บทที่ 5
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากที่ได้ศึกษาสมบัติวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว 2 ชนิดคือ กาวเซรามิก และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุผสม โดยศึกษาสมบัติการยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิม และกับเพลเล็ต YSZ, ค่าความเค้นแรงเฉือน, การทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีกับส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง, ความพรุนปรากฏ และวัดอัตราการรั่วของแก๊ส มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 กาวเซรามิก

5.1.1 การทดสอบการยึดติดของกาวเซรามิกกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง และเพลเล็ตของอิเล็กโทรไลต์

การทดสอบการยึดติดของกาวเซรามิกได้เลือกกาวเซรามิกหลายชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ และเพลเล็ตของอิเล็กโทรไลต์ (YSZ) ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1. ผลการทดสอบการยึดติดของกาวเซรามิกกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ และเพลเล็ตของอิเล็กโทรไลต์ (YSZ)

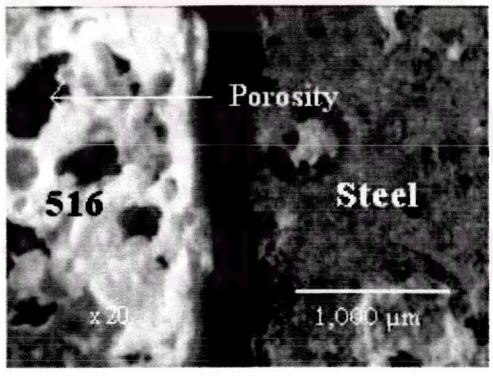
กาวเซรามิก	ผลการทดลอง	
	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ	เพลเล็ตของอิเล็กโทรไลต์ (YSZ)
516	X	-
569	√	√
571	√	-
575	√	√
586	√	√
685	X	-
835	X	-
3062	X	-

หมายเหตุ " – " หมายความว่าไม่ได้ทำการทดลองเนื่องจากกาวเซรามิกไม่ติดกับเหล็กกล้าไร้สนิม หรือกาวเซรามิกที่มีความพรุนมากเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

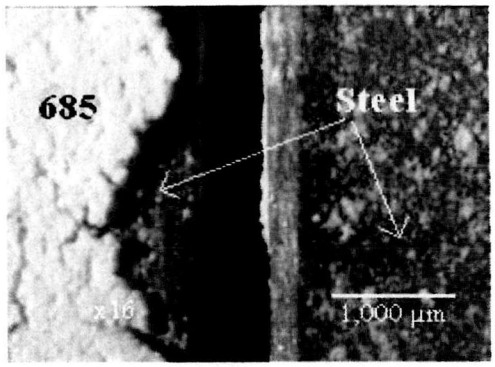
"√" หมายความว่าสามารถยึดติดได้ดี

"X" หมายความว่าไม่สามารถยึดติด

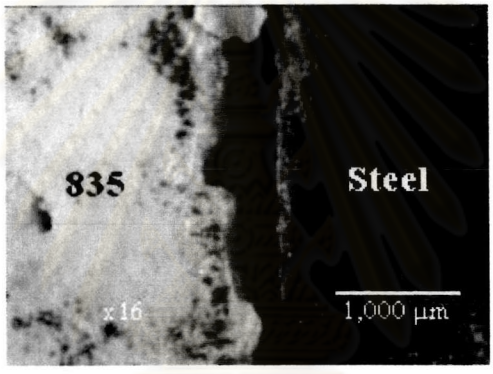
จากการทดสอบการยึดติดของกาวเซรามิกกับเหล็กกล้าไร้สนิม และเพลเล็ตของ YSZ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่ากาวเซรามิก 516, 685, 835 และ 3062 ไม่ยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.1, 5.2, 5.3, และ 5.4 ส่วนกาวเซรามิกที่สามารถยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมก็สามารถยึดติดกับเพลเล็ตของ YSZ ด้วย คือกาวเซรามิก 569, 571, 575 และ 586 ตามรูปที่ 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 และ 5.11 เมื่อแยกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และเพลเล็ตของ YSZ ที่ประกบอยู่กับกาวเซรามิกออกจากกัน จะสังเกตเห็นเนื้อกาวเซรามิกหมายเลข 571, 575, และ 586 ติดอยู่บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม และบนผิวเพลเล็ต YSZ โดยเนื้อกาวแยกออกจากกัน เนื่องจากกาวเซรามิกยึดติดกับผิวของโครเมียมออกไซด์บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และยึดติดผิวที่ขรุขระของ YSZ การที่มีเนื้อกาวไปติดที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมและผิวเพลเล็ต YSZ โดยเนื้อกาวแยกออกจากกัน เนื่องมาจากการยึดติดกันเองของเนื้อกาวไม่แข็งแรง ส่วนกาวเซรามิก 569 เนื้อกาวในบริเวณที่หลุดออกมาจะติดอยู่ทั้งสองด้านของเหล็กกล้าไร้สนิมและเพลเล็ต YSZ ที่ประกบกับกาว โดยในบริเวณที่เนื้อกาวหลุด เนื้อกาวไม่แยกออกจากกัน โดยจะไปติดอยู่บนด้านใดด้านหนึ่งของเหล็กกล้าไร้สนิมและเพลเล็ต YSZ กาวเซรามิก 569 ที่ติดอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณส่วนที่กาวหลุดออกมาจะเห็นออกไซด์สีดำของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยไม่มีกาวเซรามิกติดอยู่ ส่วนบริเวณผิวของกาวที่หลุดออกมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมจะเห็นออกไซด์สีดำและสีเขียวติดที่ผิวหน้ากาว แสดงว่าการยึดติดกันเองของเนื้อกาวมีความแข็งแรง จึงดึงเอาออกไซด์ที่ผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิมออกมา ส่วนกาวเซรามิกที่ติดอยู่ที่ผิวเพลเล็ตของ YSZ มีลักษณะคล้ายกับกาวเซรามิกที่ติดอยู่บนเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ผิวหน้าของกาวมีสีขาวของเนื้อกาวเอง



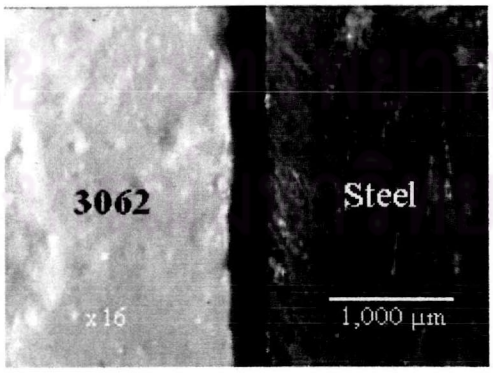
รูปที่ 5.1 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 516 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



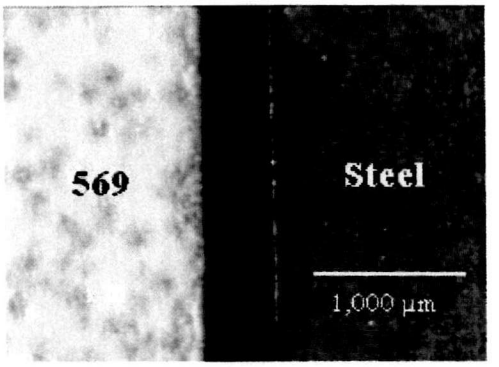
รูปที่ 5.2 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 685 กับกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



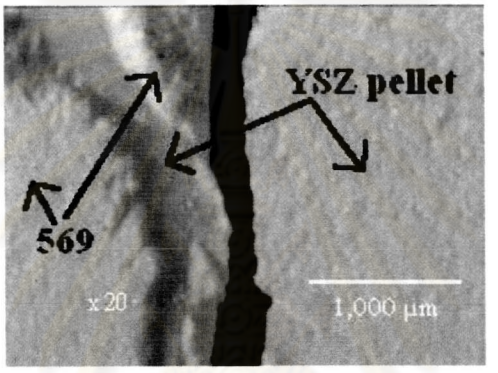
รูปที่ 5.3 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 835 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



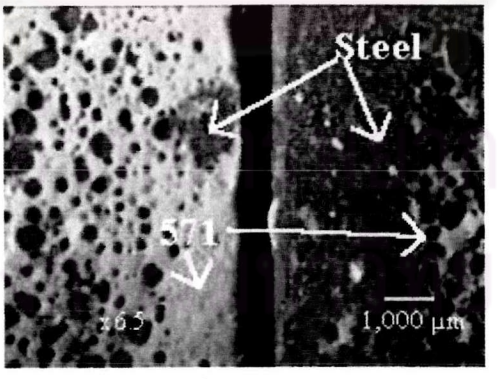
รูปที่ 5.4 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 3062 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



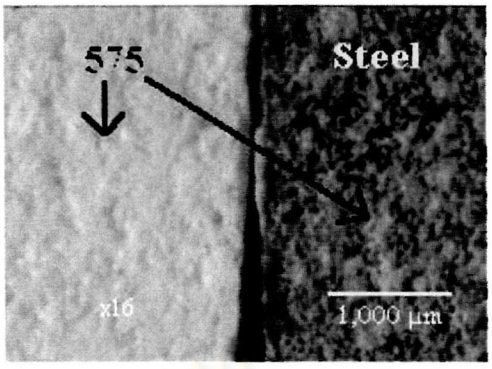
รูปที่ 5.5 การยึดติดของกาวเซรามิก 569 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



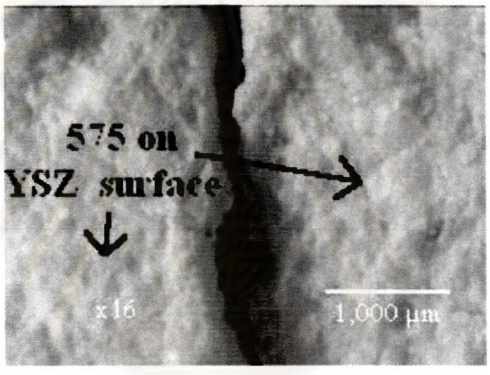
รูปที่ 5.6 ร่องรอยการยึดติดของกาวเซรามิก 569 กับเพลเล็ตของ YSZ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



