

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของฟิล์มบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L

การวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ด้วยเครื่อง XPS สามารถให้ข้อมูลขององค์ประกอบของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความหนาในระดับนาโนเมตร ดังเช่นตัวอย่างการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของธาตุออกซิเจน โครเมียม เหล็ก และนิกเกิล ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L หลังการจุ่มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง โดยทำการลอกผิวด้วยอาร์กอนไอออน (argon ion sputtering) ที่เวลาต่าง ๆ (ไม่แสดงผลเป็นความลึกในหน่วยของระยะเป็นนาโนเมตร เนื่องจากไม่ทราบอัตราการลอกผิวที่แน่นอนเพราะอัตราการลอกผิวเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบของชั้นฟิล์ม)

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของออกซิเจน (รูปที่ 4.1) พบว่าที่ผิวชั้นนอก ออกซิเจนที่มีสถานะทางเคมี (chemical state) ของอยู่ในรูป O^{2-} หรือ M-O (พลังงานยึดเหนี่ยว หรือ binding energy ; B.E. = 529.5 - 530.2 eV) และ OH^- หรือ M-OH (B.E. = 531 - 532 eV) มีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของน้ำ (bound water ; B.E. = 533.1 eV) เป็นองค์ประกอบด้วย เมื่อทำการลอกผิวเพียงเล็กน้อยและทำการวิเคราะห์ ผลคือ พีค (peak) จะเลื่อนมายังตำแหน่งด้านพลังงานที่ต่ำลง แสดงว่าออกซิเจนอยู่ในรูป O^{2-} และขนาดของพีคจะเล็กลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มเวลาของการลอกผิว จากลักษณะดังกล่าวแสดงว่า ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีสัดส่วนของ M-OH อยู่มากที่ผิวชั้นนอก มี M-O ที่ผิวชั้นใน และจะลดลงจนหมดไปเมื่อถึงเนื้อโลหะ

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของโครเมียม (รูปที่ 4.2) พบว่าโครเมียมมีแนวโน้มอยู่สูงทั้งผิวชั้นนอกและชั้นใน โดยชั้นในโครเมียมจะอยู่ในสถานะโลหะ (metallic state ; B.E. = 574.2 eV) ส่วนผิวชั้นนอกจะอยู่ในสถานะซึ่งถูกออกซิไดซ์ (oxidized state) เนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวของโครเมียม ในสถานะต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เช่น $Cr(OH)_3$ (B.E. = 577.3 eV) Cr_2O_3 (B.E. = 576.6 eV) เป็นต้น จึงเป็นการยากที่จะวิเคราะห์สถานะทางเคมีว่า ที่ผิวชั้นนอกโครเมียมอยู่ในรูปออกไซด์ หรือ ไฮดรอกไซด์ แต่สามารถวิเคราะห์ได้จากพีคของออกซิเจน (รูปที่ 4.1) และจากการพิจารณาแผนภูมิของ Pourbaix ⁽¹⁶⁾ ร่วมกัน อาจกล่าวได้ว่า ที่ผิวชั้นนอกฟิล์มจะประกอบด้วยไฮดรอกไซด์ของโครเมียม ($Cr(OH)_3$) ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรในน้ำบริสุทธิ์ ส่วนที่ผิวชั้นในฟิล์มประกอบด้วยออกไซด์ของโครเมียม (Cr_2O_3) และที่เนื้อโลหะประกอบด้วยโครเมียมในสถานะโลหะ และจากการคำนวณประมาณได้ว่า ระยะจากผิวถึงโครเมียมในสถานะโลหะมีความหนา 40 Å

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของเหล็ก (รูปที่ 4.3) พบว่ามีเหล็กอยู่เล็กน้อยที่ผิวชั้นนอกซึ่งพบทั้งในรูปของโลหะ และสภาวะซึ่งถูกออกซิไดซ์ จากการวิเคราะห์พีคของออกซิเจน (รูปที่ 4.1) ร่วมกัน อาจกล่าวได้ว่า สภาวะของเหล็กซึ่งถูกออกซิไดซ์นี้อยู่ในรูปออกไซด์ (Fe_2O_3) ส่วนที่ผิวชั้นในจะพบเหล็กมากขึ้น โดยอยู่ในรูปของโลหะ (B.E. = 706.9 eV)

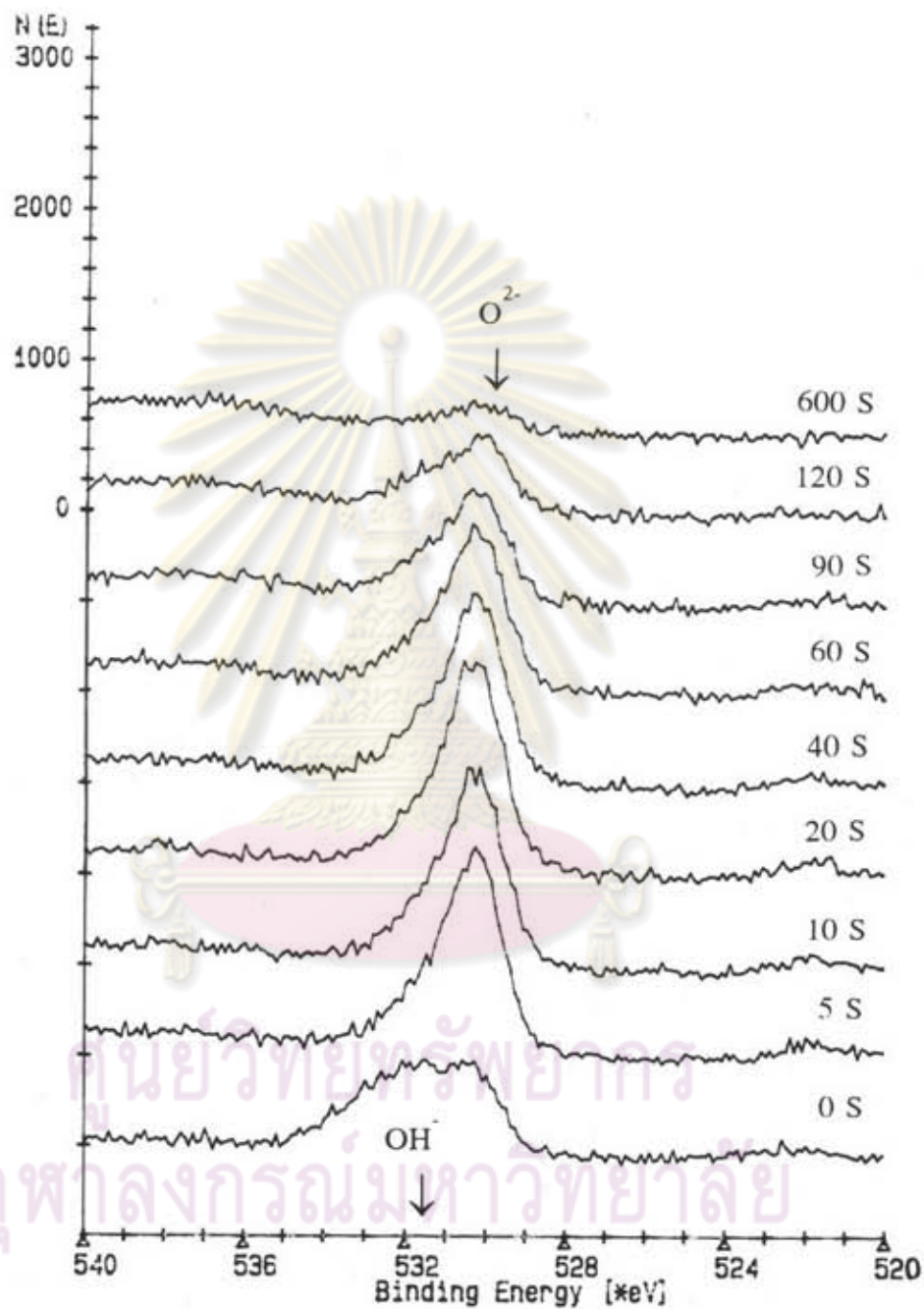
ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของนิกเกิล (รูปที่ 4.4) พบว่ามีนิกเกิลอยู่เล็กน้อยที่ผิวชั้นนอก และจะมากขึ้นทางชั้นในซึ่งอยู่ในรูปของโลหะ (B.E. = 853.1 eV) โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของขนาดของพีคคล้ายกับพีคของเหล็ก (รูปที่ 4.3) เพียงแต่ไม่พบนิกเกิลในรูปซึ่งถูกออกซิไดซ์ อาจกล่าวได้ว่า ชั้นของนิกเกิลในรูปของโลหะอยู่ในชั้นเดียวกันกับชั้นของเหล็กในรูปของโลหะ

จากการพิจารณาพีคของเหล็กและพีคของนิกเกิล (รูปที่ 4.3 และ 4.4) ที่เวลาการลอกผิว 0 และ 5 วินาที พบว่าพีคของเหล็กและนิกเกิลเริ่มปรากฏ และค่อย ๆ มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยลำดับ แสดงว่าเหล็กและนิกเกิลอยู่ลึกจากผิวเป็นระยะประมาณเท่ากับความลึกของการวิเคราะห์ ซึ่งจากการคำนวณของ I. Olejerd และคณะ ⁽¹³⁾ มีค่าประมาณ 16 \AA จึงอาจกล่าวได้ว่า ชั้นของเหล็กและนิกเกิลในรูปโลหะอยู่ลึกจากผิวประมาณ $16 - 18 \text{ \AA}$

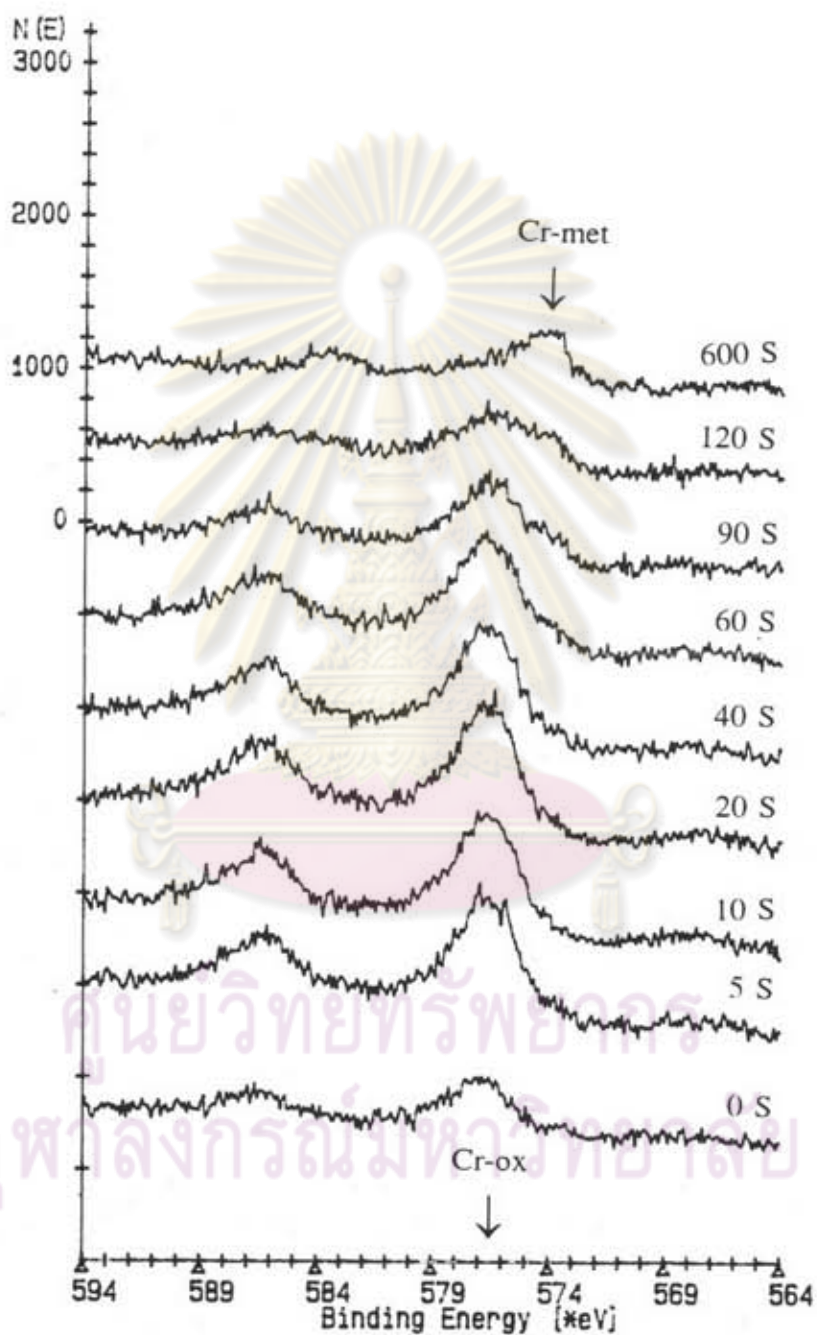
และจากการวิเคราะห์พีคของ โครเมียม เหล็ก และนิกเกิล (รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4) ที่ เวลาลอกผิว 60 และ 90 วินาที พบว่าโครเมียมอยู่ในรูปของออกไซด์ ในขณะที่เหล็กและนิกเกิลอยู่ในรูปโลหะ ซึ่งเป็นผลจากการที่โครเมียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีกว่าเหล็กและนิกเกิล จึงไม่เกิดออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของนิกเกิลที่ผิวชั้นในซึ่งมีปริมาณออกซิเจนลดลง แต่จะเกิดการออกไซด์ของเหล็กได้บ้างที่ผิวชั้นนอกซึ่งมีออกซิเจนอยู่มาก (รูปที่ 4.1)

ผลดังกล่าวสามารถนำมาแสดงองค์ประกอบตามความลึก (depth profile) และแบบจำลองของชั้นฟิล์ม ได้ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

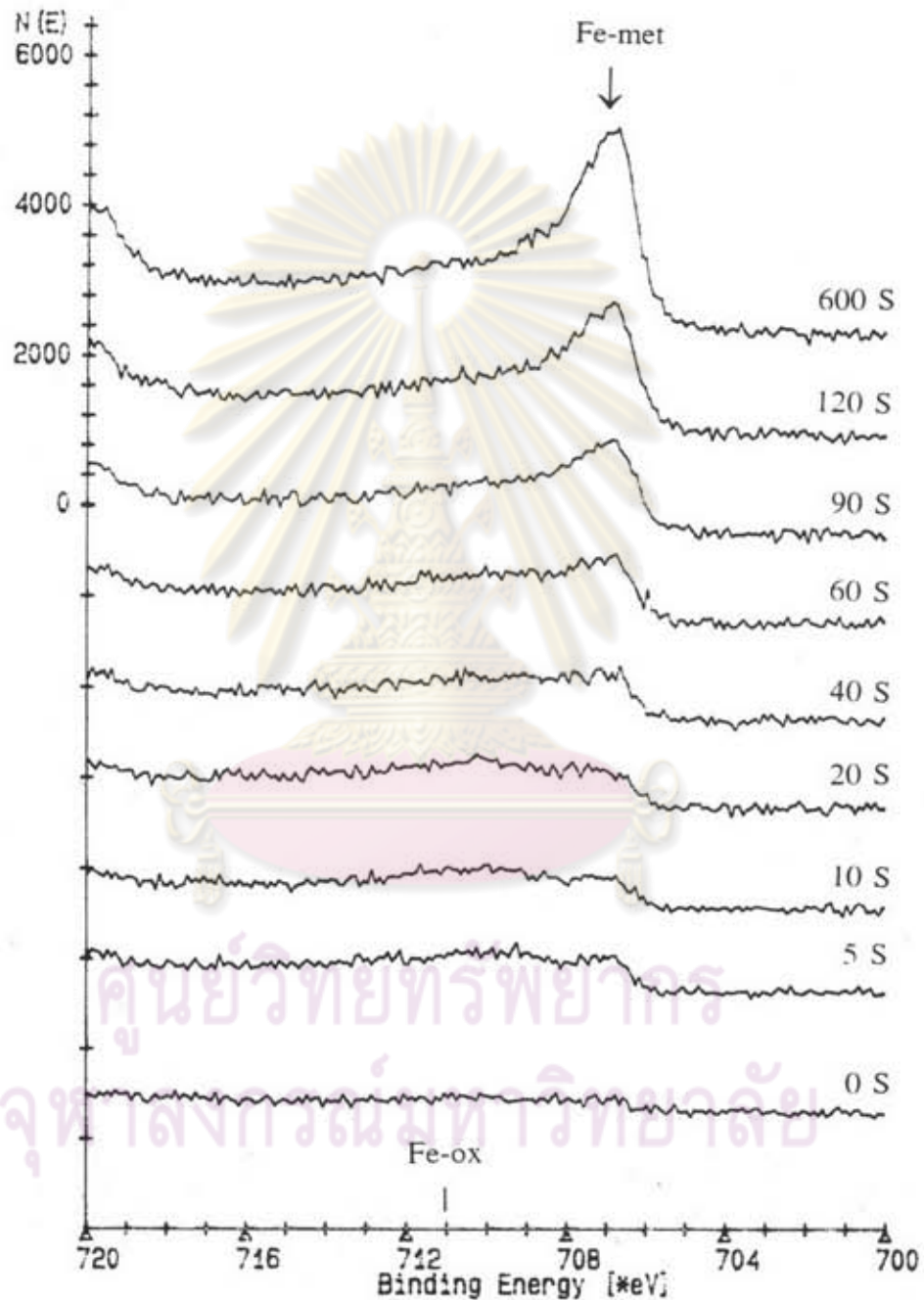
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



