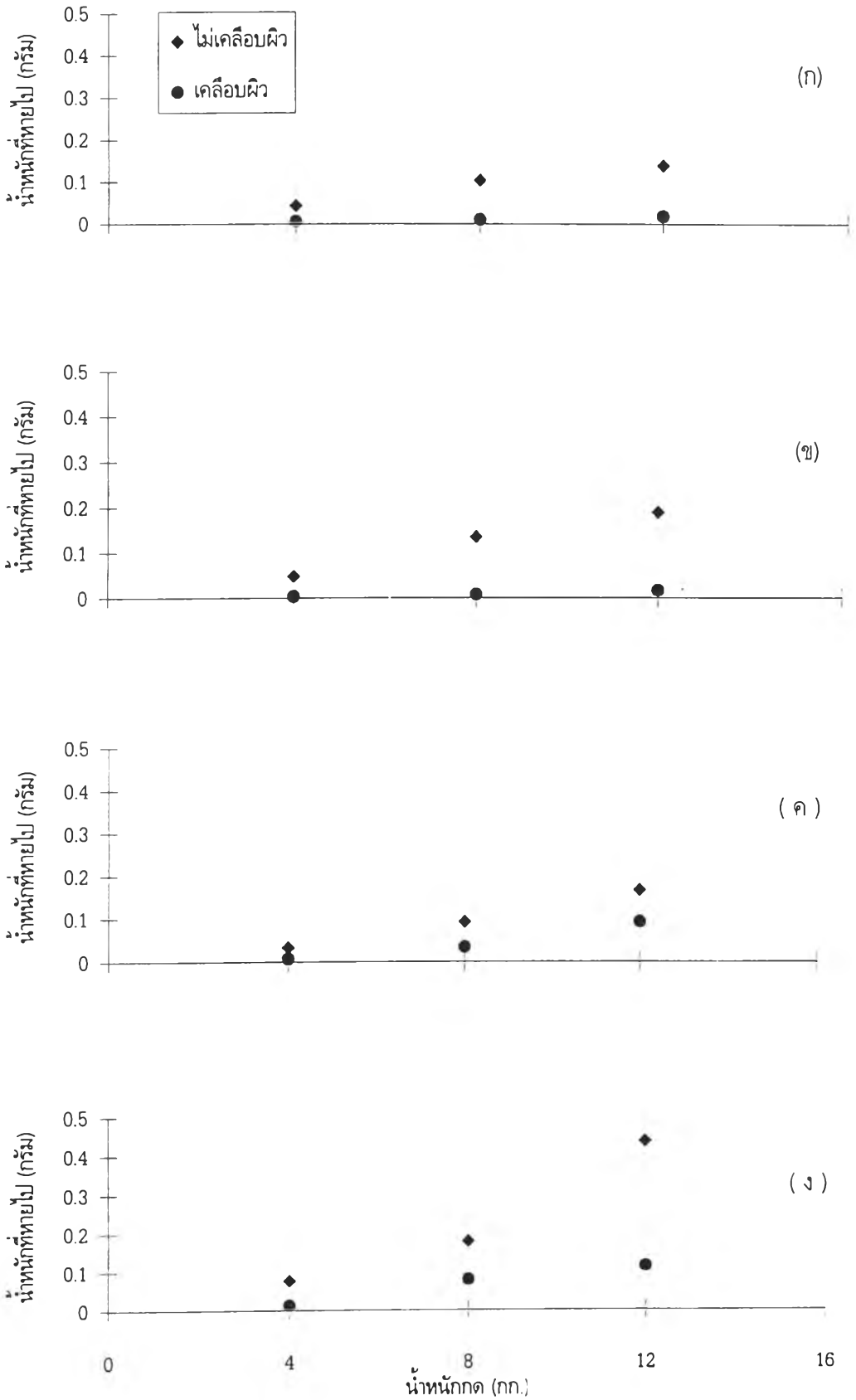
ข)



รูปที่ 4.17 ลักษณะภาคตัดขวางของเหล็กกล้าที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ บริเวณกลางรอยเสียดสี สภาวะการทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม กรณีการทดสอบแบบต่อเนื่อง ระยะทดสอบ 8250 เมตร
ก) ลักษณะชั้นเคลือบหมดไป กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0073 กรัม
ข) ลักษณะชั้นเคลือบเหลืออยู่ กรณีน้ำหนักที่หายไป 0.0063 กรัม

ดังจะเห็นได้จากด้านข้างของรอยเสียดสีที่ยังคงต้านการสึกหรอได้ดี ทำให้บริเวณที่ไม่มีชั้นเคลือบเหลืออยู่ไม่สึกหรอไปอย่างรวดเร็วเหมือนกับกรณีที่ไม่มีชั้นเคลือบและการสึกหรอโดยรวมของชิ้นงานที่มีชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์จึงเกิดขึ้นน้อยกว่า

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปที่มีหน่วยเป็นกรัมกับน้ำหนักกดที่มีหน่วยเป็นกิโลกรัม โดยการเปรียบเทียบการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ที่ไม่เคลือบผิวและที่เคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์ด้วยน้ำหนักกดชิ้นงาน 4 กิโลกรัม, 8 กิโลกรัมและ 12 กิโลกรัม ด้วยความเร็วจาน 1.3 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 4.18 ก), 2.6 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 4.18 ข), 3.4 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 4.18 ค) และ 6.8 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 4.18 ง) พบว่าที่ความเร็วต่ำ 1.3 เมตรต่อวินาทีและ 2.6 เมตรต่อวินาที ตั้งแต่น้ำหนักกด 8 กิโลกรัมขึ้นไป ชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้ดีกว่าที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นเป็น 3.4 เมตรต่อวินาที ชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้น้อยลง และที่ความเร็วสูง 6.8 เมตรต่อวินาที พบว่าชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้เพิ่มขึ้นอีก อย่างไรก็ดีชั้นเคลือบลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ทุกค่าความเร็วจานที่ใช้ในการทดสอบ เช่น การทดสอบที่น้ำหนักกด 12 กิโลกรัม ที่ความเร็วจาน 1.3, 2.6, 3.4 และ 6.8 เมตรต่อวินาที ชั้นเคลือบลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้ 0.1219, 0.1730, 0.0736 และ 0.3232 กรัมตามลำดับ นอกจากนี้ที่แต่ละความเร็วการทดสอบชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์ลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบเพิ่มขึ้น เช่นที่ความเร็วจาน 6.8 เมตรต่อวินาที การทดสอบที่น้ำหนักกด 4 กิโลกรัม 8 กิโลกรัมและ 12 กิโลกรัม ชั้นเคลือบลดการสึกหรอของเหล็กกล้า D2 ได้ 0.0639, 0.1003 และ 0.3232 กรัมตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงเส้นจานสูงขึ้นจาก 1.3 เมตรต่อวินาทีเป็น 6.8 เมตรต่อวินาที ชั้นเคลือบวาเนเดียมคาร์ไบด์สามารถต้านทานการสึกหรอลดลงที่น้ำหนักกดทุกค่า



รูปที่ 4.18 การสึกหรอของเหล็กกล้าที่ผ่านการเคลือบผิวเป็นวาเนเดียมคาร์ไบด์และไม่เคลือบผิว ที่สภาวะการทดสอบ (ก) 1.3 ,(ข) 2.6,(ค) 3.4 ,(ง) 6.8 เมตรต่อวินาที ระยะทางทดสอบ 8250 เมตร