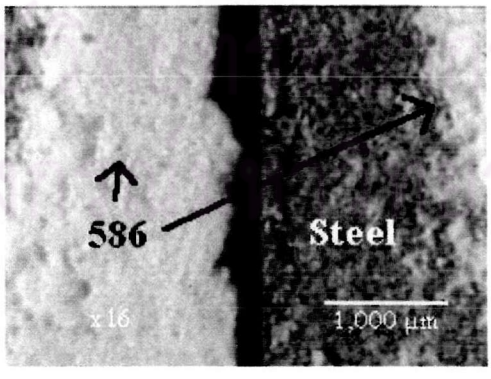
รูปที่ 5.7 ร่องรอยการยึดติดของกาวเซรามิก 571 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



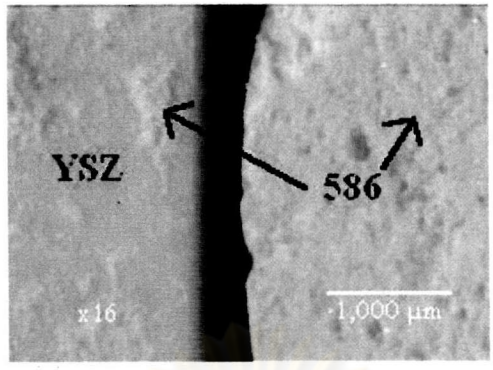
รูปที่ 5.8 ร่องรอยการยึดติดของกาวเซรามิก 575 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.9 ร่องรอยการยึดติดของกาวเซรามิก 575 กับเพลเล็ตของ YSZ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.10 ร่องรอยการยึดติดของกาวเซรามิก 586 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.11 ร่องรอยการยึดติดของกาวเซรามิก 586 กับเพลเล็ตของ YSZ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5.1.2. ค่าความเค้นแรงเฉือน

ทำการทดสอบค่าความเค้นแรงเฉือนของกาวเซรามิก 569, 575, และ586 ซึ่งสามารถยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิม และกับเพลเล็ตของ YSZ ค่าความเค้นแรงเฉือนบอกความแข็งแรงในการยึดติดของกาวเซรามิก มีค่าดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าความเค้นแรงเฉือนของกาวเซรามิก

กาวเซรามิก	ค่าความเค้นแรงเฉือน (kgf / cm^2)
569	19.41
575	9.34
586	13.21

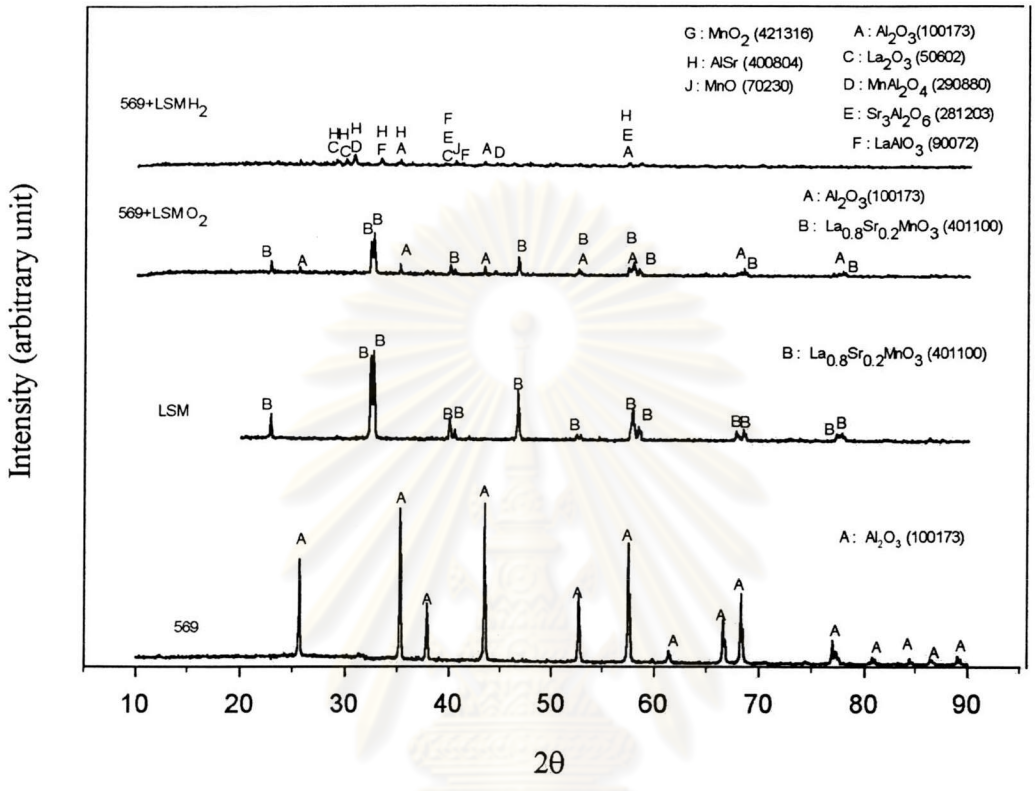
5.1.3. การทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมี

ได้ทำการทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีของกาวเซรามิก 569, 575, และ 586 กับแคโทด, แอโนด, อิเล็กโทรไลต์ และอินเตอร์คอนเนค โดยทำการทดสอบทั้งในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง

5.1.3.1. กาวเซรามิก 569

(1) กาวเซรามิกกับแคโทด (LSM) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟส Al_2O_3 และ LSM ซึ่งเป็น

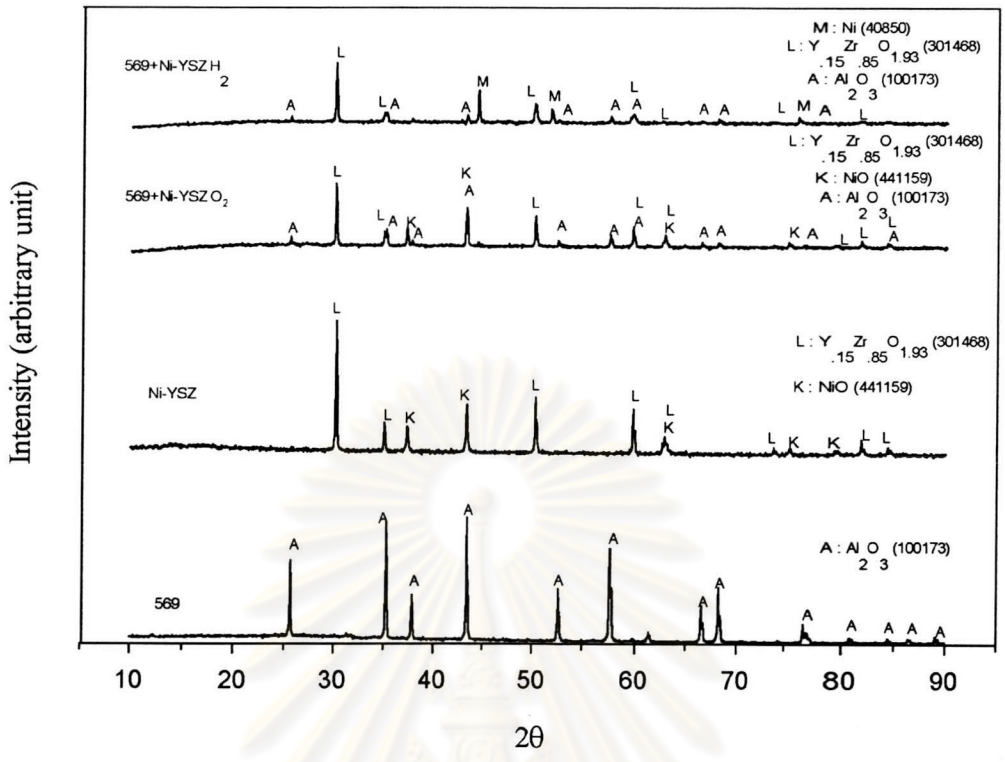
เฟสเดิมของสารตั้งต้น แสดงว่ากาวเซรามิกไม่ทำปฏิกิริยากับ LSM ส่วนในภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้น Al_2O_3 และเฟสที่เกิดจากการแยกตัวของ LSM มาทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 เกิดเฟสใหม่ คือ $MnAl_2O_4$, $Sr_3Al_2O_6$, $LaAlO_3$ และ AlSr ตามรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12. ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 569 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

(2) กาวเซรามิกกับแอโนด (Ni / YSZ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสสารตั้งต้นคือ Al_2O_3, NiO, $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ แสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้น ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ Al_2O_3, $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และเฟสใหม่คือ Ni ซึ่งมีเฟสเดิมคือ NiO ตามรูปที่ 5.13 โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