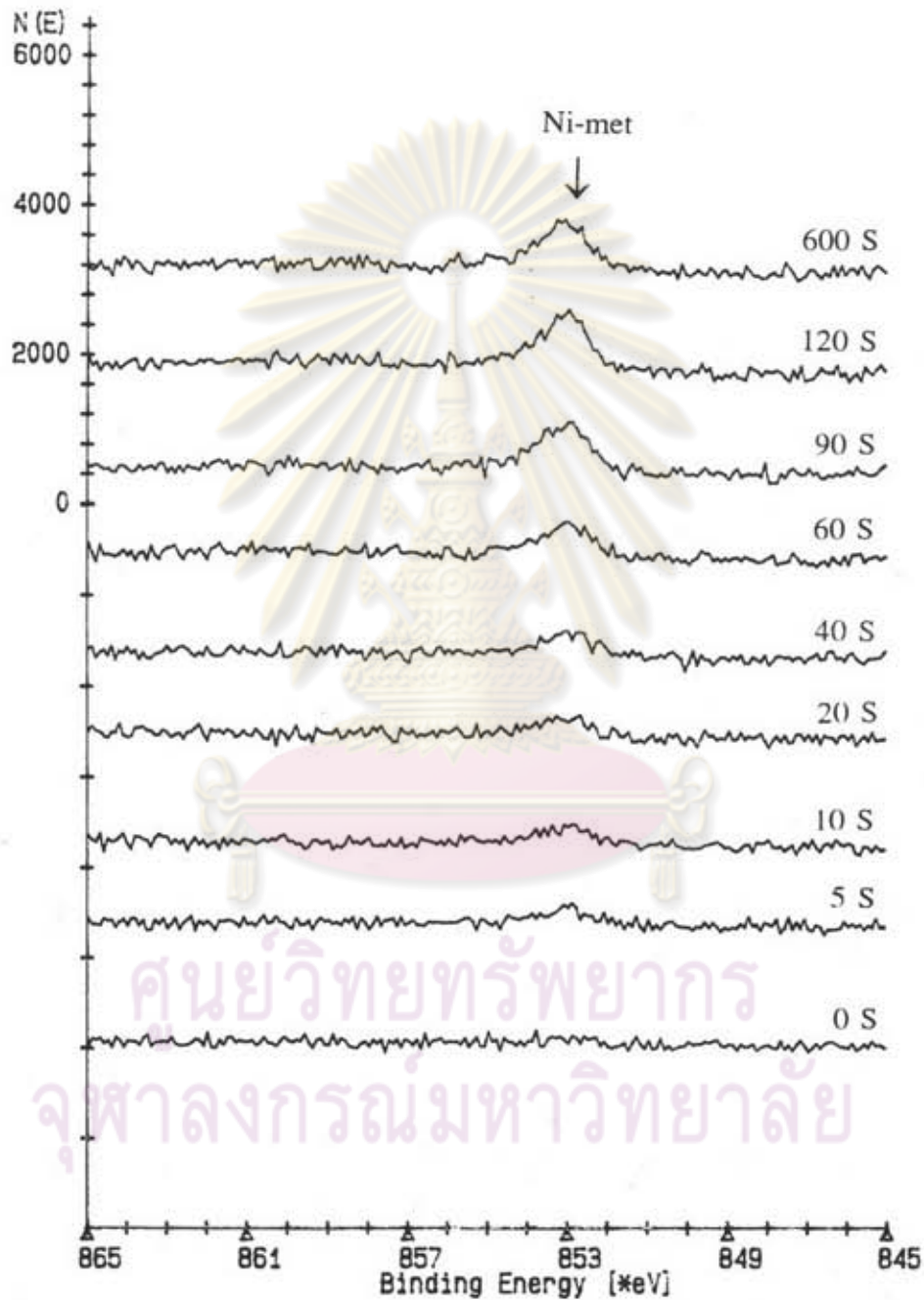
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน ($O1s$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L ที่เวลาการลอกผิวต่าง ๆ หลังจากผ่านการจุ่มในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง



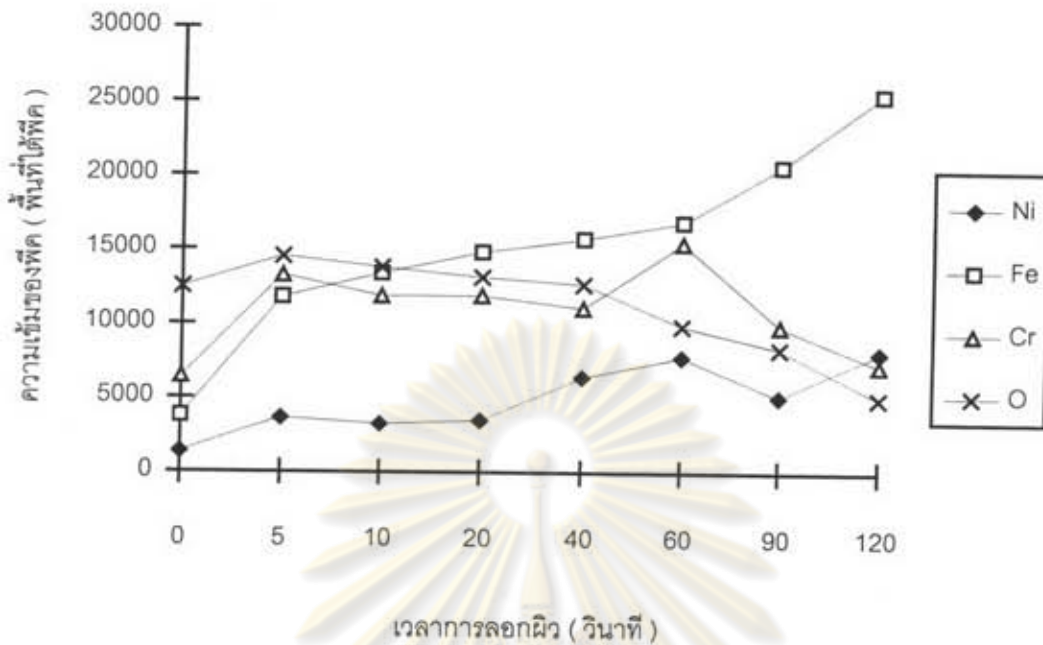
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครเมียม (Cr2p) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L ที่เวลาการลอกผิวต่าง ๆ หลังจากผ่านการจุ่มในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ($Fe_{2p_{3/2}}$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L ที่เวลาการลอกผิวต่าง ๆ หลังจากผ่านการจุ่มในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หนักเกิด ($Ni_{2p_{3/2}}$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L ที่เวลาการลอกผิวต่าง ๆ หลังจากผ่านการจุ่มในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบตามความลึกของ O, Cr, Fe และ Ni ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังจากผ่านการจุ่มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็ก AISI 304L ซึ่งผ่านการจุ่มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

4.2 พฤติกรรมการผุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ผลการวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ด้วยเครื่อง XPS หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ในช่วงความเข้มข้น 0.01 - 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง แสดงถึงผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่อองค์ประกอบของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้น สภาวะทางเคมีของออกซิเจนจะเปลี่ยนจาก O^{2-} เป็น OH^- มากขึ้น (รูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8) นอกจากนี้พบว่าที่ผิวชั้นนอก (รูปที่ 4.7) มีปริมาณ OH^- มากกว่าที่ผิวหลังการลอกผิว 5 วินาที (รูปที่ 4.8) ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการจุ่มในน้ำกลั่น (รูปที่ 4.1) โดยปริมาณของออกซิเจนที่ชั้นฟิล์มสูงชันในช่วงความเข้มข้น 0.01 - 0.1 โมล/ลิตร (รูปที่ 4.9) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่มีการดูดซับ OH^- และ H_2O มากขึ้นในเนื้อฟิล์ม เนื่องจากมีการทำปฏิกิริยาต่อชั้นฟิล์มที่มากขึ้นอันเป็นผลจากความเข้มข้นที่สูงขึ้น และในช่วงความเข้มข้น 0.4 - 4 โมล/ลิตรปริมาณออกซิเจนที่ชั้นฟิล์มลดลง โดยอาจมีสาเหตุจากการที่โครเมียมที่ชั้นฟิล์มซึ่งจะมีพันธะกับออกซิเจนละลายลงสารละลายเป็นจำนวนมาก (รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11)

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS พบว่าโครเมียมที่ชั้นฟิล์มมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้น (รูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11) โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 0.4 - 4 โมล/ลิตร โครเมียมที่ผิวชั้นนอกมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก และที่ความเข้มข้น 4 โมล/ลิตร โครเมียมที่ผิวชั้นในลดลงมากจนกระทั่ง ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวชั้นนอกและชั้นใน (เวลาลอกผิว 20 วินาที) ได้ โดยมีความเข้มของพีคโครเมียมใกล้เคียงกันคือในระดับที่ต่ำกว่า 3000

สภาวะทางเคมีของโครเมียม สามารถวิเคราะห์ได้จากพีคของออกซิเจน (รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8) เพราะให้ผลที่ชัดเจนกว่าการวิเคราะห์ได้จากพีคของโครเมียม (รูปที่ 4.10) คือที่ความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 โมล/ลิตร โครเมียมที่ผิวชั้นนอกจะอยู่ในรูปของ $M-OH$ เป็นส่วนใหญ่ K. Hashimoto และ K. Asami^{(11) (12)} เสนอว่า องค์ประกอบนี้อยู่ในรูปของไฮดรตโครเมียมออกซิไฮดรอกไซด์ ($CrO_2(OH)_{3-2x} \cdot nH_2O$) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่ความเข้มข้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร โครเมียมที่ผิวชั้นนอกจะอยู่ในรูป Cr_2O_3 ในสัดส่วนที่มากขึ้น

รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มของพีคเหล็กที่ผิวหลังจากทำการลอกผิวเป็นเวลา 5 วินาที พบว่าความเข้มของพีคเหล็กลดลง เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้น รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่อสภาวะทางเคมีของ

เหล็ก และนิกเกิลที่ผิวตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่าและเท่ากับ 0.1 โมล/ลิตร เหล็กและนิกเกิลจะอยู่ในสภาวะโลหะ แต่จะถูกออกซิไดซ์ที่ความเข้มข้น มากกว่าและเท่ากับ 0.4 โมล/ลิตร จากการวิเคราะห์พีคของเหล็ก นิกเกิล และออกซิเจนร่วมกัน อาจกล่าวได้ว่า เหล็กอาจอยู่ในรูปของ FeOOH (B.E.=711.2 eV) หรือ Fe(OH)_3 (B.E.=710.6 eV) ส่วนนิกเกิลอาจอยู่ในรูป Ni(OH)_2 (B.E.=856.0 eV)

จากผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร จะทำให้ฟิล์มหรือผิวชั้นนอกของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ประกอบด้วย $\text{CrO}_x(\text{OH})_{3-2x} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ และ Cr_2O_3 ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ที่ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร สัดส่วนของ Cr_2O_3 ที่ผิวชั้นนอกจะลดลง ที่ความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.4 โมล/ลิตร โครเมียมที่ฟิล์มชั้นนอกมีแนวโน้มลดลงมาก ทำให้การป้องกันการผุกร่อน (protectiveness) ลดลง เหล็กและนิกเกิลจึงถูกออกซิไดซ์เกิดเป็น สารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กและไฮดรอกไซด์ของนิกเกิล และที่ความเข้มข้น 4 โมล/ลิตร โครเมียม เหล็ก และออกซิเจน มีแนวโน้มลดลงทั้งที่ผิวชั้นนอกและผิวชั้นใน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งอาจมีปริมาณ ช่องว่าง (pores) น้ำ O^{2-} และ OH^- ที่ไม่มีพันธะกับโลหะมากขึ้นในชั้นฟิล์ม ในสภาวะนี้จะสูญเสียความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนอย่างสิ้นเชิง

การวิเคราะห์สารละลายซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L (สารละลายมีสีเขียว) ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (AA) พบว่า สารละลายประกอบด้วย อีออนของ โครเมียม เหล็ก และนิกเกิล (ตารางที่ 4.1) และจากการพิจารณาแผนภูมิของ Pourbaix⁽²³⁾ อาจกล่าวได้ว่าสารละลายดังกล่าวประกอบด้วย Cr^{3+} , Fe^{2+} และ Ni^{2+} (ทั้งหมดมีสีเขียว) ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากผลวิเคราะห์นี้อาจกล่าวได้ว่า ฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเฟสที่ไม่เสถียรซึ่งจะละลายลงสู่สารละลายในที่สุด และองค์ประกอบของชั้นฟิล์มน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการนำชิ้นงานออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จนกระทั่งนำชิ้นงานเข้าเครื่อง XPS โดย Cr^{3+} , Fe^{2+} และ Ni^{2+} ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ หรือในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์

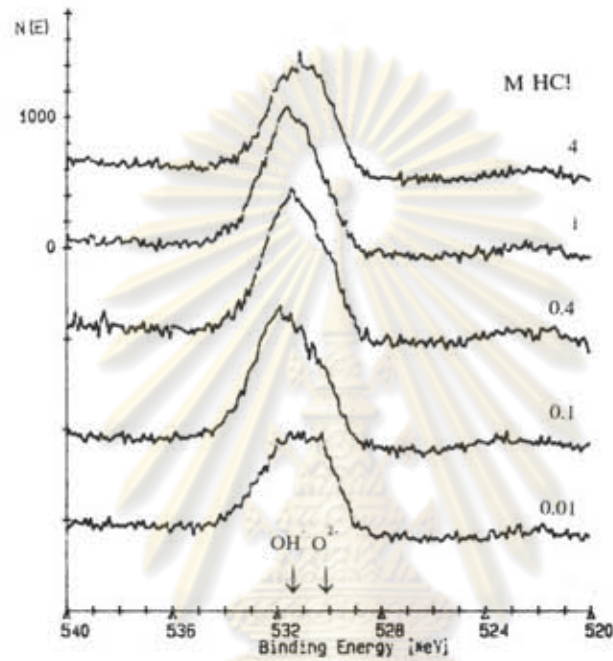
ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 °C (รูปที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.2) แสดงว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีผลในการเร่งปฏิกิริยาอะโนดิก เช่นเดียวกับผลของ G. Baichi และคณะ⁽²⁾ นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงพาสซีฟจะแคบลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนอาจพิจารณาได้จาก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิด (E_{oc}) ซึ่งแสดงเป็นนัยถึงความต้านทานการผุกร่อนในมุมอับ (crevice corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิม

และค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (pitting potential ; E_p) ซึ่งแสดงเป็นนัยถึงความต้านทานต่อการเกิดการผุกร่อนแบบรูพรุนของโลหะ โดยค่า E_{oc} และค่า E_p จะมีค่าลดลงเมื่อความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนของโลหะลดลง นอกจากนี้อาจพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ (I_p) ซึ่งแสดงเป็นนัยถึงเสถียรภาพของชั้นฟิล์ม จะมีค่าลดลงเมื่อความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนของโลหะเพิ่มขึ้น^{(17) (18)}