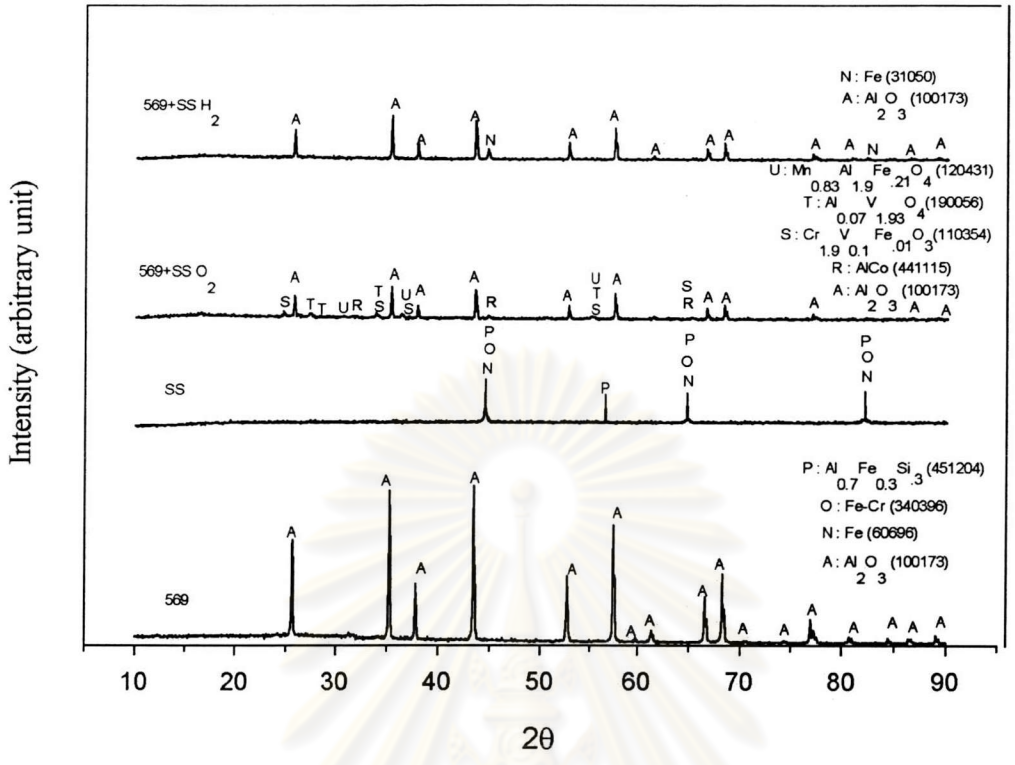
$$NiO + H_2 = 5Ni + H_2O\ (g) \quad \text{.....5.1}$$



รูปที่ 5.13. ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 569 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

(3) กาวเซรามิกกับอิเล็กโทรไลต์ YSZ ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิงเกิดเฟสของ Al_2O_3, $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ ซึ่งเป็นเฟสเดิมของสารตั้งต้นแสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้น ตามรูปที่ 5.13

(4) กาวเซรามิกกับอินเตอร์คอนเนค (เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้น Al_2O_3 กับเฟสที่เกิดจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิมคือ AlCo, $(Cr_{1.9}V_{0.09}Fe_{0.01})O_3$, $Al_{0.7}V_{1.93}O_4$, $Mn_{0.83}Al_{1.9}Fe_{0.21}O_4$ ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสสารของตั้งต้นคือ Al_2O_3 และ Fe แสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้น การที่พบเฟสของเหล็กกล้าไร้สนิมน้อยอาจเนื่องมาจากเกิดการสลายตัวไปตามขอบเกรนทำให้มีปริมาณน้อยจนไม่สามารถตรวจพบ ตามรูปที่ 5.14



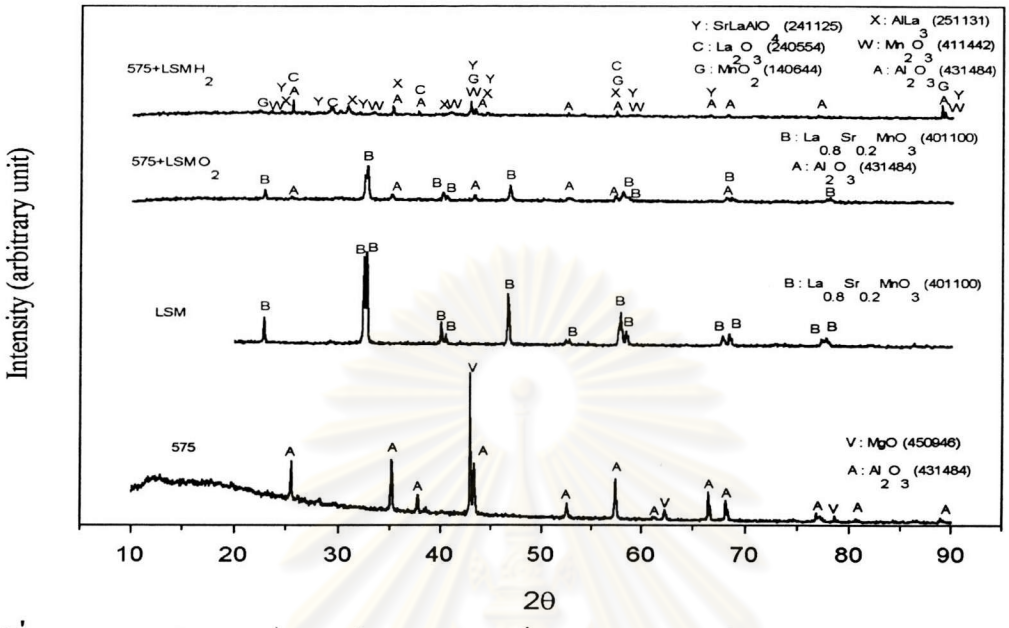
รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 569 ผสมกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

5.1.3.2. กาวเซรามิก 575

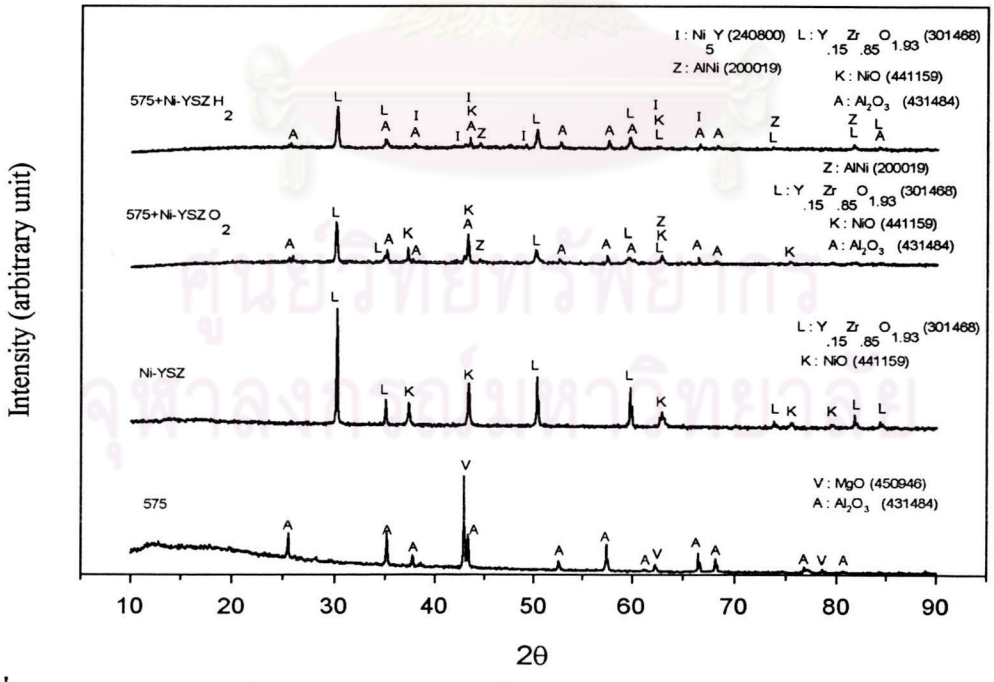
(1) กาวเซรามิกกับแคโทด (LSM) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของ Al_2O_3 และ $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ ซึ่งเป็นเฟสเดิมของสารตั้งต้น แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองไม่ทำปฏิกิริยากัน ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสเดิมของสารตั้งต้นคือ Al_2O_3 และเฟสที่เกิดจากการแยกตัวของ LSM มาทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 เกิดเฟสใหม่คือ $AlLa_3$, $SrLaAlO_4$ แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองทำปฏิกิริยากันตามรูปที่ 5.15

(2) กาวเซรามิกกับแอโนด (Ni / YSZ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสสารตั้งต้นคือ Al_2O_3 , NiO และ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และเฟสใหม่ที่เกิดจากธาตุ Al ทำปฏิกิริยากับ Ni เกิดเฟสใหม่คือ AlNi แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองทำปฏิกิริยากัน ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสเดิมของสารตั้งต้นคือ

Al_2O_3, NiO และ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และเฟสใหม่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของธาตุ Al, Ni และ Y คือ AlNi, Ni_5Y แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองทำปฏิกิริยากันตามรูปที่ 5.16



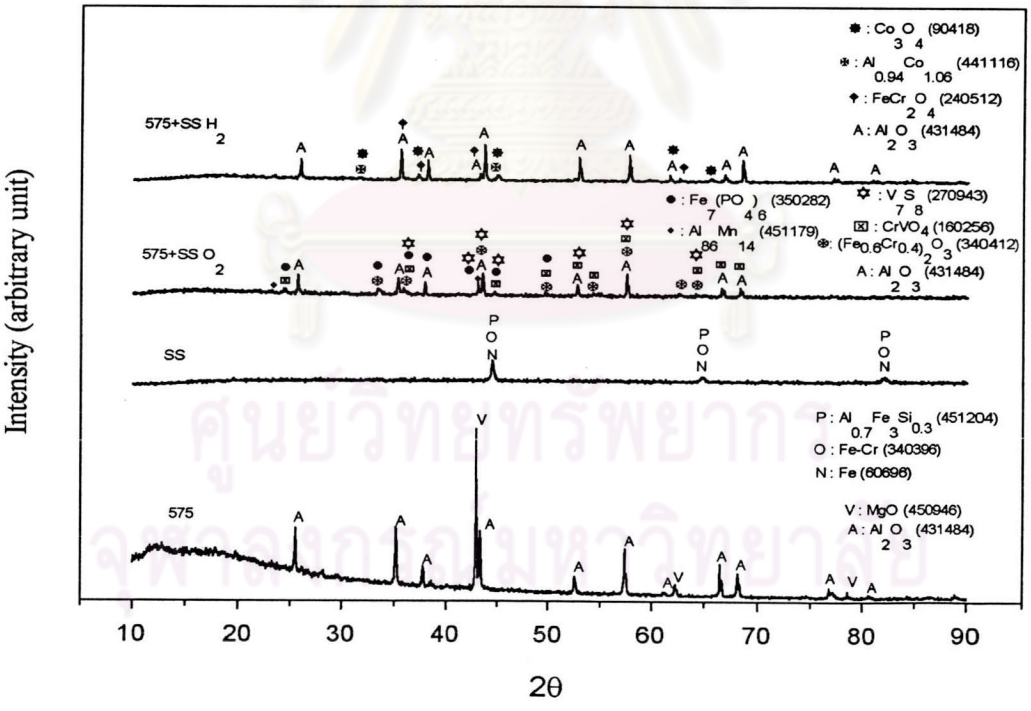
รูปที่ 5.15. ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 575 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน



รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 575 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

(3) กาวเซรามิกกับอิเล็กโทรไลต์ (YSZ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิงเกิดเฟสของ Al_2O_3, $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ ซึ่งเป็นเฟสเดิมของสารตั้งต้นแสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้น ตามรูปที่ 5.16

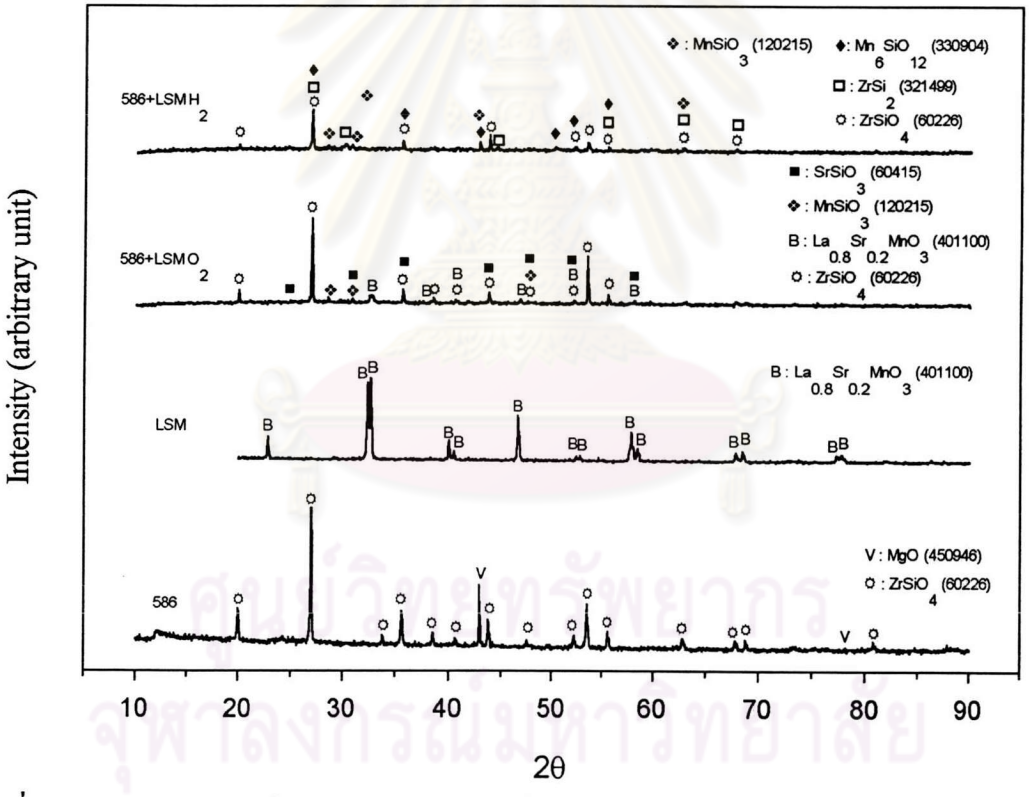
(4) กาวเซรามิกกับอินเตอร์คอนเนค (เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้น Al_2O_3 กับเฟสที่เกิดจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิมคือ $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$, $Al_{86}Mn_{14}$, $CrVO_4$, $Fe_7(PO_4)_6$ และ V_7S_8 แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองไม่ทำปฏิกิริยากัน ส่วนภาวะรีดิวซิงซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้น Al_2O_3 กับเฟสที่เกิดจากธาตุในเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นองค์ประกอบคือ $FeCr_2O_4$, $Al_{0.94}Co_{1.06}$, Co_3O_4 แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองไม่ทำปฏิกิริยากัน ตามรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 575 ผสมกับผงของของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

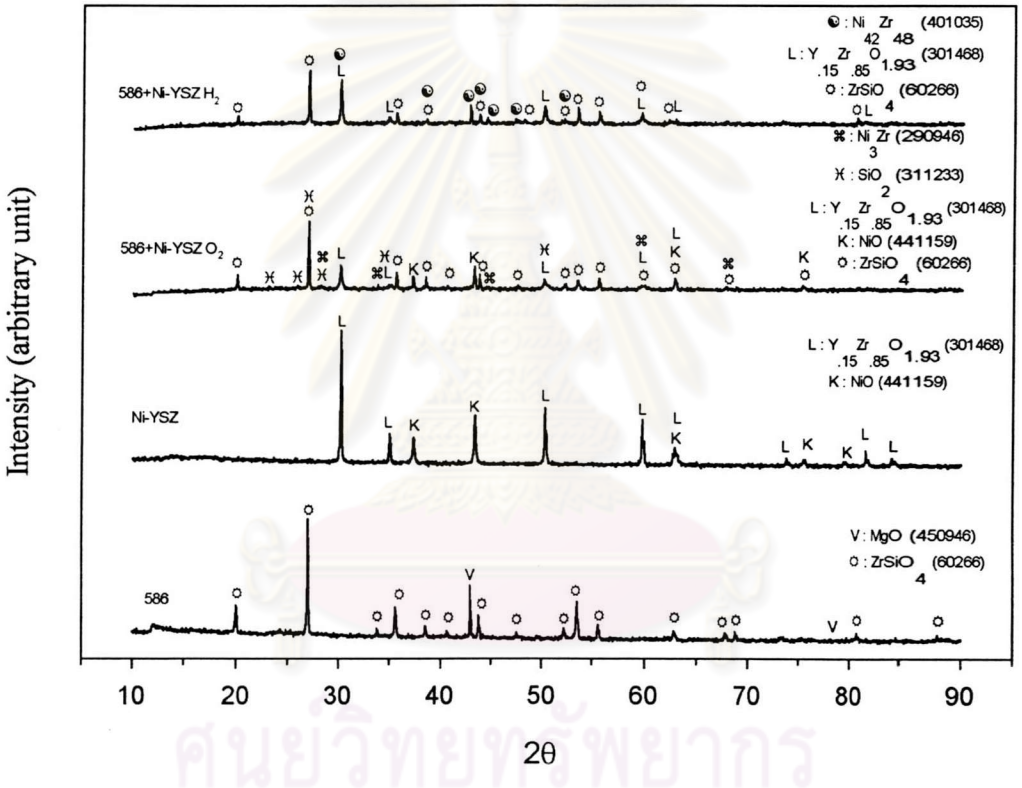
5.1.3.3. กาวเซรามิก 586

(1) กาวเซรามิกกับแคโทด (LSM) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$ และ $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ นอกจากนั้นยังพบเฟสใหม่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของธาตุ Mn และ Sr ของ LSM ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 คือเฟส $MnSiO_3$ และ $SrSiO_3$ แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองชนิดทำปฏิกิริยากัน ส่วนภาวะรีดิวซิงพบเฟสเดิมของสารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$ เฟสที่เกิดจากการสลายตัวของ $ZrSiO_4$ คือ $ZrSi_2$ และ SiO_2 ส่วนเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นคือ Mn_6SiO_{12} และ $MnSiO_3$ จากผลการทดลองแสดงว่า LSM เกิดการสลายตัวเข้าทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ของ $ZrSiO_4$ ตามรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18. ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 586 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ในแก๊สอาร์กอน

(2) กาวเซรามิกกับแอโนด (Ni / YSZ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสสารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$, NiO และ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ เฟสที่เกิดจากการแยกตัวของ ของ $ZrSiO_4$ คือ SiO_2 และเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นคือ Ni_3Zr แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองทำปฏิกิริยากัน ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสเดิมของสารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$ และ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ แต่ไม่พบ NiO อาจเป็นเพราะเหลือปริมาณ น้อยจนไม่สามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากทำปฏิกิริยากับ Zr เกิดเฟสใหม่คือ Ni_3Zr แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองทำปฏิกิริยากันตามรูปที่ 5.19

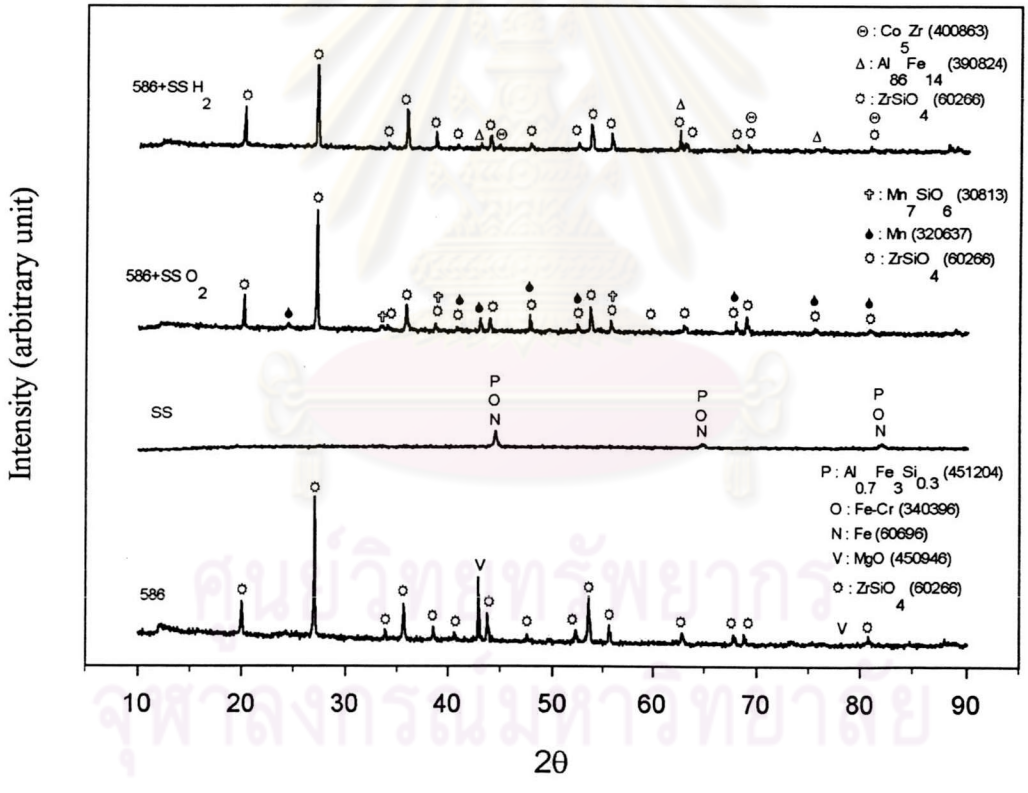


รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 586 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

(3) กาวเซรามิกกับอิเล็กโทรไลต์ (YSZ) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับ YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิงเกิดเฟสของ

สารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$ และ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และเฟสที่เกิดจากการสลายตัวของ $ZrSiO_4$ คือ ZrO_2 และ SiO_2 แสดงว่าสารตั้งต้นทั้งสองไม่ทำปฏิกิริยากันตามรูปที่ 5.19

(4) กาวเซรามิกกับอินเตอร์คอนเนค (เหล็กกล้าไร้สนิม) ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีโดยเผาเพลเล็ตที่ได้จากการผสมกาวเซรามิกกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่าภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$ ส่วนเฟสของธาตุที่มีปริมาณมากในเหล็กกล้าไร้สนิมคือ Fe และ Cr ไม่สามารถตรวจพบอาจเนื่องมาจากสลายตัวไปตามขอบเกรน เฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นสองชนิดคือ Mn_7SiO_6 แสดงว่าธาตุ Mn ในเหล็กกล้าไร้สนิมทำปฏิกิริยากับ SiO_2 จากเฟส $ZrSiO_4$ ของกาวเซรามิก ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $ZrSiO_4$ จากกาวเซรามิก และ $Al_{86}Fe_{14}$ จากเหล็กกล้าไร้สนิม เฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Zr จากเฟสของ $ZrSiO_4$ ของกาวเซรามิก กับ Co ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดเฟสของ Co_5Zr ตามรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20. ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงกาวเซรามิก 586 ผสมกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

เฟสที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างกาวเซรามิก กับ LSM, LSM, Ni /YSZ, YSZ และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเผาที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิไดซิง และรีดิวซิง รวมสรุปไว้ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เฟสที่เกิดจากการผสมกาวเซรามิก กับ ผงของ LSM, Ni / YSZ, YSZ และเหล็กกล้าไร้สนิม เผาที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิไดซิง และรีดิวซิง

CERAMIC ADHESIVE	LSM	Ni-YSZ	YSZ		SS	
	Air	H_2 7% in Ar	Air	H_2 7% in Ar	Air	H_2 7% in Ar
569	LSM, Al_2O_3	YSZ, Ni, Al_2O_3	YSZ, Al_2O_3	YSZ, Al_2O_3	Al_2O_3, A ICo $(C r_{1.9}V_{0.09}Fe_{0.01})O_3$ $Al_{0.07}V_{1.93}O_4$ $Mn_{0.83}Al_{1.9}Fe_{0.21}O_4$	Fe, Al_2O_3
575	LSM, Al_2O_3	YSZ, Ni, Al_2O_3 AlNi, Ni_5Y	YSZ, Al_2O_3	YSZ, Al_2O_3	Al_2O_3, $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$ $CrVO_4$, V_7S_8, $Al_{86}M n_{14}$ $Fe_7(PO_4)_6$	Al_2O_3, C o_3O_4 $FeCr_2O_4$ A $l_{0.94}C o_{1.06}$
586	$ZrSiO_4$, LSM $MnSiO_3$, $SrSiO_3$	$ZrSiO_4$, YSZ Ni_3Zr	$ZrSiO_4$, YSZ	$ZrSiO_4$, YSZ	$ZrSiO_4$, Mn_7SiO_6	$ZrSiO_4$, Co_5Zr

5.1.4. ความพรุนปรากฏ

ความพรุนปรากฏของกาวเซรามิกเป็นความบกพร่องในกาวเซรามิกที่ทำให้เกิดการรั่วของแก๊ส เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเปิด (open pore) เป็นทางยาว วัสดุป้องกันแก๊สรั่วที่ดีควรมีรูพรุนเปิดน้อยเพื่อประสิทธิภาพการกันรั่วที่ดี ค่าความพรุนปรากฏของกาวเซรามิกดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงความพรุนปรากฏของกาวเซรามิก

ชนิดของกาวเซรามิก	ความพรุนปรากฏ (%)
569	41.3
575	33.64
586	30.51

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าความพรุนปรากฏของกาวเซรามิก 575 และ 586 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกาวเซรามิก 569 มีค่าสูงที่สุด เนื่องมาจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นส่วนผสมของกาว ส่วนกาวเซรามิก 575 และ 586 มีลักษณะเป็นผงเวลาใช้ต้องผสมน้ำกลั่น น้ำกลั่นระเหยออกเมื่อบ่มกาวที่อุณหภูมิ 94°C เกิดการเคลื่อนที่ของผงกาวเซรามิกเข้าหากันจึงมีการอัดตัวกันดีทำให้มีความพรุนปรากฏน้อยกว่ากาวเซรามิก 569

5.1.5. การรั่วของแก๊สที่อุณหภูมิ 800°C

การทดสอบการรั่วของแก๊สจะต้องมีชุดทดสอบการรั่วและหน้าแปลนสำหรับทดสอบการรั่วซึ่งได้ออกแบบและพัฒนาตามอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ดังนี้

5.1.5.1. ทดสอบการรั่วของระบบชุดทดสอบการรั่ว

เนื่องจากระบบประกอบด้วยสายยางพีวีซี และข้อต่อ จึงเกิดการรั่วของระบบผ่านจุดเหล่านี้ ได้มีการพัฒนาระบบชุดทดสอบการรั่ว 2 แบบ แบบแรกใช้สายยางน้ำพีวีซี, สายเทปลอน และท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เป็นท่อนำแก๊สเพื่อความสะดวกในการจัดระบบขณะทำการทดสอบการรั่ว ส่วนแบบที่สองท่อนำแก๊สใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ทั้งหมด และบริเวณข้อต่อระหว่างแมนอมิเตอร์ที่ทำจากแก้วกับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมใช้สายแก๊สพีวีซีเป็นข้อต่อเพราะมีความหนามากกว่าสายยางน้ำพีวีซีและใช้งานกับแก๊สโดยเฉพาะดังอธิบายในบทที่4 หน้า 42

(1) แบบที่ 1 ใช้สายเทปลอน, สายยางน้ำพีวีซี และท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เป็นท่อนำแก๊สและใช้สายยางน้ำพีวีซีเป็นข้อต่อระหว่างแก้วแมนอมิเตอร์กับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ตามรูปที่ 4.10 หน้า 53

ในการทดสอบใช้แก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig เข้าไปในชุดทดสอบการรั่ว พบว่าอัตราการรั่วของแก๊สค่อนข้างเร็วจากการสังเกตุด้วยตาเปล่า เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ระดับน้ำในแมนอมิเตอร์เลื่อนขึ้นแทนปริมาตรแก๊สที่รั่วออกไป 9.90 มิลลิเมตร เมื่อคิดเป็นอัตราการรั่วมีค่าประมาณ 0.7775 cm^3/min ซึ่งอัตราการรั่วค่อนข้างสูง เนื่องจากแก๊สรั่วผ่านทางข้อต่อระหว่างแก้วแมนอมิเตอร์กับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และการรั่วโดยผ่านทางรูพรุนของสายเทปลอนและสายยางน้ำพีวีซี สังเกตุจากขณะที่มีการอั้นแก๊สฮีเลียมไว้ในสายยางพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปมีฟองน้ำเล็กๆ มาเกาะที่สายยางเป็นจำนวนมาก

(2) แบบที่ 2 ใช้ท่อเหล็กกกล้าไร้สนิมเป็นท่อนำแก๊สและใช้ยางแก๊สพีวีซีเป็นข้อต่อระหว่างแก้วแมนอมิเตอร์กับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ตามรูปที่ 4.11 หน้า 54 พบว่าอัตราการรั่วน้อยมาก ระดับน้ำที่เลื่อนขึ้นแทนที่ปริมาตรแก๊สที่รั่วเพียง 1.4 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง อัตราการรั่วมีค่าประมาณ $3.76X10^{-5}\ cm^3/\ min\ .\ cm$