ผลการทดลองดังกล่าวพบว่าปริมาณของโครเมียมที่ผิวมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนของโลหะอย่างเห็นได้ชัด คือ เมื่อปริมาณของโครเมียมที่ฟิล์มต่ำความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนจะลดลง เห็นได้จาก ช่วงพาสซีฟที่แคบลง ค่า I_p ที่เพิ่มขึ้น และ ค่า E_{oc} และ ค่า E_p ที่ลดลง ออกซิเจนที่ผิวอาจมีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการป้องกันการผุกร่อน โดยแสดงเป็นนัยว่า ฟิล์มที่มีองค์ประกอบของไฮดรอกไซด์สูงจะมีความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนที่ต่ำ

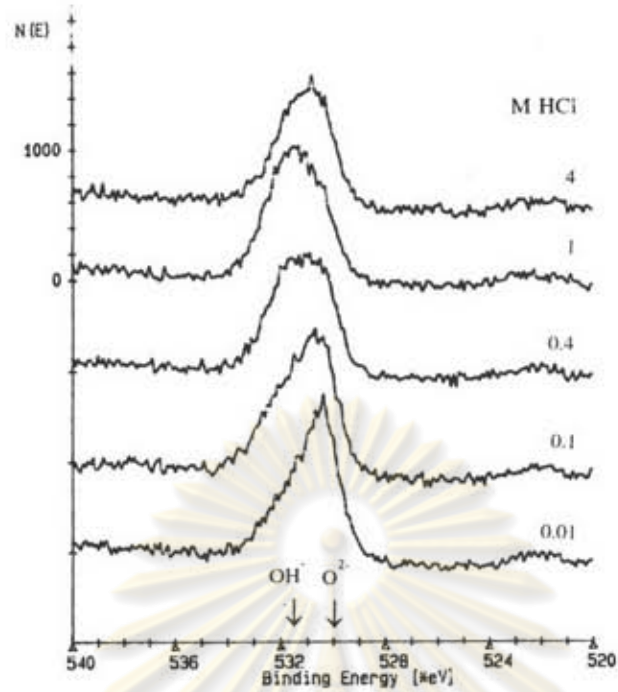
จากรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นผลงานของ G. Biachi และคณะ⁽²⁾ แสดงผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่อพฤติกรรมการผุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำ (0.01 โมล/ลิตร) โลหะผุกร่อนแบบทั่วไปอย่างสม่ำเสมอโดยมีอัตราการผุกร่อนที่ต่ำ (ประมาณ 0.01 มิลลิเมตร/ปี) ในสภาวะนี้แสดงถึงความสามารถในการป้องกันการผุกร่อนที่ดี และจากผลการวิเคราะห์ XPS พบว่าฟิล์มในสภาวะนี้มีโครเมียมอยู่สูงและออกซิเจนอยู่ในสภาวะของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น (ประมาณ 0.08 - 0.5 โมล/ลิตร) เกิดการผุกร่อนแบบรูพรุนซึ่งพบว่า ฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมทางเคมีของโครเมียมและเหล็กเพียงเล็กน้อย ในขณะที่สภาวะทางเคมีของออกซิเจนที่ผิวชั้นนอกส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงมาอยู่ในสภาวะของไฮดรอกไซด์มากขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของฟิล์มที่เปลี่ยนไป และหากความเข้มข้นของสารละลายในบางบริเวณเปลี่ยนไป จุดบกพร่องต่าง ๆ บนผิวเช่น เฟสที่เกิดจากการตกผลึก (precipitate phase) สารเจือปนต่าง ๆ ฯลฯ อาจเกิดเป็นจุดกำเนิดของการผุกร่อนแบบหลุมได้ เมื่อความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.5 - 1 โมล/ลิตร ความเข้มข้นของฟิคโครเมียมที่ผิวชั้นนอกลดต่ำลงมาก (ต่ำกว่าระดับ 2,800) ความต้านทานการผุกร่อนของโลหะที่ผิวลดลงมาก หากมีความเค้นที่ผิวจะทำให้เกิดการผุกร่อนภายใต้ความเค้นได้ โดยผิวชั้นนอกเกิดการผุกร่อนก่อน แล้วขยายตัวไปตามบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความเค้นมาก ๆ เช่น แนวสลิป (slip line) เกิดรอยแตกขึ้นในขณะที่ผิวชั้นในและผิวโลหะโดยทั่วไปยังสามารถต้านทานการผุกร่อนได้ ซึ่งอาจเกิดการผุกร่อนภายใต้ความเค้นตามกลไกของการละลายที่แนวสลิป (slip dissolution mechanism) นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการผุกร่อนในช่วงความเข้มข้น 0.5 - 1 โมล/ลิตร ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของฟิคโครเมียมที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในช่วงความเข้มข้นนี้ เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงกว่า 1 โมล/ลิตร

ทั้งฟิล์มชั้นนอกและชั้นในสูญเสียความต้านทานการผุกร่อนอย่างสิ้นเชิง จะเห็นได้จากความเข้มของพีคโครเมียมลดลงมากในผิวชั้นในจนความเข้มต่ำกว่าระดับ 2,800 จึงเกิดการผุกร่อนแบบทั่วไปอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยการผุกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) หายไป เพราะการผุกร่อนแบบทั่วไปมีอัตราการผุกร่อนที่สูงกว่า



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)

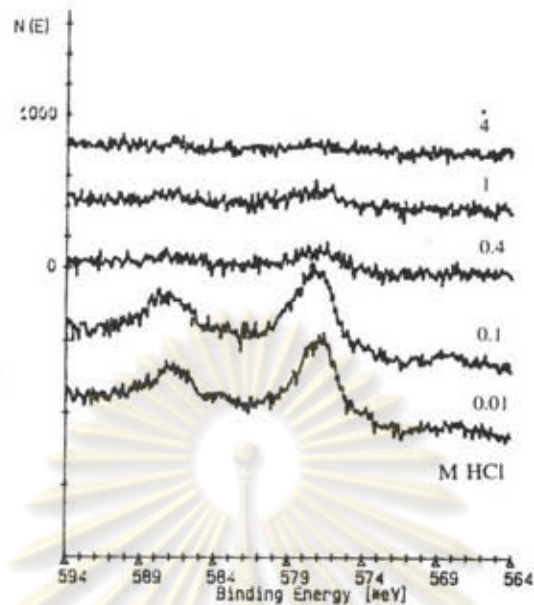
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



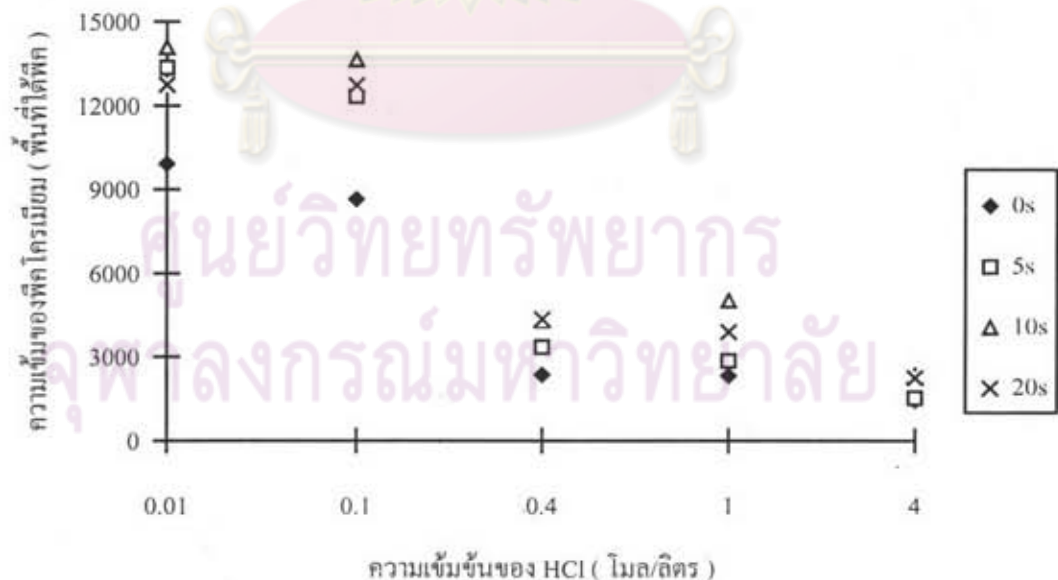
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



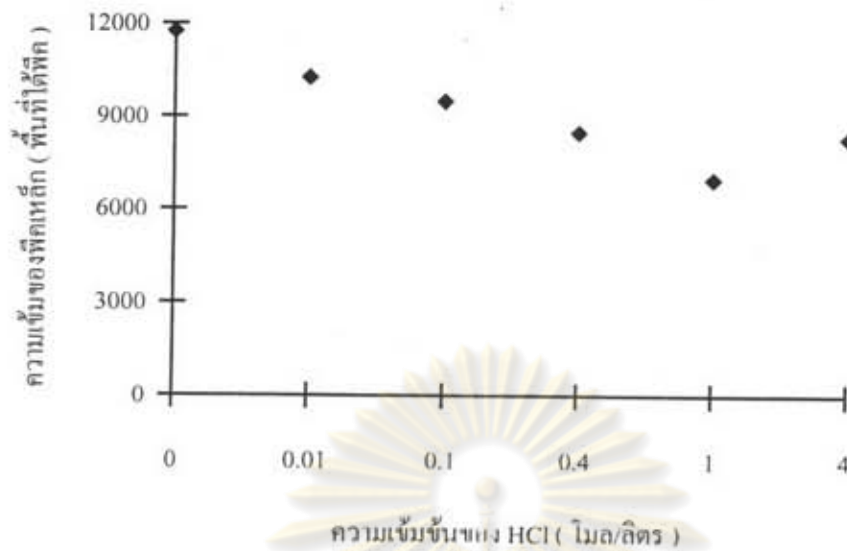
รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของฟลักออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



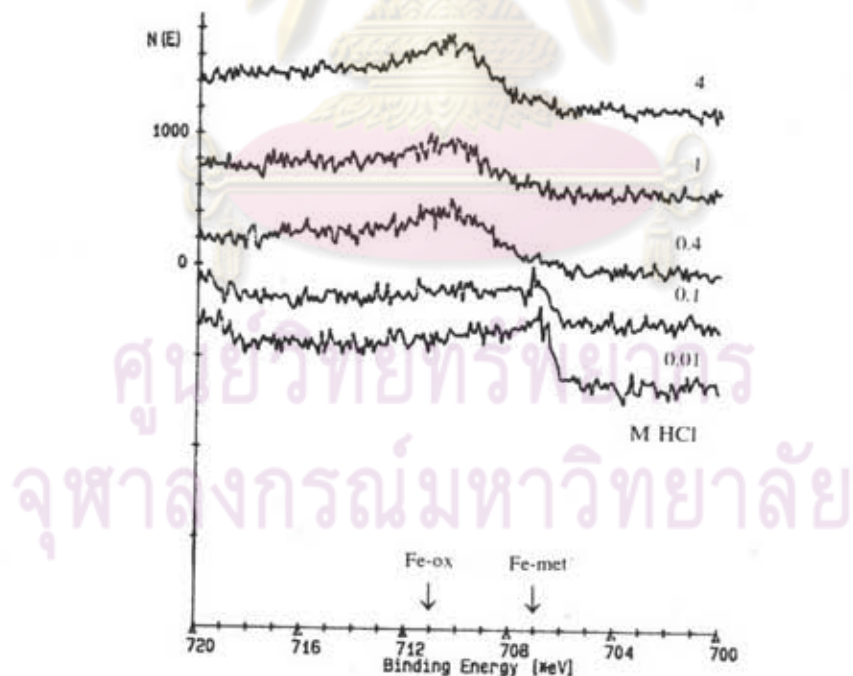
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์โครเมียม (Cr2p) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



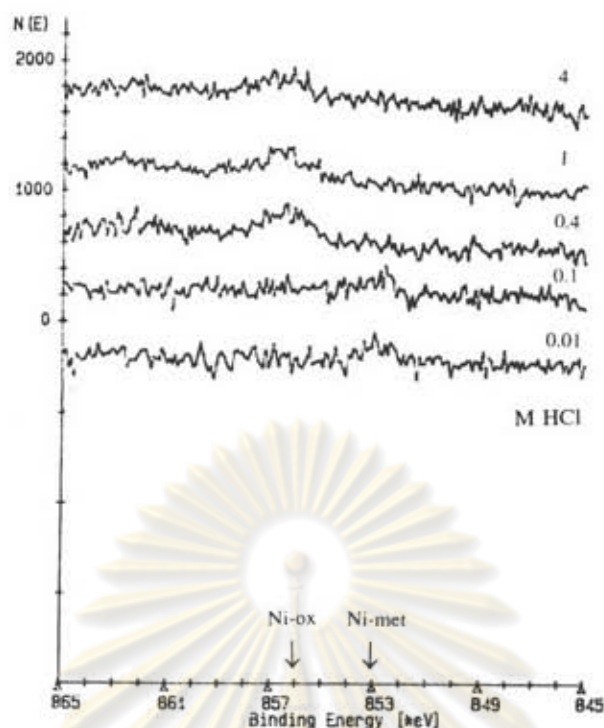
รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



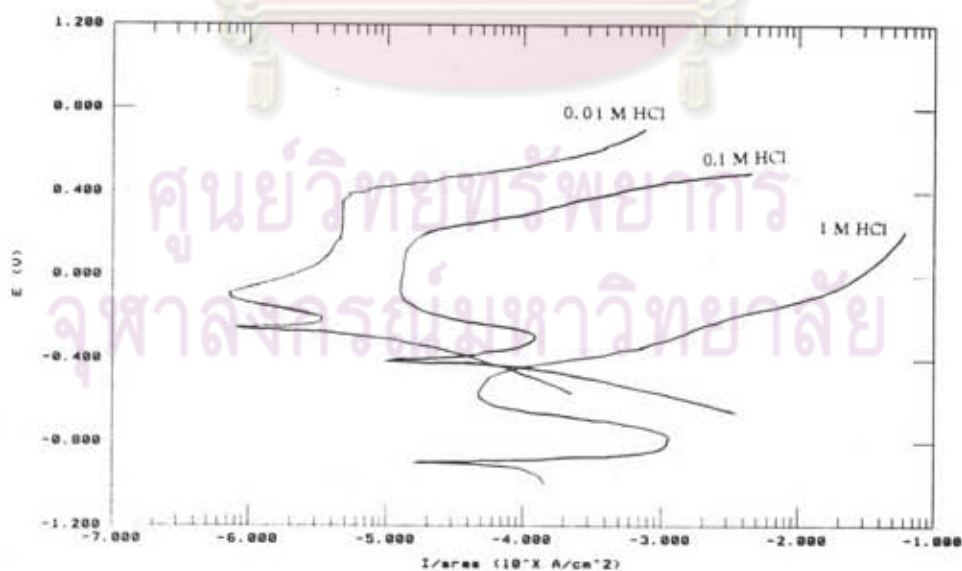
รูปที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นของ HCl ต่อความเข้มของพีกเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ($Fe_{2p_{3/2}}$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์นิกเกิล (Ni_{2p3/2}) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.15 แสดงผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก AISI 304 L ในสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.01 , 0.1 และ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C

ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์สารละลาย HCl ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้า AISI 304L ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (AA)

ความเข้มข้นของ HCl โมล/ลิตร	Cr มก./ลิตร	Fe มก./ลิตร	Ni มก./ลิตร
0.1	0.2	0.7	3.3
0.4	3.4	9.9	12.8
1	23.6	14.8	19.3

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Eoc) ค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ (Ip) และค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (Ep) ของเหล็ก AISI 304L ในสารละลาย HCl ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30°C

ความเข้มข้นของ HCl โมล/ลิตร	Eoc V (SCE)	Ip mA/cm ²	Ep [#] mV (SCE)
0.01	-0.253	$7.28 \times 10^{-7}, 5 \times 10^{-6} *$	0.37
0.1	-0.407	1.26×10^{-5}	0.19
1	-0.902	4.78×10^{-5}	-0.45

* เกิดช่วงพาสซีฟ 2 ช่วง

Ep ได้จากจุดตัดของเส้นสัมผัสเส้นโพลาไรเซชันในช่วงพาสซีฟและช่วงทรานส์พาสซีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 พฤติกรรมการผุกร่อนที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์

ผลการวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ด้วยเครื่อง XPS หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายของโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0 - 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง แสดงถึงผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อองค์ประกอบของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ได้ดังนี้ กล่าวคือที่ผิวชั้นนอกสุดส่วนของ O^{2-} ต่อ OH^{-} เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น (รูปที่ 4.16) โดยความเข้มของฟิสิกออกซิเจนที่ผิวชั้นต่าง ๆ เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง (รูปที่ 4.17)

รูปที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ออกซิเจนที่ผิวของชิ้นงานซึ่งผ่านการจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 4 โมล/ลิตร โดยทำการเอียงชิ้นงานจาก ท่าราบ (0°) เป็นมุม 60° และ 80° ซึ่งจะทำให้ความลึกของการวิเคราะห์เป็น 0.5 และ 0.17 เท่าของการวิเคราะห์ในท่าราบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ผิวชั้นนอกสุด ยังคงมีปริมาณ M-OH สูงกว่า M-O เช่นเดียวกันกับฟิล์มซึ่งผ่านการจุ่มในน้ำกลั่น และ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่ชั้นของ M-OH ในฟิล์มซึ่งผ่านการจุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะบางกว่า (เปรียบเทียบกับผลในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.7)

รูปที่ 4.19 แสดงสเปกตรัมของโครเมียมที่ผิวชั้นนอกพบว่าความเข้มของฟิสิกโครเมียมไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนไป (โดยมีความเข้มของฟิสิกโครเมียมอยู่ในช่วงประมาณ 6,000 - 6,700) เมื่อพิจารณาฟิสิกของออกซิเจน (รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.18) และ แผนภูมิของ Pourbaix ร่วมกันอาจกล่าวได้ว่า โครเมียมที่ผิวชั้นนอกอยู่ในรูป $Cr(OH)_3 \cdot nH_2O$ ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

รูปที่ 4.20 แสดงความเข้มของฟิสิกเหล็ก ที่ผิวหลังการลอกผิวเป็นเวลา 5 วินาที พบว่าเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น รูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของเหล็กในสถานะเดียวกัน พบว่าเหล็กอยู่ในรูปของออกไซด์ และในสถานะโลหะ นอกจากนี้พบว่าเหล็กที่เพิ่มนั้นมาจากเหล็กออกไซด์ เมื่อพิจารณาฟิสิกของออกซิเจน (รูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.18) และ แผนภูมิของ Pourbaix ร่วมกัน อาจกล่าวได้ว่า เหล็กที่ผิวชั้นนอกอยู่ในรูป Fe_2O_3 ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรในสารละลาย นอกจากนี้ยังอาจกล่าวได้ว่า สัดส่วนของ O^{2-} ต่อ OH^{-} ที่เพิ่มเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นนั้น (รูปที่ 4.16) คือ ผลจากปริมาณของ Fe_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 , 0.4 และ 1 โมล/ลิตร (รูปที่ 4.22) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟมีค่าใกล้เคียงกันในระดับ $1 \mu A/cm^2$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

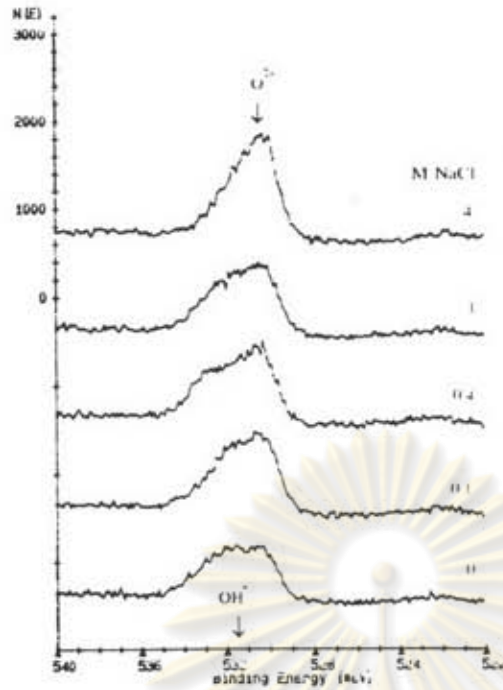
คุณสมบัติด้านการป้องกันการสุกร่อนอาจเปรียบเทียบได้จาก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิด และ ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน ดังผลในตารางที่ 4.2

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โครเมียมในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวของ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ใกล้เคียงกันในทุกช่วงความเข้มข้น จึงทำให้คุณสมบัติทางการสุกร่อนโดยทั่วไปใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าออกไซด์ฟิล์มของโครเมียมสามารถป้องกันการสุกร่อนได้ดีในสภาวะนี้ โลหะจึงมีค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟที่ต่ำมาก ความต้านทานการเกิดการสุกร่อนแบบรูพรุนต่ำลงที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ซึ่งอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับปริมาณออกไซด์ของเหล็กซึ่งมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องที่ฟิล์มได้

จากรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นผลงานของ N. Azzemi และ คณะ⁽⁶⁾ แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อ ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน และ ศักย์ไฟฟ้าของการป้องกันการสุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ซึ่งลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ XPS ซึ่งพบว่าออกไซด์ของเหล็กจะตกผลึกบนผิวมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น พฤติกรรมนี้อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับความต้านทานการสุกร่อนแบบรูพรุนที่ลดลง นอกจากนี้ผลงานของ A.M. Beccaria และคณะ⁽¹⁵⁾ ก็ให้ผลในทางที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ สัดส่วนของเหล็กต่อโครเมียมที่ชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการสุกร่อนแบบรูพรุนลดลง ทั้งหมดนี้แสดงว่า ออกไซด์ของเหล็กอาจเป็นจุดกำเนิดของการสุกร่อนแบบรูพรุนได้



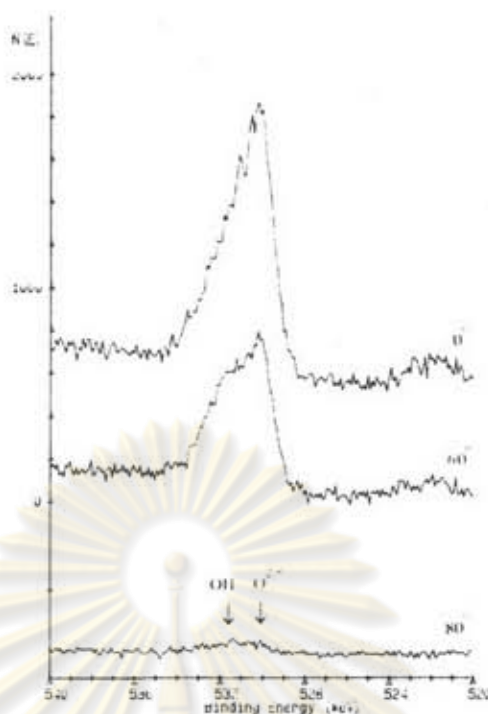
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



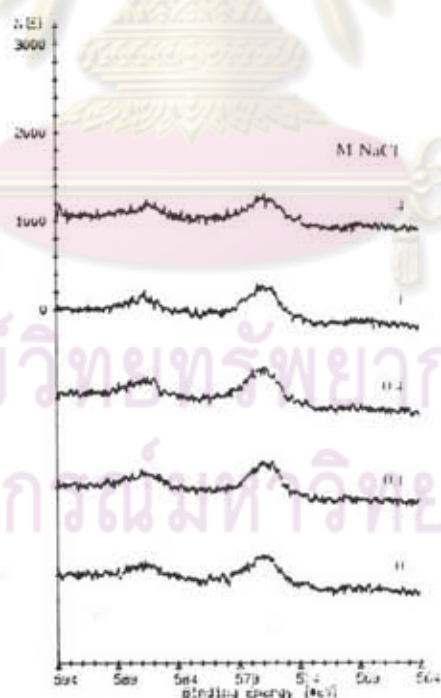
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



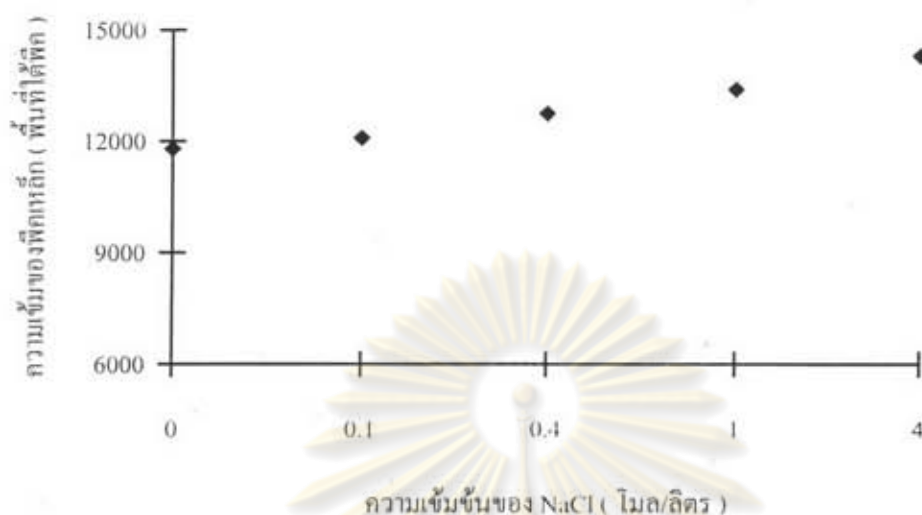
รูปที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นของ NaCl ต่อความเข้มของพีคออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



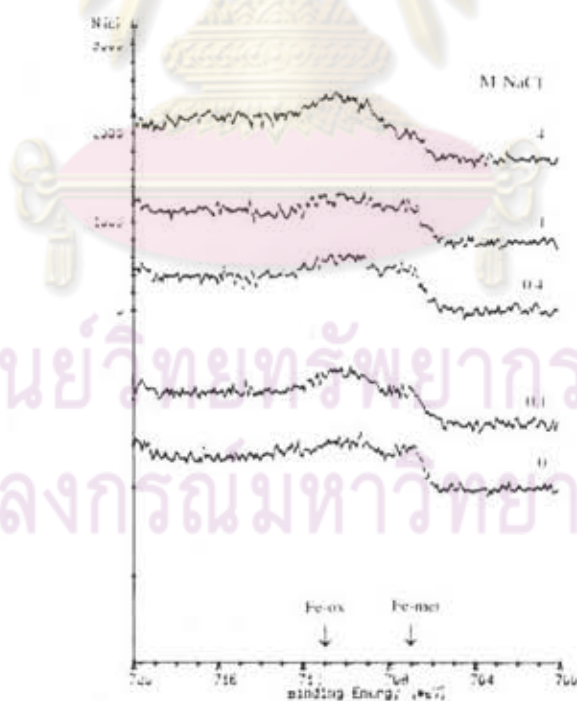
รูปที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง โดยเอียงชิ้นงานขณะวิเคราะห์เป็นมุม 0° , 60° และ 80°



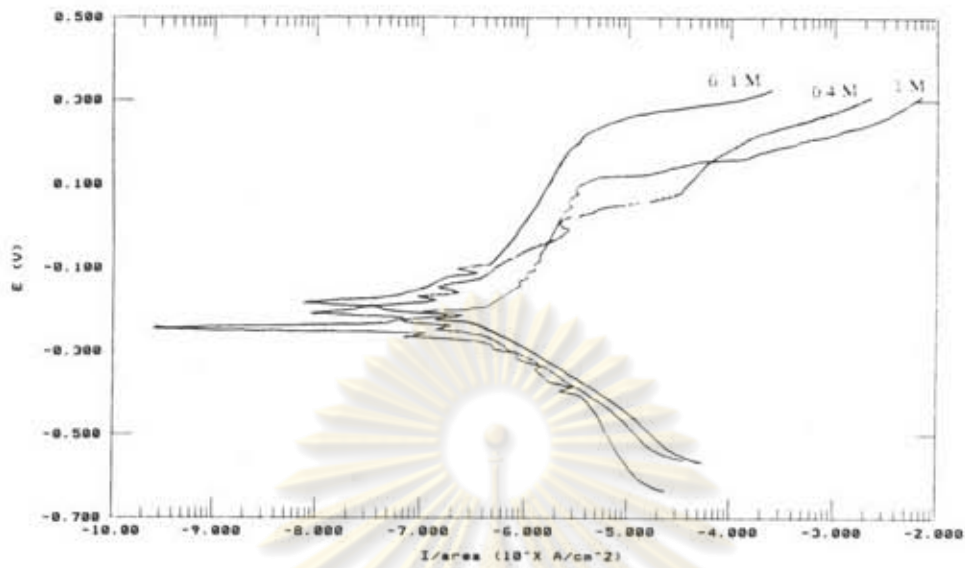
รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์โครเมียม (Cr2p) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.20 ผลของความเข้มข้นของ NaCl ต่อความเข้มข้นของฟลักเคลือบที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ($Fe_{2p_{3/2}}$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.22 แสดงผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก AISI 304 L ในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1 , 0.4 และ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิด (E_{oc}) ค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ (I_p) และค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (E_p) ของเหล็ก AISI 304L ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30°C

ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ โมล/ลิตร	E_{oc} V (SCE)	I_p $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	E_p V (SCE)
0.1	-0.185	0.251-1.413	0.25
0.4	-0.205	$\cong 1.259$	0.19
1.0	-0.234	0.631-1.583	0.10

4.4 พฤติกรรมการสุกก่อนที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของคลอไรด์ต่อองค์ประกอบของฟิล์มที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนคงที่

ผลการวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ด้วยเครื่อง XPS หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลกับโซเดียมคลอไรด์ โดยที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เป็น 0.1 - 4 โมล/ลิตร แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการสุกก่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการสุกก่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กล่าวคือ สภาวะทางเคมีของออกซิเจนที่ผิวชั้นนอกส่วนใหญ่อยู่ในรูป OH^- (รูปที่ 4.23) และเมื่อความเข้มข้นรวมของคลอไรด์สูงขึ้นจะมีสัดส่วนของ O^{2-} น้อยลง (รูปที่ 4.24) นอกจากนี้พบว่า ความเข้มของฟิสิกออกซิเจนคงที่ในช่วงความเข้มข้นรวมของคลอไรด์อยู่ในช่วง 0.1 - 1 โมล/ลิตร แต่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นรวมของคลอไรด์มากกว่า 1 โมล/ลิตร (รูปที่ 4.25)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าความเข้มของฟิสิกโครเมียมค่อย ๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นรวมของคลอไรด์สูงขึ้น (รูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.25) การลดลงของโครเมียมในฟิล์มนี้มีลักษณะเดียวกับฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11) แต่มีผลรุนแรงน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากัน แสดงว่าทั้งไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออนมีผลต่อการลดลงของโครเมียมในฟิล์ม นอกจากนี้พบว่า สภาวะทางเคมีของโครเมียมที่ผิวชั้นนอกก็อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ (พิจารณาจากฟิสิกของออกซิเจนในรูปที่ 4.24) เช่นเดียวกับฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

รูปที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์เหล็กที่ผิวชั้นนอก (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS หลังการลอกผิวเป็นเวลา 5 วินาที) พบว่าเมื่อปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นความเข้มของฟิสิกเหล็กลดลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมของเหล็ก (รูปที่ 4.29) พบว่าเมื่อความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เพิ่มขึ้น เหล็กในสภาวะซึ่งถูกออกซิไดซ์มีสัดส่วนสูงขึ้น ในขณะที่เหล็กในรูปโลหะลดลงเรื่อย ๆ

รูปที่ 4.30 แสดงสเปกตรัมของผลการวิเคราะห์นิกเกิลที่ผิวชั้นนอก พบว่าที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เป็น 0.1 โมล/ลิตร นิกเกิลอยู่ในรูปของโลหะ ในขณะที่

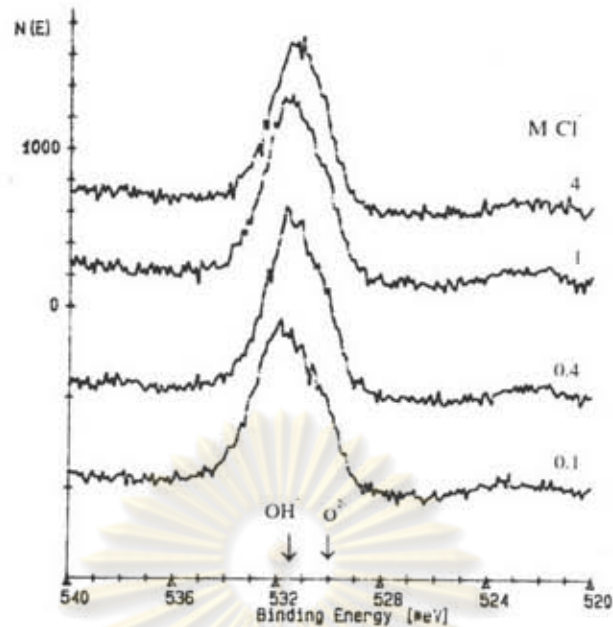
ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์อยู่ในช่วง 0.4 - 1 โมล/ลิตร พบนิเกิลในปริมาณที่น้อยมาก และที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เป็น 4 โมล/ลิตร นิเกิลอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ (Ni(OH)_2)

การวิเคราะห์สารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (AA) พบว่าสารละลายประกอบด้วยไอออนของ โครเมียม เหล็ก และนิเกิล (ตารางที่ 4.4) เช่นเดียวกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ผลการทดลองนี้แสดงว่าฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ไม่เสถียรในสารละลายคลอไรด์ที่มีความเป็นกรดสูง

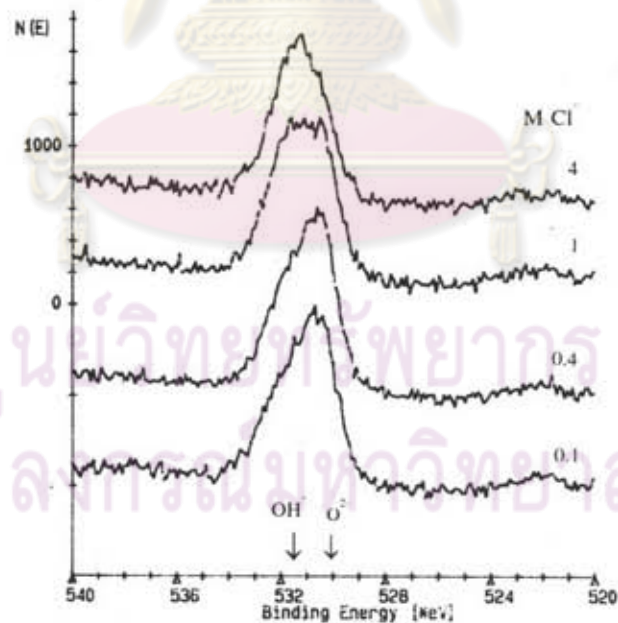
รูปที่ 4.31 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เป็น 0.1 , 1 และ 4 โมล/ลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์สูงขึ้นจะเร่งปฏิกิริยาอะโนดิก และช่วงพาสซีฟแคบลง นอกจากนี้พบว่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟเพิ่มขึ้น และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ผลดังกล่าวแสดงว่า ความต้านทานการสุกร้อนของโลหะลดลงเมื่อความเข้มข้นรวมของคลอไรด์สูงขึ้น

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการสุกร้อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการสุกร้อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เพียงแต่ผลของคลอไรด์ไอออนจากโซเดียมคลอไรด์มีความรุนแรงน้อยกว่าผลของกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากัน

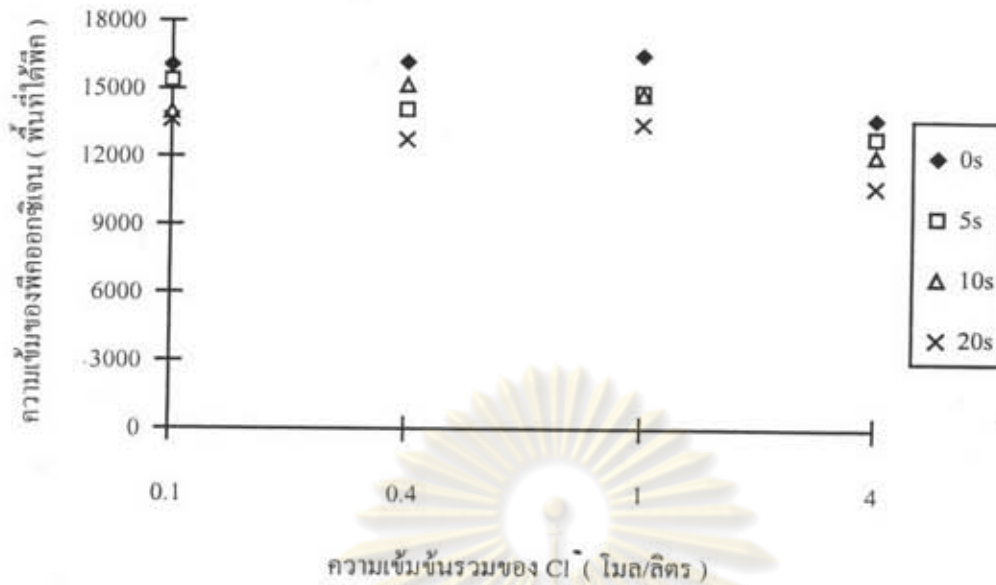
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



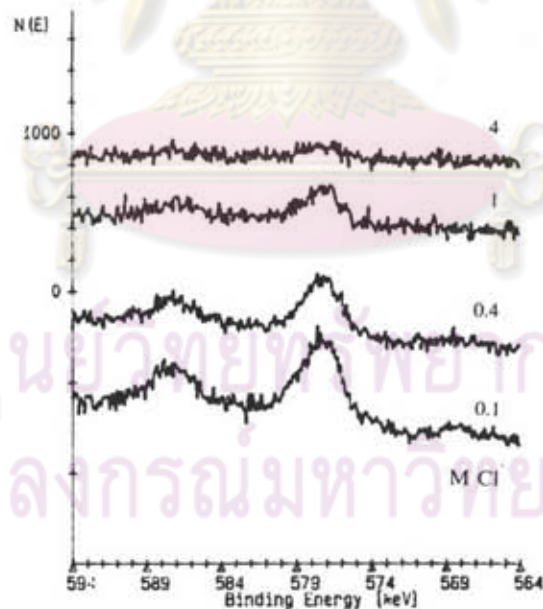
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



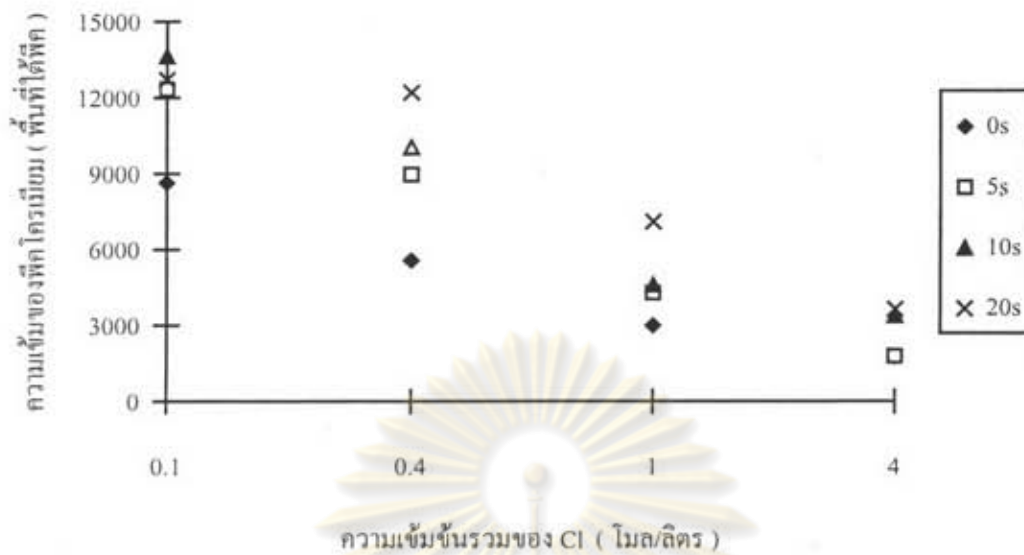
รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.25 ผลของความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่อความเข้มข้นของฟิสิกส์ออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



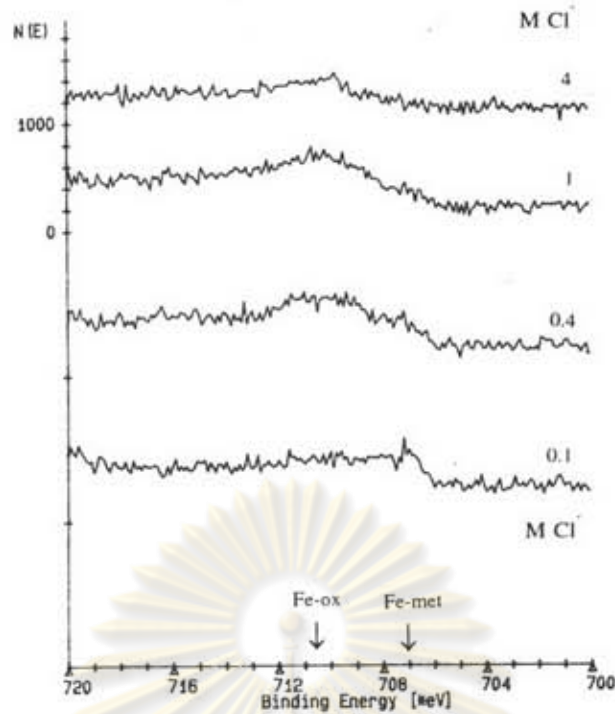
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์โครเมียม (Cr2p) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



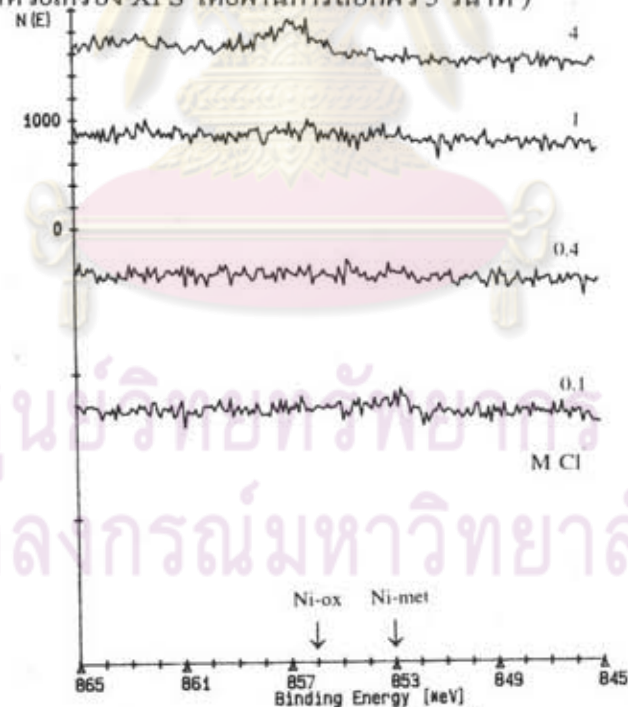
รูปที่ 4.27 ผลของความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่อความเข้มของพิกโครเมียมที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0 , 5 ,10 และ 20 วินาที)



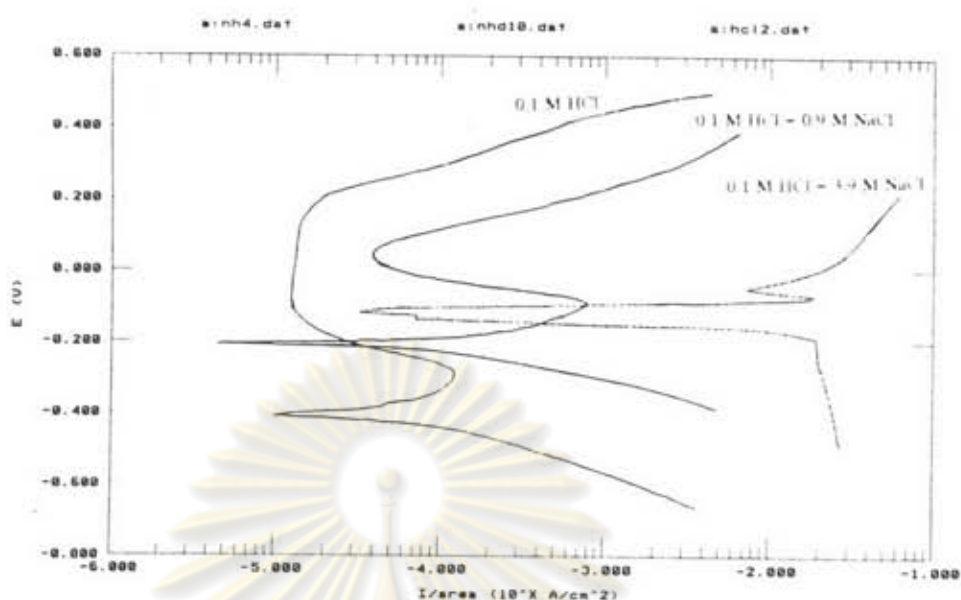
รูปที่ 4.28 ผลของความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่อความเข้มของพิกเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์เหล็ก ($\text{Fe}2p_{3/2}$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์นิกเกิล ($\text{Ni}2p_{3/2}$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.31 แสดงเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก AISI 304L ในสารละลายผสมของ HCl โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 0.1 , 1 และ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตร กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ต่างกัน โดยผ่านการทำปฏิกิริยากับเหล็ก AISI 304L ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์สารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ฟชัน)

ความเข้มข้นรวมของ Cl ⁻ โมล/ลิตร	Fe มิลลิกรัม/ลิตร	Ni มิลลิกรัม/ลิตร	Cr มิลลิกรัม/ลิตร
0.1	0.713	3.333	0.163
0.4	4.977	12.269	1.734
1	5.929	11.678	1.957
4	9.223	9.866	3.215

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (E_{oc}) ความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟ (I_p) และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (E_p) ของเหล็ก AISI 304L ในสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล/ลิตรกับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เป็น 0.1, 1 และ 4 โมล/ลิตร

ความเข้มข้นรวมของ Cl^- โมล/ลิตร	E_{oc} V (SCE)	I_p mA/cm^2	E_p V (SCE)
0.1	-0.407	0.013	0.19
1	-0.210	0.039	0.06
4	-0.123	7.211	-0.06

4.4.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรเจนอ็อกไซด์ต่อองค์ประกอบของฟิล์มที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์คงที่

ผลการวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ด้วยเครื่อง XPS หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริก กับโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 1 และ 4 โมล/ลิตร แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการผุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการผุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนอ็อกไซด์ในสารละลายเพียงเล็กน้อย (0.01 โมล) จะทำให้สภาวะทางเคมีของออกซิเจนที่ผิวชั้นนอกเปลี่ยนจากสภาพที่มี M-O เป็นส่วนใหญ่ กลายเป็นสภาพที่มี M-OH เป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33) รูปที่ 4.34 แสดงความเข้มของพีคออกซิเจนที่ผิวชั้นต่าง ๆ ของชิ้นงานซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 4 โมล/ลิตร พบว่าความเข้มของพีคออกซิเจนจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนอ็อกไซด์เพียง 0.01 โมล/ลิตร และความเข้มของพีคออกซิเจนจะอยู่ในระดับคงที่ในช่วงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ตั้งแต่ 0.01 - 4 โมล/ลิตร

รูปที่ 4.35 และ 4.37 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของโครเมียมที่ผิวชั้นนอกของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 1 และ 4 โมล/ลิตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณกรดไฮโดรเจนอ็อกไซด์ในสารละลาย โครเมียมที่ผิวจะลดลง ซึ่งเป็นทำนองเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์เท่ากันให้ผลรุนแรงกว่า

เนื่องจากมีปริมาณคลอไรด์รวมที่สูงกว่า นอกจากนี้พบว่าโครเมียมที่ผิวชั้นต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้น (รูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.38) โดยในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ 4 โมล/ลิตร โครเมียมจะลดลงอย่างมากแม้ว่าปริมาณไฮโดรเจนอ็อกไซด์จะมีเพียงเล็กน้อย (0.01 โมล/ลิตร) ส่วนในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นของคลอไรด์รวม 1 โมล/ลิตร โครเมียมที่ผิวของโลหะจะลดลงมากที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์เป็น 0.1 โมล/ลิตร หากเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยไม่มีส่วนผสมของไฮเดียมคลอไรด์ พบว่าโครเมียมจะลดลงอย่างมากเช่นกันที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์เป็น 0.4 โมล/ลิตร