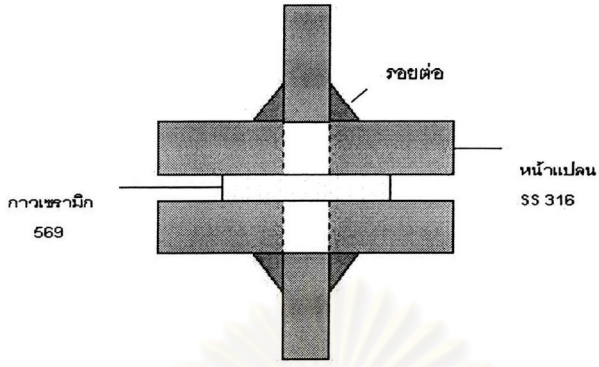
5.1.5.2. หน้าแปลนทดสอบการรั่ว

การทดสอบการรั่วของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วต้องมีหน้าแปลนเป็นตัวจับยึดวัสดุป้องกันแก๊สรั่วให้อยู่กับที่ และหน้าแปลนจะต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับอินเตอร์คอนเนคในเซลล์เชื้อเพลิงคือเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก หน้าแปลนต้องมีความหนาอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการโค้งงอเมื่อเชื่อมเข้ากับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากขณะทำการทดลองไม่สามารถหาเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่มีความหนาขนาดนี้ได้ เพราะเป็นเกรดที่ใช้งานน้อยในประเทศ และไม่สามารถสั่งซื้อจากต่างประเทศได้เนื่องจากซื้อปริมาณน้อย ขณะทำการทดลองมีเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด 430 ที่มีความหนาเพียง 2 มิลลิเมตร จึงต้องหันมาใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค (austenitic) เกรด 316 ซึ่งหาได้ง่ายตามท้องตลาดมาทำหน้าแปลน โดยมีการออกแบบตามลำดับดังที่ได้อธิบายรายละเอียดการสร้างในบทที่ 4 หน้า 37

(1) แบบที่ 1 ต่อท่อนำแก๊สเข้ากับหน้าแปลนโดยการขันเกลียวตามรูปที่ 4.1 หน้า 47 การที่ออกแบบเป็นเกลียวเพราะจะต้องนำหน้าแปลนไปขัดผิวหน้ากับเครื่องขัดก่อนที่จะนำไปติดกับกาวเซรามิก จึงเป็นการสะดวกในการถอดท่อนำแก๊สเหล็กกล้าไร้สนิมออกจากหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม จากการทดสอบพบว่าเมื่ออัดแก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig เข้าไปในหน้าแปลนปรากฏว่าเกิดการรั่วที่เกลียวสังเกตุจากการใช้สนูป (snoop) ฉีด มีฟองแก๊สเกิดขึ้น หน้าแปลนแบบที่ 1 จึงไม่สามารถนำมาทดสอบการรั่วได้

(2) แบบที่ 2 ต่อท่อนำแก๊สเข้ากับหน้าแปลนโดยใช้ข้อต่อ (fitting) ซึ่งมีเกลียวเป็นรูปกรวย (cone) ตามรูปที่ 4.2 หน้า 47 เพื่อความสะดวกในการถอดท่อนำแก๊สเหล็กกล้าไร้สนิมออกจากหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อนำหน้าแปลนไปขัดเช่นกัน ข้อดีของข้อต่อคือมีเกลียวเป็นรูปกรวยเมื่อขันเกลียวให้แน่นจะเกิดการอัดแน่นของเกลียวข้อต่อกับเกลียวของหน้าแปลน จากการทดสอบพบว่าเมื่ออัดแก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig เข้าไปในหน้าแปลนก็เกิดการรั่วของแก๊สออกตามเกลียวเหมือนกัน จึงไม่สามารถนำมาทดสอบการรั่วได้

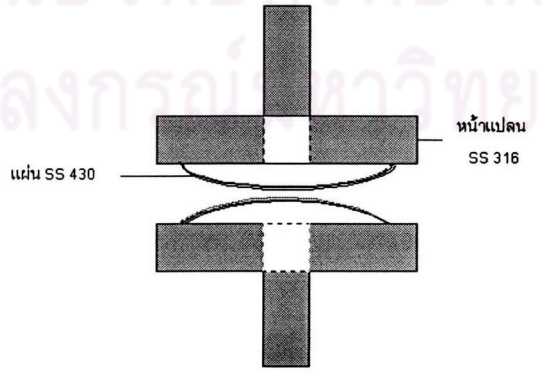
(3) แบบที่ 3 เชื่อมท่อนำแก๊สเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 กับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม TGS 308L ตามรูปที่ 4.3 หน้า 48 เมื่ออัดแก๊สฮีเลียมเข้าไปในหน้าแปลน และเอาสนูปฉีดที่รอยเชื่อมพบว่าไม่เกิดการรั่ว จึงนำไปทดสอบการรั่วกับกาวเซรามิก 569 ตามรูปที่ 5.21 โดยทดสอบการรั่วที่อุณหภูมิ 800°C ทดสอบการรั่วโดยใช้แก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig พบว่าอัตราการรั่วสูงมาก เมื่อลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้องพบว่ากาวเซรามิกไม่ติดกับหน้าแปลน เนื่องมาจากกาวเซรามิก 569 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันมากคือ $7.7 \times 10^{-6}/°C$ และ $16.0 \times 10^{-6}/°C$



รูปที่ 5.21 การทดสอบการรั่วของกาวเซรามิก 569 กับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

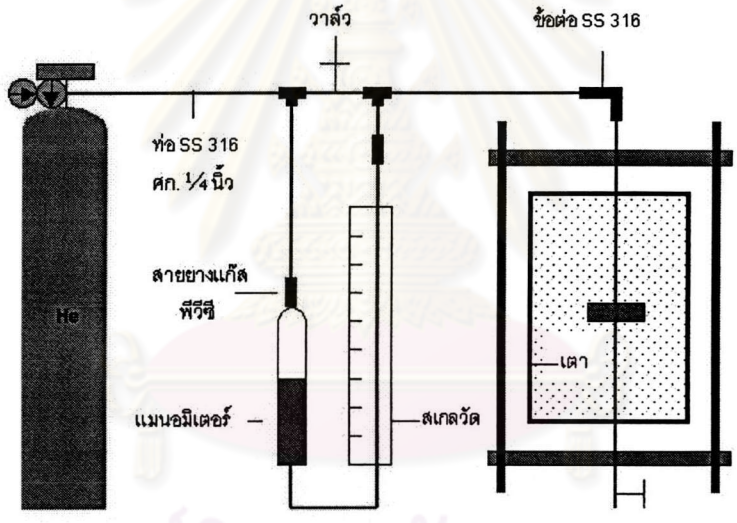
(4) แบบที่ 4 นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด 430 ที่มีอยู่มีความหนา 2 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม TGS 308L ตามรูปที่ 4.4 หน้า 49 นำไปทดสอบการรั่วกับกาวเซรามิก 569 ที่อุณหภูมิ 800°C โดยใช้แก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig พบว่ามีแก๊สรั่วมาก เมื่อลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้อง พบว่ากาวเซรามิกไม่ติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 โก่งออกจากหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ตามรูปที่ 5.22 เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 คือ 16.0×10^{-6}/ °C และ 12.0×10^{-6}/ °C ตามลำดับ ระหว่างที่มีการเย็นตัวลงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 หดตัวมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในขณะที่รอยเชื่อมถูกยึดอยู่กับที่จึงดันให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 โก่งออกจากหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.22 การโก่งตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ออกจากหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

(5) แบบที่ 5 ในช่วงท้ายของการทดลอง สามารถหาเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติกที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร จากบริษัทฮิตาชิ ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง โดยเชื่อมหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษเข้ากับท่อนำแก๊สเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม TGS 308L ตามรูปที่ 4.5 หน้า 49 ได้ทำการทดสอบการรั่วโดยอัดแก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig เข้าไปในหน้าแปลน เอาสนูปฉีดที่บริเวณรอยเชื่อมไม่พบการรั่ว หลังจากได้ชุดทดสอบการรั่วของแก๊สและหน้าแแปลนทดสอบการรั่วที่สมบูรณ์แล้วจึงทำการทดสอบการรั่วของระบบ โดยเชื่อมท่อนำแก๊สเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เข้าทั้งสองด้านของหน้าแปลนที่เจาะรูตรงกลาง เพื่อจำลองรอยเชื่อม 2 จุด ของหน้าแปลน 2 ชิ้นที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ในชุดทดสอบการรั่วของแก๊ส ตามรูปที่ 4.6 หน้า 50 แล้วจึงนำไปประกอบเข้ากับชุดทดสอบการรั่ว เพื่อทำการวัดการรั่วทั้งหมดของระบบทดสอบการรั่วของแก๊สตามรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 การทดสอบการรั่วของระบบ

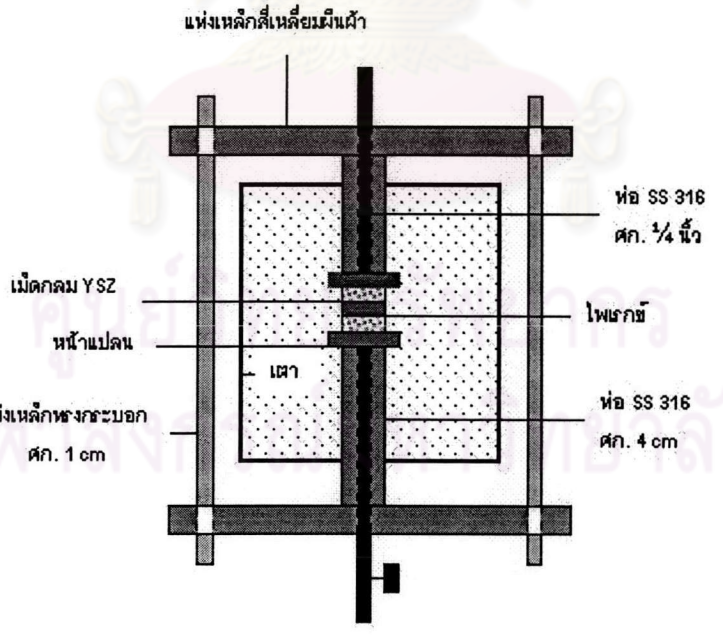
ทำการทดสอบการรั่วของระบบทดสอบการรั่วของแก๊สที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 800°C โดยใช้แก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig เข้าไปในระบบ วัดอัตราการรั่วที่อุณหภูมิห้องมีค่า 2.7333×10^{-5} $cm^3 / min . cm$ และอัตราการรั่วที่อุณหภูมิ 800°C มีค่า 7.3812×10^{-5} $cm^3 / min . cm$

5.1.5.3 ทดสอบการรั่วของแก๊สของระบบทดสอบการรั่วแบบใช้แรงอัด

การทดสอบการรั่วแบบใช้แรงอัดโดยทั่วไปใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดประลัยในการให้แรงอัด แต่ในการทดลองได้ประยุกต์สร้างระบบป้องกันแก๊สรั่วแบบใช้แรงอัดที่อุณหภูมิ

800 °C โดยใช้น้ำหนักจากภายนอกเตาอุณหภูมิสูงกดทับลงบนหน้าแปลนทดสอบการรั่ว การส่งถ่ายน้ำหนักกดทับลงบนหน้าแปลนโดยส่งถ่ายทางท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ทำการการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้นเองเปรียบเทียบกับระบบที่ให้แรงอัดโดยใช้เครื่องกำลังอัดประลัยโดยทดสอบการรั่วของระบบแบบไฮบริด ใช้แก้วเซรามิกโพลโกไพต์เป็นวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และใช้แก้วไพเรกซ์เป็นอินเตอร์เลเยอร์ โดยใช้แรงอัดกดลงบนหน้าแปลน 25 psi ตามรูปที่ 5.24

อัตราการรั่วที่อุณหภูมิ 800°C ใช้แรงอัด 25 psi บนหน้าแปลน มีค่าเท่ากับ 3.16×10^{-5} cm^3 / min . cm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการรั่วแบบใช้แรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดประลัยเป็นตัวให้แรงอัดอัตราการรั่วมีค่า 3.59×10^{-5} cm^3 / min . cm อัตราการรั่วแบบใช้แรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดประลัยเป็นตัวให้แรงอัดมีค่ามากกว่าการใช้น้ำหนักกดทับจากเตาอุณหภูมิสูงเล็กน้อยเนื่องจากใช้แก้วเซรามิกมัสโคไวต์ผลึกเดี่ยวเป็นวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว น้ำที่อยู่ในแก้วเซรามิกมัสโคไวต์ระเหยออกไปที่อุณหภูมิ 600°C ทำให้เกิดการรั่วของแก๊สโดยผ่านทางชั้นผลึกที่มีการระเหยของน้ำที่อยู่ระหว่างชั้นผลึกในแก้วเซรามิก ส่วนการทดสอบแบบใช้น้ำหนักกดทับจากภายนอกเตาอุณหภูมิสูงใช้แก้วเซรามิกโพลโกไพต์ซึ่งน้ำในแก้วเซรามิกโพลโกไพต์จะระเหยที่อุณหภูมิ 900°C แต่ทำการทดสอบการรั่วที่อุณหภูมิ 800°C จึงไม่เกิดการรั่วที่แก้วเซรามิกโพลโกไพต์



รูปที่ 5.24 แสดงชุดทดสอบการรั่วแบบใช้แรงอัดของระบบป้องกันการรั่วแบบไฮบริด

5.1.5.4 การวัดอัตราการรั่วของกาวเซรามิก

วัดอัตราการรั่วของกาวเซรามิก 569, 575 และ 586 ที่อุณหภูมิ 800 °C โดยใช้แรงอัด 25 psi บนหน้าแปลน และใช้แก๊สฮีเลียมความดัน 2 psig อัตราการรั่วของแก๊สมีค่าดังตาราง 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงอัตราการรั่วของกาวเซรามิก

กาวเซรามิก	อัตราการรั่ว (cm^3 / min . cm)
569	0.5089
575	0.3582
586	0.3482

พบว่าอัตราการรั่วของกาวเซรามิก 569 มีค่ามากที่สุด ส่วนอัตราการรั่วของกาวเซรามิก 575 และ 586 มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากความพรุนปรากฏพบว่ามีความสอดคล้องกันคือ กาวเซรามิก 569 มีความพรุนปรากฏมากที่สุด ส่วนกาวเซรามิก 575 และ 586 มีความพรุนปรากฏใกล้เคียงกัน

5.2 ผลการทดลองวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ

5.2.1 วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ (composite seal)

5.2.1.1 การออกแบบการทดลอง

ออกแบบการทดลองโดยกำหนดปริมาณเริ่มต้นของแก้วไพเรกซ์เริ่มอยู่ระหว่าง 60 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ้าใช้แก้วไพเรกซ์ปริมาณมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แก้วไพเรกซ์จะทำปฏิกิริยากับส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงมาก และถ้าใช้แก้วไพเรกซ์ปริมาณน้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แก้วไพเรกซ์จะไม่เปียก (wetting) กับผิววัสดุ และมีความหนืดสูงไม่สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ [32] ส่วนผสมของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ส่วนผสมของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบและอัตราการรั่วของแก๊ส

สูตรที่	Pyrex (wt%)	YSZ (wt%)	$NaAlO_2$ (wt%)	การยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิม	การยึดติดกับเพลเล็ตของ YSZ	อัตราการรั่วของแก๊สเมื่อทดสอบกับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม (sccm / cm)	อัตราการรั่วของแก๊สเมื่อทดสอบกับเพลเล็ตของ YSZ (sccm / cm)
1	80	20	0	√√	√√	2.4054×10^{-4}	2.0833×10^{-4}
2	70	30	0	√√	√√	3.3071×10^{-3}	-

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

สูตรที่	Pyrex (wt%)	YSZ (wt%)	$NaAlO_2$ (wt%)	การยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิม	การยึดติดกับเพลเล็ตของ YSZ	อัตราการรั่วของแก๊สเมื่อทดสอบกับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม (sccm / cm)	อัตราการรั่วของแก๊สเมื่อทดสอบกับเพลเล็ตของ YSZ (sccm / cm)
3	60	40	0	√√	√√	0.4411	-
4	75	25	0	√√	√√	5.2147×10^{-4}	-
5	65	25	10	√√	√	2.9799×10^{-4}	7.3133×10^{-3}

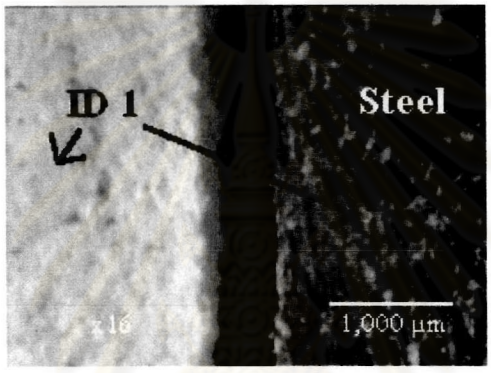
หมายเหตุ "√√" หมายความว่ายึดติดดี

"√" หมายความว่ายึดติดเพียงบางส่วน

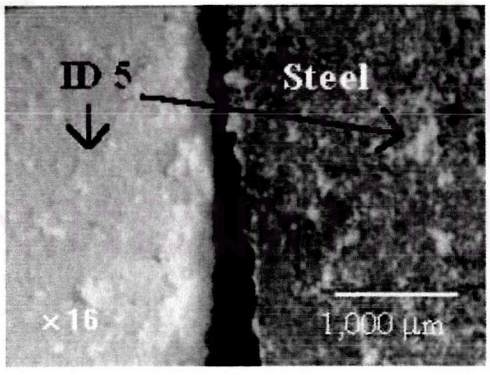
"–" หมายความว่าไม่ได้ทำการทดลอง

เมื่อทดสอบการยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมและกับเพลเล็ตของ YSZ และวัดอัตราการั่วของแก๊สผลดังตารางที่ 5.6 พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วทุกสูตรสามารถยึดติดดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยแสดงร่องรอยการยึดติดของสูตรที่สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีคือ สูตรที่ 1 และ 5 ตามรูปที่ 5.25 และ 5.26 ส่วนการยึดติดกับเพลเล็ตของ YSZ พบว่าสูตรที่ 1 ถึง 4 สามารถยึดติดได้ดีกับผิวเพลเล็ตของ YSZ โดยแสดงร่องรอยการยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเพลเล็ตของ YSZ ตามรูปที่ 5.27 แต่สูตรที่ 5 เป็นสูตรที่เติมสารเติมแต่งคือโซเดียมอะลูมิเนต ติดเพียงบางส่วนกับเพลเล็ตของ YSZ ตามรูปที่ 5.28 โดยเนื้อวัสดุป้องกันแก๊สรั่วทุกสูตรมีรอยแตกจำนวนมากเนื่องจากการหดตัวของผงแก้วไพเรกซ์ที่อุณภูมิเผาผนึก 800°C [38] และการระเหยของน้ำที่เป็นส่วนผสมในการเตรียมวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว อัตราการรั่วของแก๊สเมื่อทดสอบกับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าอัตราการรั่วของแก๊สจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อลดปริมาณของผงแก้วไพเรกซ์ลง โดยอัตราการรั่วของสูตรที่ 3 มากกว่า สูตรที่ 2 และสูตรที่ 1 ตามลำดับ สูตรที่ 2 มีอัตราการรั่วมากกว่าสูตรที่ 1 ประมาณ 10 เท่า สูตรที่ 3 มีอัตราการมากกว่าสูตรที่ 2 ประมาณ 100 เท่า เนื่องจากปริมาณของผงไพเรกซ์ลดลงสูตรละ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุผสมมีสมบัติการเปียกลดลง และมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากปริมาณผง YSZ ที่เพิ่มขึ้น เหตุผลที่เลือกวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 เพราะสามารถป้องกันการรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดีทั้ง 2 สูตร เนื่องจากที่อุณหภูมิ 800°C เกิดโครเมียมออกไซด์ที่ผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งโครเมียมออกไซด์ประกอบด้วยโครเมียมไอออน (Cr^{2+}) และออกซิเจน โดยออกซิเจนช่วยลดแรงตึงผิวที่ผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิมช่วยให้แก้วไพเรกซ์สามารถเปียกบนผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี [28] โดยมีอัตราการรั่วของแก๊สใกล้เคียงกับการป้องกันการรั่วของแก๊สแบบไฮบริด [3] และเมื่อทดสอบการรั่วกับเพลเล็ตของ YSZ พบว่าสูตรที่ 1 สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีเนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถเปียกผิวเพลเล็ตของ YSZ ได้ดีที่อุณหภูมิ 800°C ตามรูปที่ 5.29 ส่วนสูตรที่ 5 เป็นสูตรที่เติมสารปรุงแต่งคือโซเดียมอะลูมิเนต ($NaAlO_2$) มีความสามารถป้องกันการรั่วของแก๊สด้อย