ความเข้มข้นของฟิสิกส์ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้น 1 และ 4 โมล/ลิตร จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์สูงขึ้น (รูปที่ 4.36) โดยปริมาณเหล็กที่ผิวมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งในสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 1 และ 4 โมล/ลิตร รูปที่ 4.40 แสดงสภาวะทางเคมีของเหล็กที่ผิวในสภาวะเดียวกันจะเห็นได้ว่าเหล็กที่อยู่ในรูปของโลหะลดลง ในขณะที่เหล็กในสภาวะซึ่งถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

ผลการทดลองในหัวข้อนี้ (4.4) แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนอ็อกไซด์และ/หรือ คลอไรด์อ็อกไซด์เพิ่มขึ้นในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและไฮเดียมคลอไรด์ จะมีส่วนทำให้ความต้านทานการผุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมลดลง เพราะการลดลงของโครเมียมในชั้นฟิล์มและสภาวะทางเคมีของออกซิเจนอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่มากขึ้น นอกจากนี้เหล็กและนิกเกิลยังถูกออกซิไดซ์มาก อันเป็นผลมาจากการสูญเสียโครเมียมในชั้นฟิล์ม ทำให้การป้องกันการผุกร่อนไม่เพียงพอ เหล็กและนิกเกิลในรูปของโลหะในชั้นฟิล์มจึงทำปฏิกิริยากับสารละลาย เกิดเป็นสารประกอบในรูปของไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่เสถียร แล้วละลายลงสู่สารละลายในรูปของอ็อกไซด์ในที่สุด เหล็กและนิกเกิลในรูปของโลหะในชั้นฟิล์มจึงลดลง ดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกันกับพฤติกรรมการผุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

จากพฤติกรรมดังกล่าวที่คล้ายคลึงกันอาจกล่าวได้ว่า เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและไฮเดียมคลอไรด์ เสมือนกับว่าทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นค่าหนึ่ง โดยที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกนี้จะทำให้ ความเข้มข้นของฟิสิกส์โครเมียมที่ชั้นฟิล์มเท่ากัน เรียกว่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเทียบเท่า จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 - 4.4 สามารถประมาณค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเทียบเท่าคือ

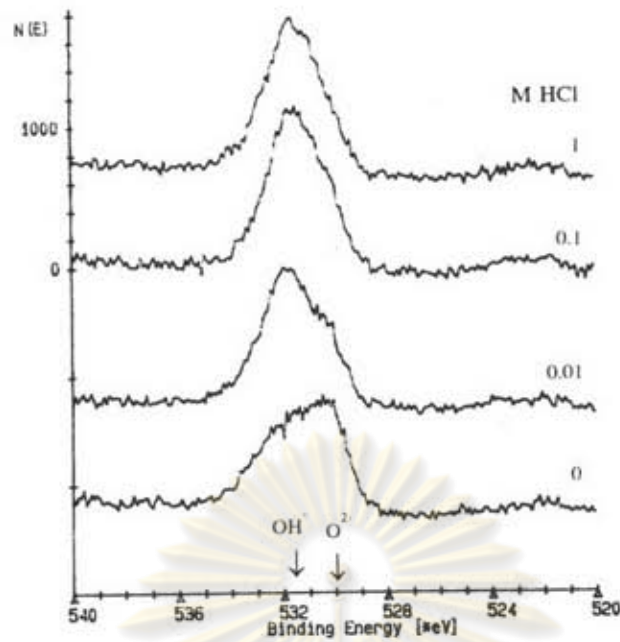
$$[\text{HCl}]_{\text{เทียบเท่า}} = [\text{HCl}] + 0.1 [\text{NaCl}]$$

เมื่อ	[HCl] _{เทียบเท่า}	คือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเทียบเท่า
	[HCl]	คือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (อยู่ในช่วง 0.01 - 1 โมล/ลิตร) ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมคลอไรด์
	[NaCl]	คือ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (อยู่ในช่วง 0 - 4 โมล/ลิตร) ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมคลอไรด์

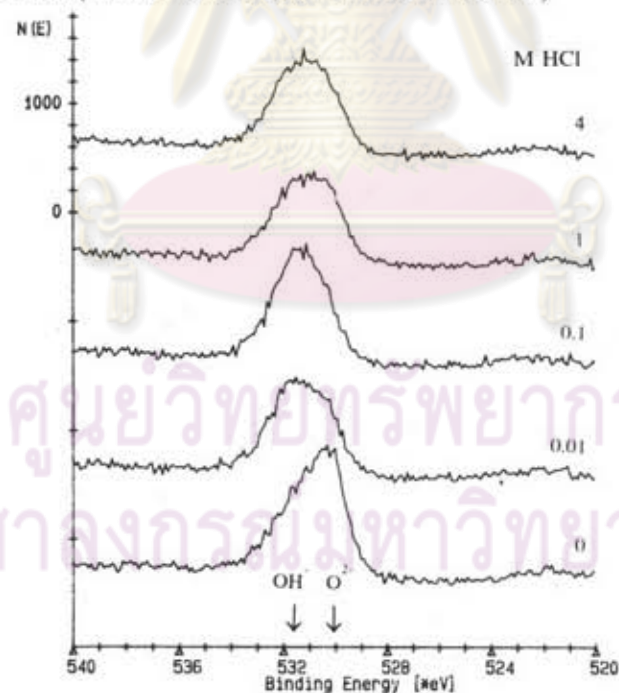
จากรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลงานของ S. Torchio⁽³⁾ แสดงผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ XPS พบว่า ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมความร้อนกับผลของการวิเคราะห์ฟิล์มในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.2 กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเทียบเท่าต่ำกว่า 0.5 โมล/ลิตร เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L จะเกิดการสุกก่อนแบบรูปพูน โดยมีความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวชั้นนอกสูงกว่า 2,800 เมื่อความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเทียบเท่าสูงกว่าหรือเท่ากับ 0.5 โมล/ลิตร เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L จะเกิดการสุกก่อนภายใต้ความเค้น โดยมีความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวชั้นนอกต่ำกว่า 2,800 ขณะที่ความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวชั้นในสูงกว่า 2,800 เมื่อความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเทียบเท่าสูงกว่าหรือเท่ากับ 3 โมล/ลิตร เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L จะเกิดการสุกก่อนแบบทั่วไปอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยมีความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวชั้นนอกและผิวชั้นในต่ำกว่า 2,800

เมื่อพิจารณาความเข้มของพีคโครเมียมที่เนื้อโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งมีโครเมียมเป็นองค์ประกอบร้อยละ 18.9 (ค่าความเข้มประมาณ 5600) ความเข้มของพีคโครเมียม 2,800 เท่ากับร้อยละ 50 ของความเข้มของพีคโครเมียมที่เนื้อโลหะ และจากรายงานของเอกสารบางฉบับ^{(1) (20)} ซึ่งอ้างว่าปริมาณธาตุประมาณได้ว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของพีค อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณของโครเมียมซึ่งให้ค่าความเข้มของพีคโครเมียม 2,800 มีค่าเทียบเท่ากับปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมประมาณร้อยละ 10 ซึ่งเป็นปริมาณโครเมียมต่ำสุดที่จะสามารถป้องกันการสุกก่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม⁽¹⁹⁾

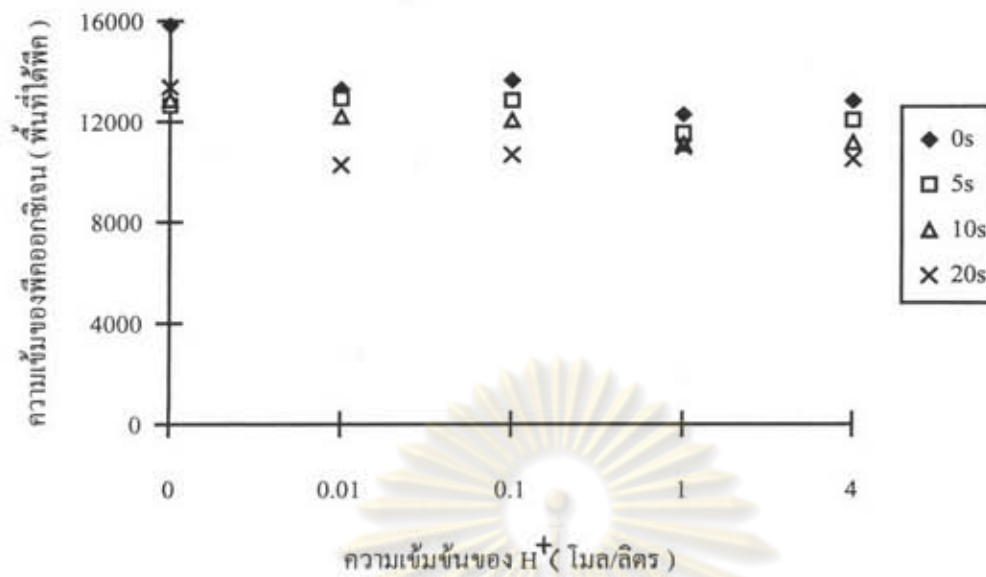
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



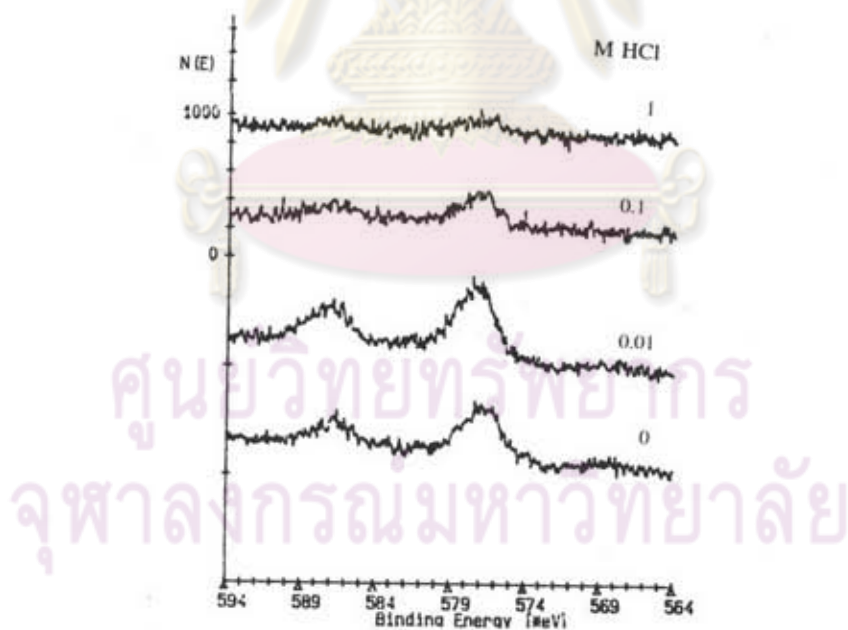
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl⁻ เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



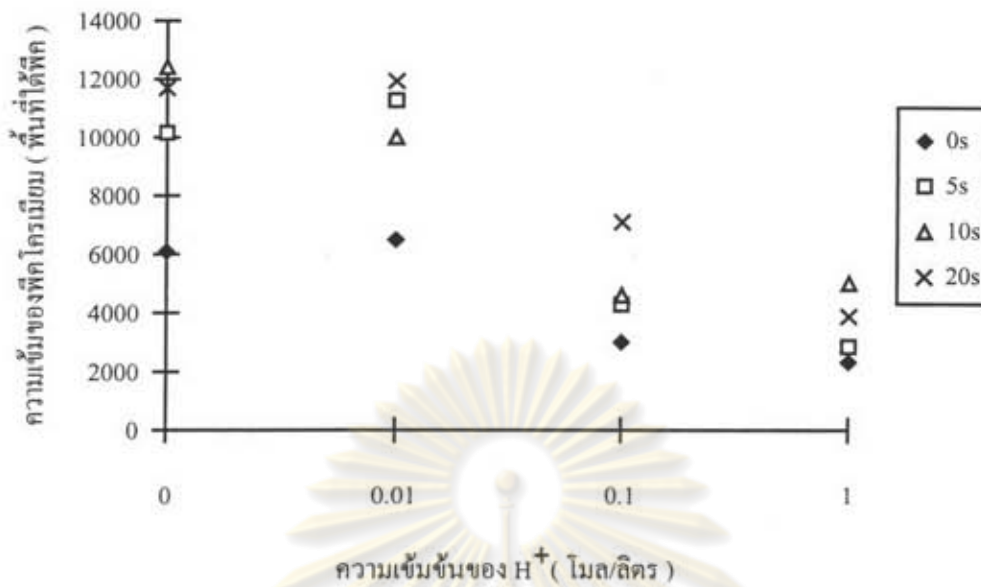
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl⁻ เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



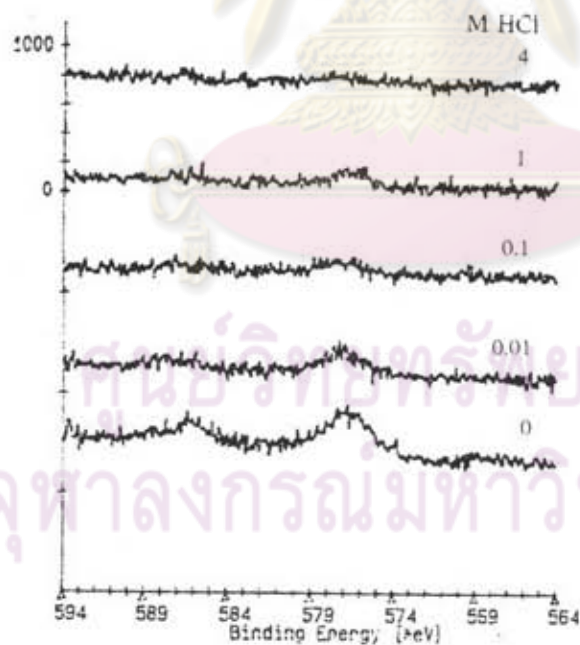
รูปที่ 4.34 ผลของความเข้มข้นของ H^+ ต่อความเข้มข้นของฟิสิกออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl⁻ เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



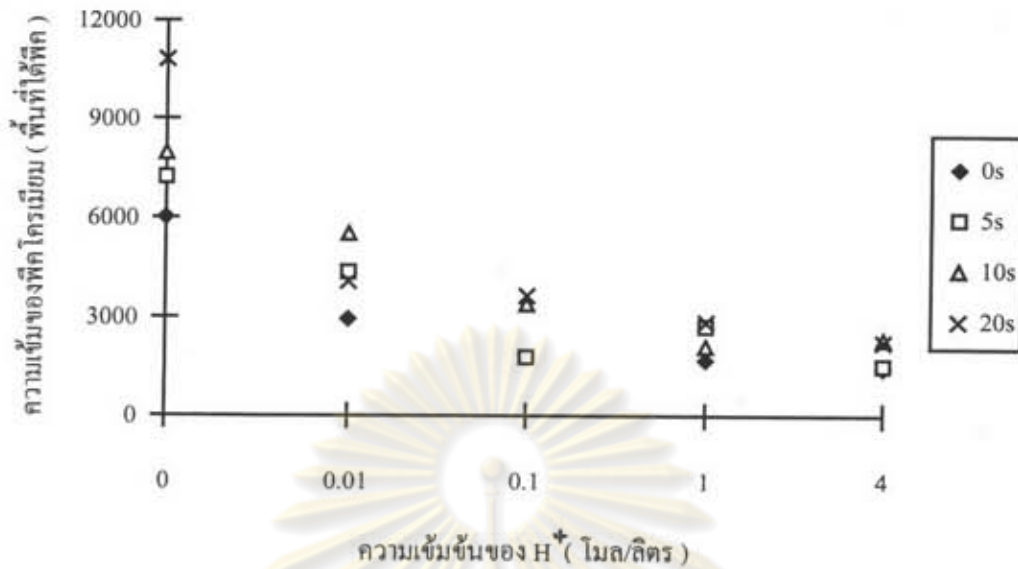
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ โครเมียม ($Cr2p$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.36 ผลของความเข้มข้นของ H⁺ ต่อความเข้มของพีคโครเมียมที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl⁻ เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



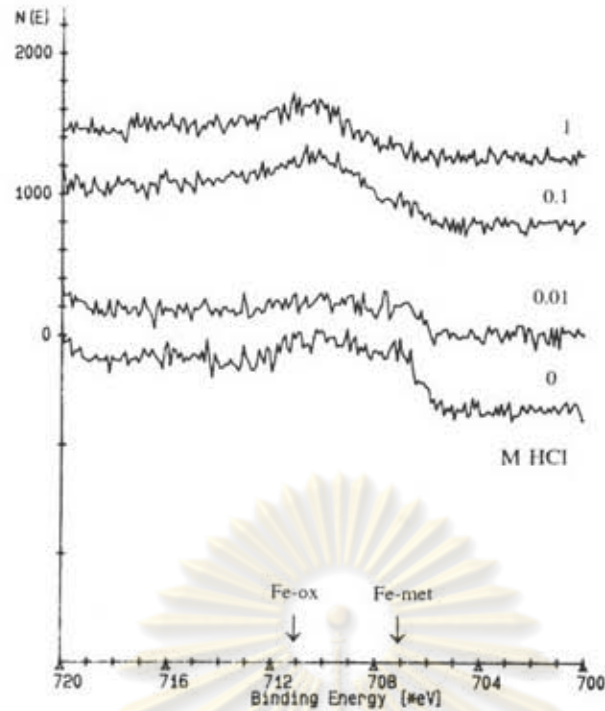
รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ โครเมียม (Cr2p) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.38 ผลของความเข้มข้นของ H^+ ต่อความเข้มของพิตโครเมียมที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl^- เท่ากับ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 0, 5, 10 และ 20 วินาที)



รูปที่ 4.39 ผลของความเข้มข้นของ H^+ ต่อความเข้มของพิตเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของ Cl^- เท่ากับ 1 และ 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (Fe_{2p_{3/2}}) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับ NaCl ที่ความเข้มข้นรวมของคลอไรด์เท่ากับ 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยการลอกผิว 5 วินาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการสุกร่อนที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายผสม ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมคลอไรด์

ผลการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน โครเมียม และเหล็ก ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L หลังจากการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 และ 1 โมล/ลิตร สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมล/ลิตร และสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลกับโซเดียมคลอไรด์ 0.9 โมลในสารละลาย 1 ลิตร ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถแสดงผลของอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยาในช่วง $30^{\circ} - 80^{\circ} \text{C}$ กับแนวโน้มของปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 L ได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อสารละลายที่ทำปฏิกิริยาเป็นโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ความเข้มของพีคออกซิเจนที่ผิวชั้นนอกของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.41) ในขณะที่ความเข้มของพีคออกซิเจนจะลดลง เมื่อสารที่ทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L เป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 และ 1 โมล/ลิตร หรือ สารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลกับโซเดียมคลอไรด์ 0.9 โมลในสารละลาย 1 ลิตร (รูปที่ 4.42) สภาวะทางเคมีของออกซิเจนที่ผิวของโลหะซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะเปลี่ยนเป็นรูปของไฮดรอกไซด์มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (รูปที่ 4.43) ในขณะที่สภาวะทางเคมีของออกซิเจนซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมคลอไรด์ ยังมีสภาวะทางเคมีที่ผิวเหมือนกันทั้งอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 4.44)

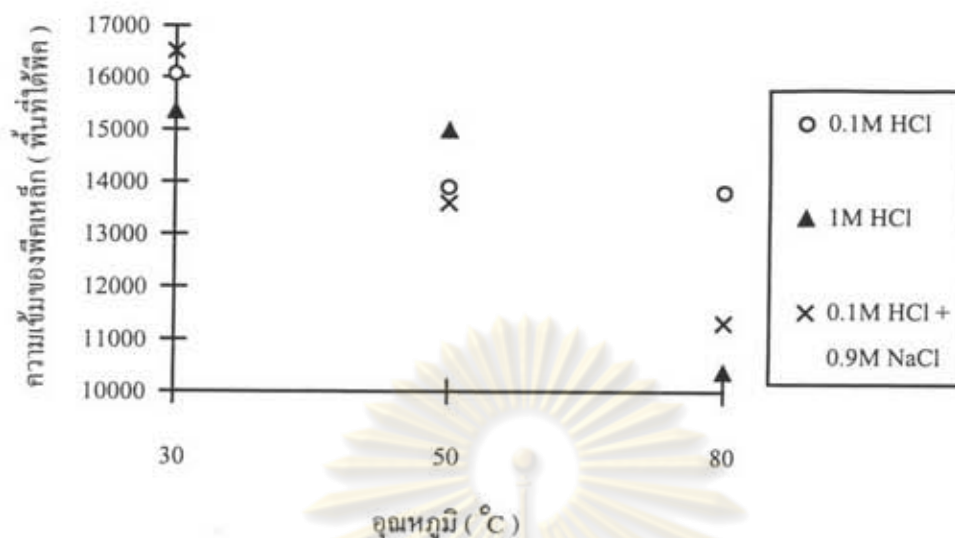
รูปที่ 4.45 และ 4.46 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเข้มของพีคโครเมียม และเหล็กที่ผิวชั้นนอก พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเข้มของพีคโครเมียม และเหล็กมีแนวโน้มที่จะลดลง รูปที่ 4.47 และรูปที่ 4.48 แสดงสภาวะทางเคมีของเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กในสภาวะของโลหะลดลง

ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงความสามารถในการต้านทานการสุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า ความสามารถในการต้านทานการสุกร่อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ค่า I_p เพิ่มขึ้น) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 80°C ความต้านทานการสุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ลดลงอย่างมากจนกระทั่งไม่ปรากฏช่วงพาสซีฟในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมล/ลิตรและสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมล/ลิตร

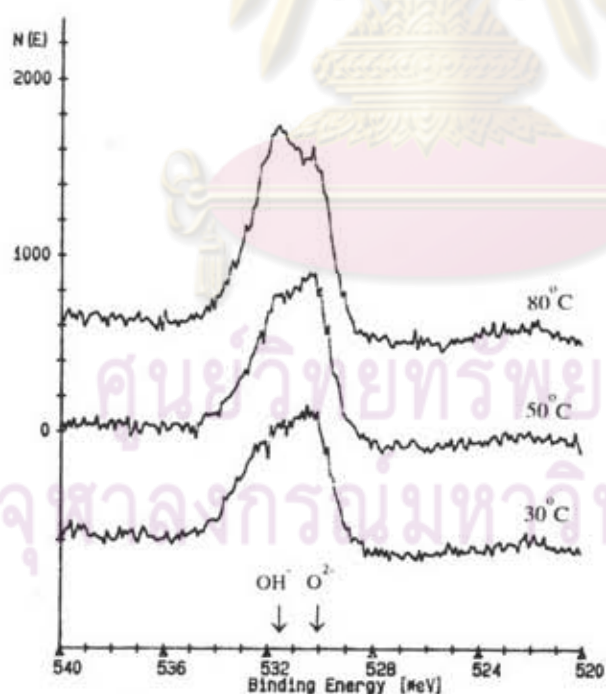
จากรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการสุกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งพบว่าความต้านทานการสุกร่อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่จากผลการวิเคราะห์ XPS แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของฟิล์ม โดยเฉพาะ โครเมียมและเหล็ก (รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46) มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักใน ขณะที่ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการสุกร่อนมีค่อนข้างมาก R. Nishimura ⁽²⁴⁾ ให้ความเห็นว่า พฤติกรรมการสุกร่อนที่เปลี่ยนไปนั้นมีผลมาจาก ผลทางด้านจลนพลศาสตร์ (kinetics) ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าผลจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของชั้นฟิล์ม โดยเฉพาะผลของเขาในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเป็นเส้นตรง แสดงเป็นนัยว่าฟิล์มไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะหากเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของชั้นฟิล์มอย่างมากน่าจะมีจุดหักเหของกราฟเกิดขึ้น



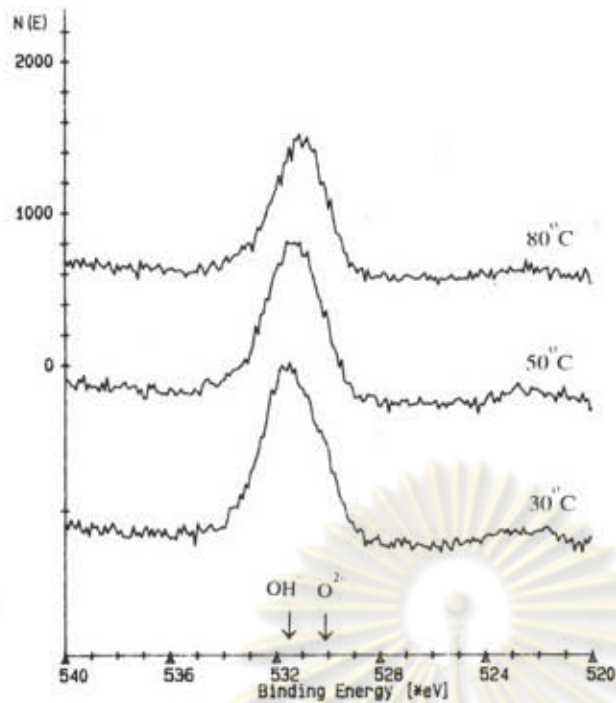
รูปที่ 4.41 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มของฟลูออโรซีนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80 °C (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS ผ่านการลอกผิว 0 , 5 , 10 และ 20 วินาที)



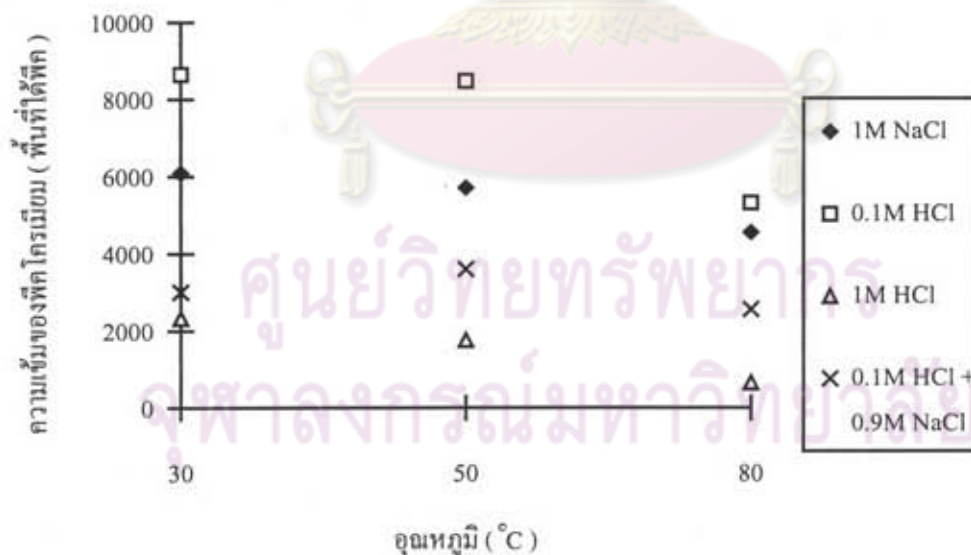
รูปที่ 4.42 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มของฟลักซ์ออกซิเจนที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 และ 1 โมล/ลิตร และสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมล กับ NaCl 0.9 โมลในสารละลาย 1 ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80 °C (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



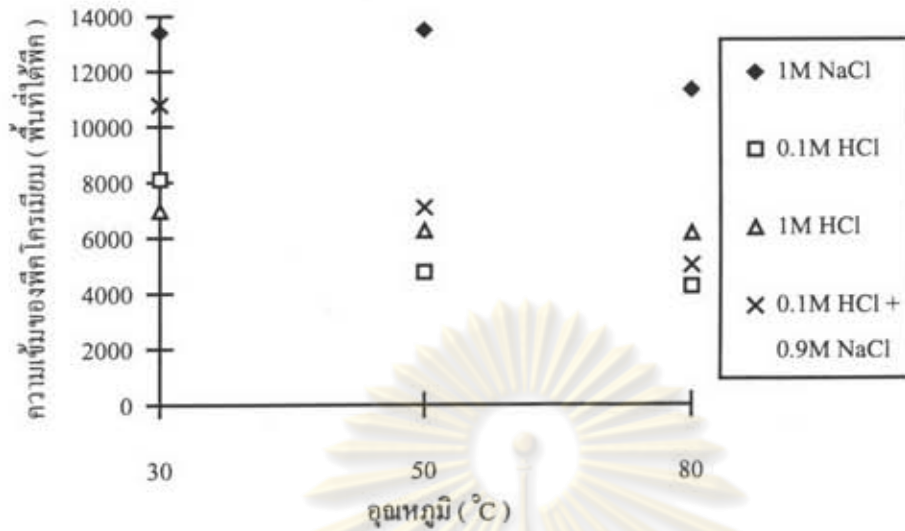
รูปที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 80 °C (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



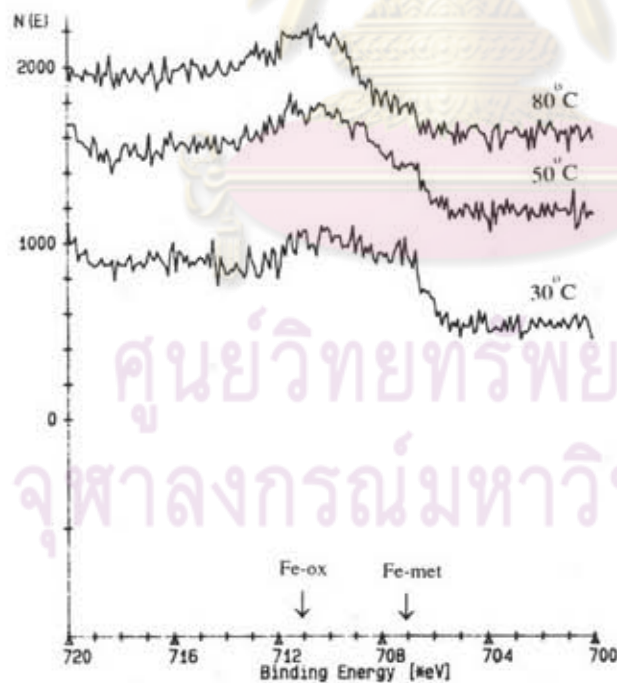
รูปที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ออกซิเจน (O1s) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมของ HCl 0.1 โมลกับ NaCl 0.9 โมลในสารละลาย 1 ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 80°C (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



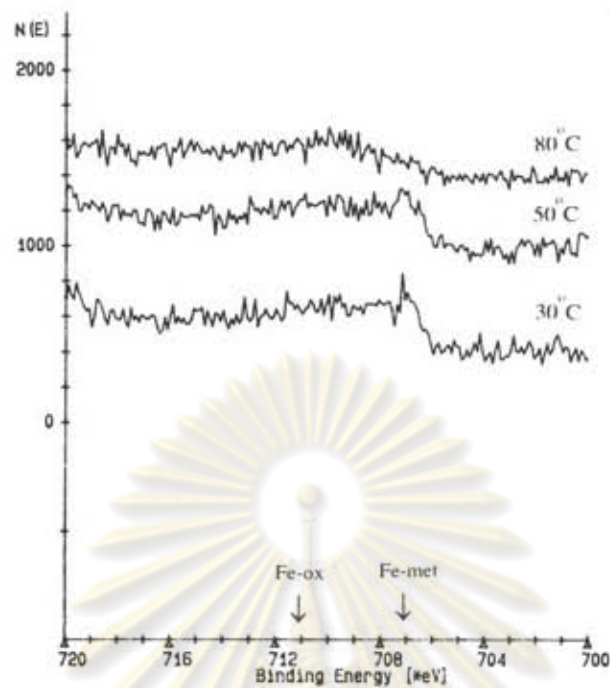
รูปที่ 4.45 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของฟิตโครเมียม ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl และ/หรือ NaCl ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 80°C (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.46 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มของพีคเหล็กที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl และ/หรือ NaCl ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 80 °C (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XPS โดยผ่านการลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (Fe_{2p3/2}) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 80 °C (ทำการวิเคราะห์หลังจากลอกผิว 5 วินาที)



รูปที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์เหล็ก (Fe_{2p3/2}) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็ก AISI 304L หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80 °C (ทำการวิเคราะห์หลังจากลอกผิว 5 วินาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดเส้นโพลาริเซชันในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และ/หรือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 , 50 และ 80 °C

สารละลาย	อุณหภูมิ C°	Ip mA/cm ²	Eoc V (SCE)	Ep V (SCE)
โซเดียมคลอไรด์ 1 โมล/ลิตร	30	25x10 ⁴ -1.4x10 ³	-0.243	0.10
	50	3.1x10 ⁴ -1.26x10 ³	-0.207	0.06
	80	-	-0.172	-
กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล/ลิตร	30	0.013	-0.407	0.20
	50	0.016	-0.018	0.34
	80	0.083	-0.375	-0.14
กรดไฮโดรคลอริก 1 โมล/ลิตร	30	0.048	-0.902	-0.61
	50	1.12	-0.507	-0.23
	80	-	-0.410	-
กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล ผสมโซเดียมคลอไรด์ 0.9 โมล ในสารละลาย 1 ลิตร	30	0.009	-0.185	0.02
	50	0.023	-0.052	0.15
	80	4.927	-0.454	-0.14

* หมายเหตุ ไม่ปรากฏช่วงพาสซีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

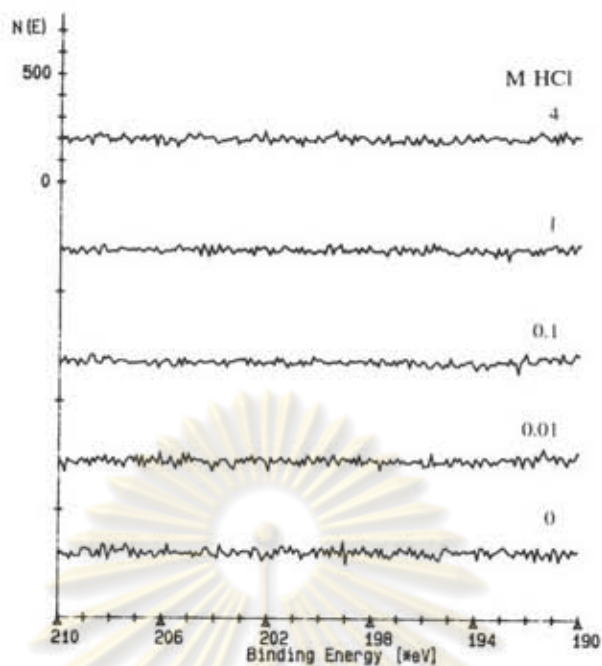
4.6 ผลการวิเคราะห์คลอไรด์ที่ผิวชั้นนอกของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายคลอไรด์

รูปที่ 4.49 และ 4.50 แสดงสเปกตรัมของผลการวิเคราะห์คลอไรด์ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายคลอไรด์เข้มข้นที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 80° ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไม่ปรากฏคลอไรด์ในชั้นฟิล์ม ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ในสารละลายสูงก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นไปได้ในลักษณะเช่นเดียวกับผลของ J. Gluszek และ K. Nitsch⁽²¹⁾ ซึ่งทำการวิเคราะห์ฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ ไม่พบคลอไรด์ในชั้นฟิล์มหรือพบในปริมาณที่น้อยมาก นอกจากนี้ J. Gluszek ยังได้อ้างถึงผลงานอื่น ๆ ที่ให้ผลทำนองเดียวกัน

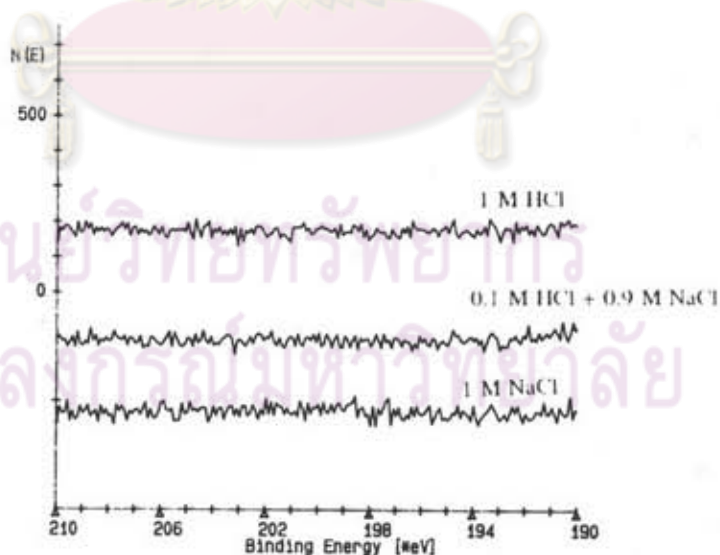
ผลการทดลองนี้จึงสนับสนุนความคิดที่ว่า⁽¹⁹⁾ คลอไรด์มีบทบาทในการทำลายเสถียรภาพของชั้นฟิล์ม แต่ไม่เป็นองค์ประกอบของชั้นฟิล์ม โดยคลอไรด์นี้ออนอาจทำปฏิกิริยากับฟิล์มเกิดสารประกอบ MCl_3 ซึ่งไม่เสถียร เป็นผลในการเร่งการละลายของอออนของโลหะในชั้นฟิล์ม หรืออาจเกิดจากการที่คลอไรด์อออนมีบทบาทในการลดแรงดึงผิวของชั้นฟิล์มทำให้เสถียรภาพของฟิล์มลดลง

อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวขัดแย้งกับผลของ K. Asami และคณะ⁽¹²⁾ และผลของ Z. Fang และคณะ⁽¹⁴⁾ ซึ่งวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันแต่พบคลอไรด์ในชั้นฟิล์ม ความไม่สอดคล้องดังกล่าวน่าจะมีสาเหตุมาจาก การทำโพลาไรเซชันซึ่งจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงานทำให้คลอไรด์อออนถูกดูดซับเข้าสู่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ หรืออาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเครื่องทำการวิเคราะห์ ในผลงานชิ้นนี้ใช้เครื่องอุลตราโซนิกในการทำความสะอาดซึ่งอาจทำให้คลอไรด์ซึ่งมีอยู่เล็กน้อยที่ผิวชั้นนอกหลุดออกจากผิวได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



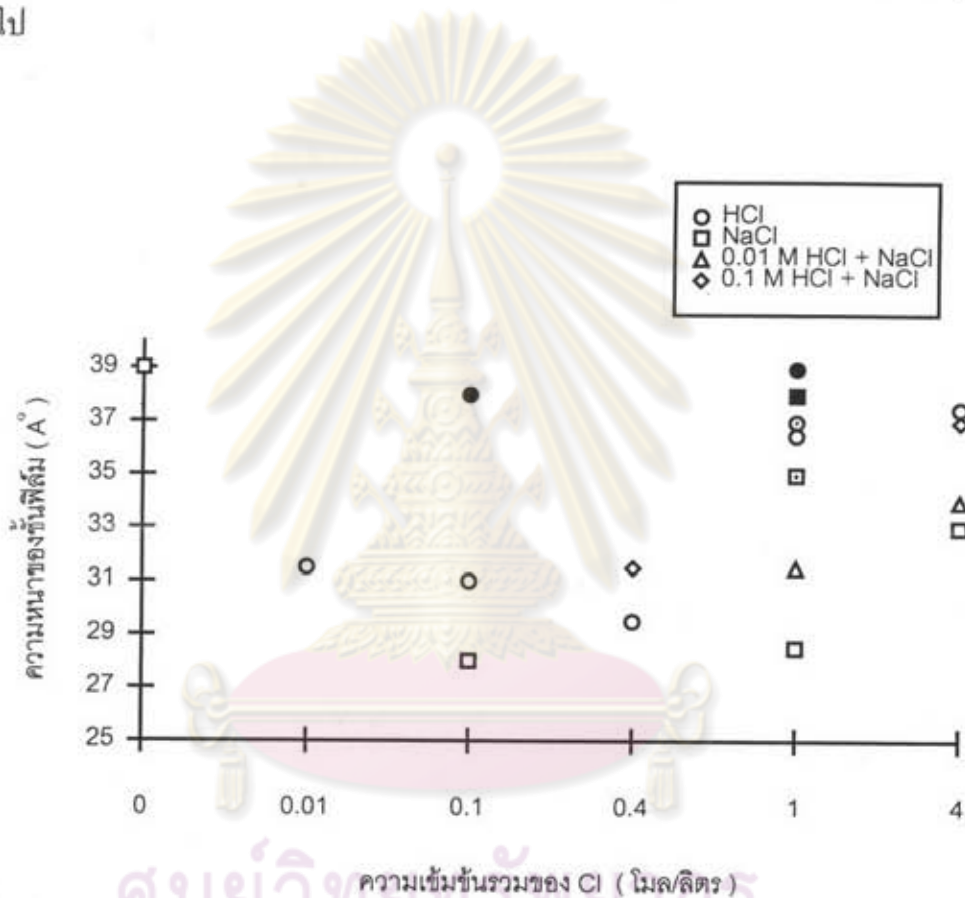
รูปที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์ Cl^+ ($\text{Cl}2p$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวชั้นนอกของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย Cl^- เข้มข้น 4 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)



รูปที่ 4.50 ผลการวิเคราะห์ Cl^+ ($\text{Cl}2p$) ด้วยเครื่อง XPS ที่ผิวชั้นนอกของเหล็ก AISI 304L หลังผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลาย Cl^- เข้มข้น 1 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (ทำการวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการลอกผิว)

4.7 ผลการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์ม

รูปที่ 4.51 แสดงความหนาของชั้นฟิล์มที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มอยู่ในช่วง 30 - 40 Å ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับงานของ K. Asami และ คณะ⁽¹¹⁾ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหนาสูงส่วนใหญ่ คือ ฟิล์มของชั้นงานที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีปริมาณคลอไรด์สูงหรืออุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม K. Asami⁽²²⁾ แสดงความเห็นว่าคุณสมบัติทางการผุกร่อน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์มแต่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของชั้นฟิล์ม ความหนาของชั้นฟิล์มควรจะเกี่ยวข้องกับระยะเวลาที่ชั้นฟิล์มจะถูกทำลายหมดไป



รูปที่ 4.51 ผลการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์มของเหล็ก AISI 304L ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ๆ กัน

□, ○ = 30 °C

▣, ⊙ = 50 °C

■, ● = 80 °C

4.8 ผลการทดลองกับทฤษฎีพาสซีวตี (passivity)

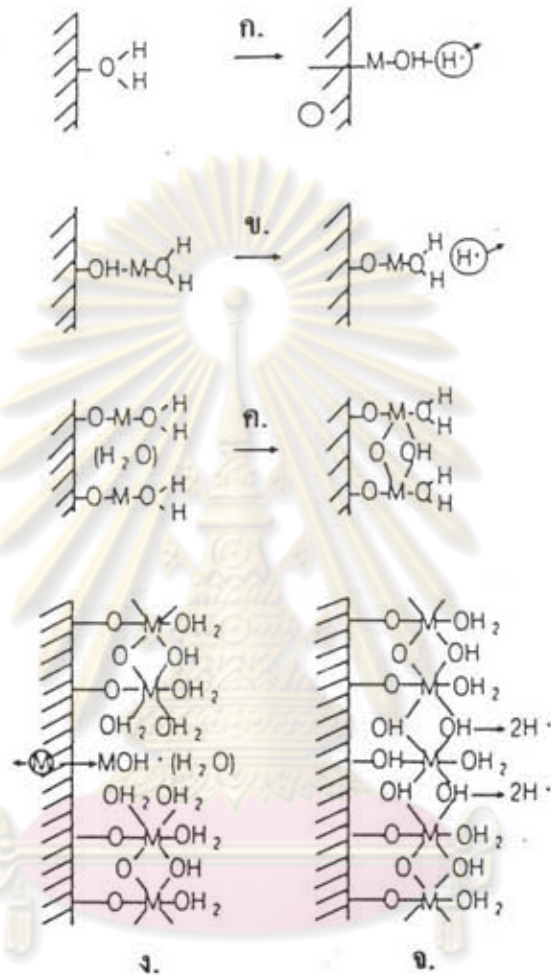
ผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 - 4.7 สนับสนุนกลไกการเกิดฟิล์มตามสมมุติฐานการเกิดดีโปรโทไนเซชันของน้ำ (deprotonization of water) ซึ่งถูกเสนอโดย G. Okamoto ⁽¹⁹⁾ โดยมีกลไกตามรูปที่ 4.52 กล่าวคือ ในขั้นแรกจะเกิดการละลายของแคโทดไอออน และเกิดดีโปรโทไนเซชัน หีไอออนของไฮโดรเจน และสารประกอบของ H_2O-M-H_2O ก่อน หลังจากนั้นเกิดดีไฮเดรชัน (dehydration) เกิดปฏิกิริยาซึ่งให้ไฮโดรเจนไอออนอย่างต่อเนื่องได้ สารประกอบของ HO-M-HO และ O-M-O ในที่สุด โดยที่ผิวชั้นนอกเป็น M-OH เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่ผิวชั้นในจะประกอบด้วย M-O เป็นส่วนใหญ่

ความแตกต่างระหว่างองค์ประกอบของชั้นฟิล์มในสภาวะต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพขององค์ประกอบของเฟสต่างๆในชั้นฟิล์มในสภาวะนั้นซึ่งอาจแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. ฟิล์มซึ่งเสถียรในสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งจุ่มในน้ำกลั่น หรือในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตามแบบจำลองที่เสนอในที่นี้ ดังรูปที่ 4.53 ก. และ ข. ในสภาวะนี้เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความต้านทานการผุกร่อนที่ดี

2. ฟิล์มซึ่งไม่เสถียรในสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งจุ่มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก หรือในสารละลายผสมของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ ตามแบบจำลองที่เสนอไว้ในรูปที่ 4.53 ค. และ ง. ในสภาวะนี้เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความต้านทานการผุกร่อนที่ไม่ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.52 ขั้นตอนการเกิดชั้นฟิล์มโดยสมมุติฐานการเกิดดิโปรโทไนเซชันของน้ำ

ก. เกิดการละลายของแคทไอออนและเกิดดิโปรโทไนเซชัน

ข. เกิดขบวนการดิโปรโทไนเซชัน

ค. เกิดการเชื่อมโยงกับจุดข้างเคียง

ง. เกิดฟิล์มขึ้นที่ผิวบางส่วนขณะที่ยังมีจุดซึ่งง่ายต่อการละลายเหลืออยู่

จ. ฟิล์มแข็งแรงขึ้นโดยจุดซึ่งง่ายต่อการละลายเกิดดิโปรโทไนเซชัน

และเกิดการเชื่อมโยงกับฟิล์มที่เกิดขึ้นแล้ว

ไฮดรอกไซด์ของโครเมียม
ออกไซด์ของโครเมียม
ออกไซด์ของโครเมียม + ออกไซด์ของเหล็ก
ออกไซด์ของโครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล
โครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล

ก.

ไฮดรอกไซด์ของโครเมียม
ออกไซด์ของโครเมียม
ออกไซด์ของโครเมียม + ออกไซด์ของเหล็ก
ออกไซด์ของโครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล
โครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล

ข.

ไฮดรอกไซด์ของโครเมียม
ออกไซด์ของโครเมียม
ออกไซด์ของโครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล
โครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล

ค.

ไฮดรอกไซด์ของโครเมียม + ไฮดรอกไซด์ ของเหล็ก + ไฮดรอกไซด์ของนิกเกิล
ออกไซด์ของโครเมียม + ออกไซด์ของเหล็ก
ออกไซด์ของโครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล
โครเมียม + เหล็ก + นิกเกิล

ง.

รูปที่ 4.53 แสดงแบบจำลองของชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายต่างๆ

ก. น้ำกลั่น หรือ สารละลาย NaCl เจือจาง (≤ 0.1 โมล/ลิตร)

ข. สารละลาย NaCl เข้มข้น (≥ 0.4 โมล/ลิตร)

ค. สารละลาย HCl หรือ HCl + NaCl เจือจาง ($[HCl]_{\text{เทียบเท่า}} \leq 0.1$ โมล/ลิตร)

ง. สารละลาย HCl หรือ HCl + NaCl เข้มข้น ($[HCl]_{\text{เทียบเท่า}} \geq 0.4$ โมล/ลิตร)