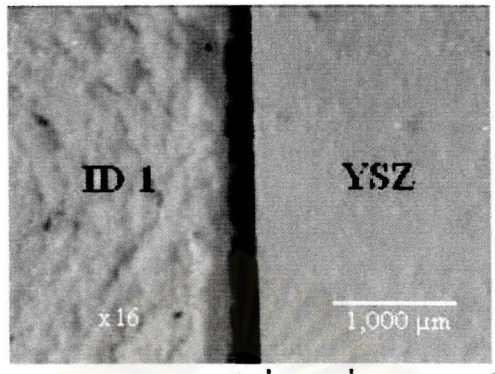
กว่าสูตรที่ 1 โดยสูตรที่ 5 มีอัตราการรั่วมากกว่าสูตรที่ 1 ประมาณ 10 เท่า เพราะว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 สามารถเปียกกับผิวของเพลเล็ต YSZ บางส่วน โดยส่วนที่เปียกเป็นส่วนที่สารเติมแต่งเข้าไปไม่ถึงในกระบวนการบดผสมในอาเกต ตามรูปที่ 5.30 สารปรุงแต่งที่เติมลงไปในแก้วไพเรกซ์ส่งผลให้แก้วไพเรกซ์มีความหนืดสูงขึ้น โดยโซเดียมทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เนื่องจากไอออนมีขนาดเล็ก [30] นอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มอะลูมินาเข้าไปในแก้วไพเรกซ์ส่งผลให้วัสดุป้องกันแก๊สรั่วไม่เปียกกับผิวของ YSZ ซึ่งผลการทดลองขัดแย้งกับ X,Qi et al [10] ที่กล่าวว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วที่มีส่วนผสมของผงเมมเบรน $SrCe_{0.95}Tb_{0.05}O_3$ (SCT) กับแก้วไพเรกซ์ และ สารเติมแต่งคือโซเดียมอะลูมิเนต 25, 65 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเปียกบนผิวของเมมเบรน SCT และอะลูมินา



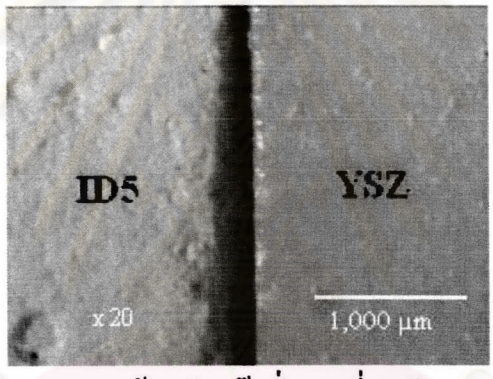
รูปที่ 5.25 การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



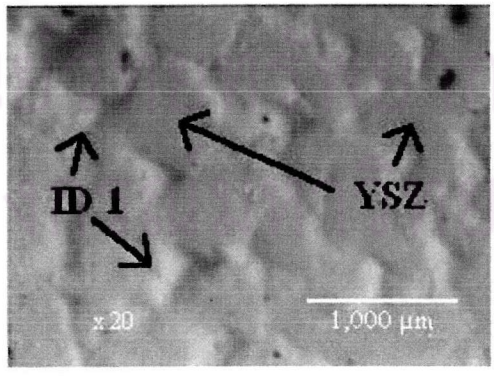
รูปที่ 5.26 การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่ผ่านการ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



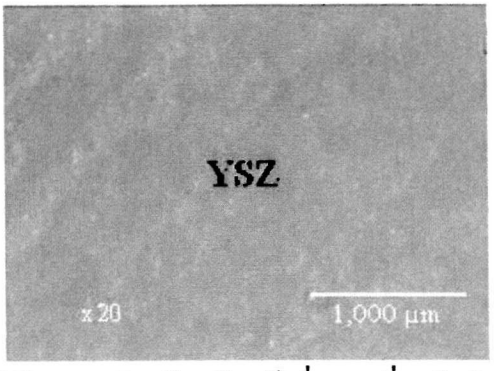
รูปที่ 5.27 การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเพลเล็ตของ YSZ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.28 การไม่ยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเพลเล็ตของ YSZ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.29 การเปียกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับผิวเพลเล็ต YSZ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



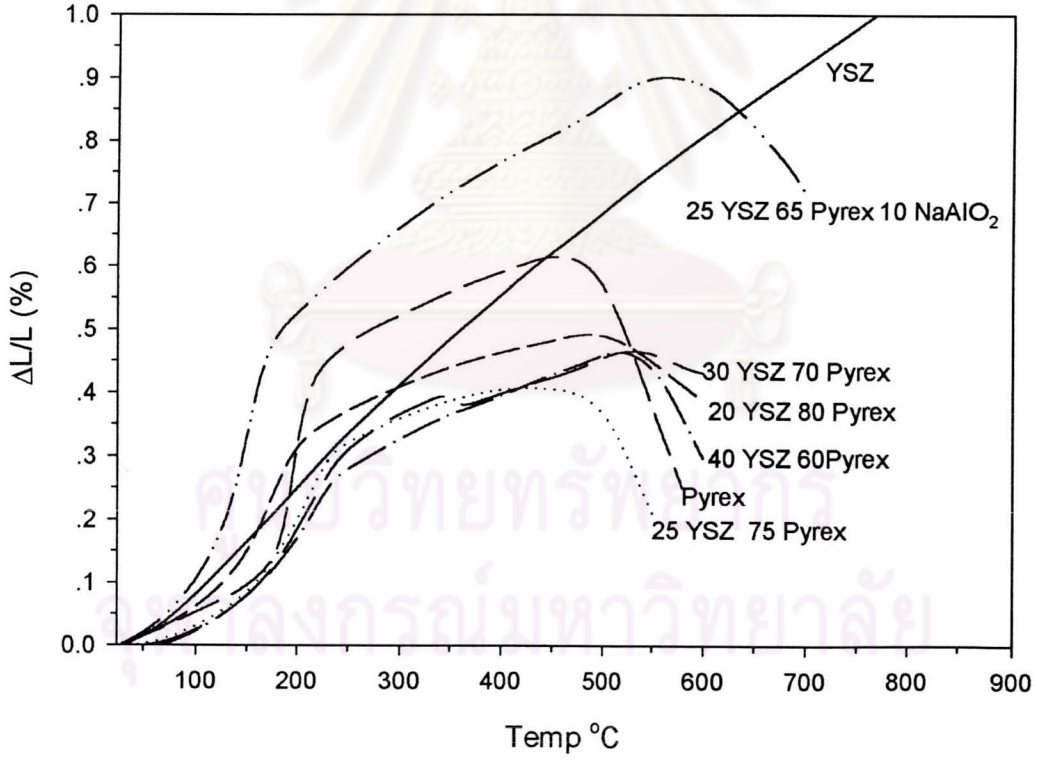
รูปที่ 5.30 การไม่เปียกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับผิวเพลเล็ต YSZ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จุดมุ่งหมายของการทดลองเพื่อต้องการวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบที่สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีที่สุด และใช้ปริมาณของแก้วไพเรกซ์น้อยที่สุด จากผลการทดสอบอัตราการรั่วของแก๊ส สูตรที่ 1 สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีที่สุด รองลงมาคือสูตรที่ 2 ดังนั้นจึงได้ทำการปรับสูตรโดยใช้ผงไพเรกซ์ และผง YSZ ให้มีค่าอยู่ระหว่างสูตรที่1 และ 2 โดยใช้ผงแก้วไพเรกซ์ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผง YSZ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้เป็นสูตรที่ 4 อัตราการรั่วของสูตรที่ 4 มีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ 1 และสามารถยึดติดได้ดีกับกับเหล็กกล้าไร้สนิม และเพลเล็ตของ YSZ ดังตารางที่ 5.5 ต่อมาจึงได้ทำการพัฒนาสูตรที่ 5 โดยการลดปริมาณผงแก้วไพเรกซ์ลงและเติมสารช่วยลดอุณหภูมิการหลอมเหลว (flux) คือโซเดียมอะลูมิเนตลงไปแทน สาเหตุที่เลือกโซเดียมอะลูมิเนตคือ โซเดียมเป็นตัวลดอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ดี และอะลูมินาสามารถเข้ากันได้ดีกับแก้วไพเรกซ์โดยไม่ทำปฏิกิริยากัน เมื่อทดสอบการยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิม และกับเพลเล็ตของ YSZ พบว่าสามารถยึดติดได้ดี และอัตราการรั่วของแก๊สใกล้เคียงกับสูตรที่ 1 ตามตารางที่ 5.6

5.2.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ผลที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนทั้ง 5 สูตร ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.31 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแสดงในตารางที่ 5.7 เมื่อพิจารณาตามหลักความเป็นจริงเมื่อลดปริมาณผงแก้วผงไพเรกซ์ลงและเติมผง YSZ ลงไปแทน น่าจะทำให้สัมประสิทธ์การขยายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นแต่ผลการทดลองไม่เป็นเช่นนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว 1, 4 และ 2 ซึ่งมีปริมาณผง YSZ 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ควรจะมีค่ามากกว่าแก้วไพเรกซ์ที่ไม่ผสมผง YSZ และควรจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับแต่กลับมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าแก้วไพเรกซ์ อาจเนื่องมาจากปริมาณผงของ YSZ ที่เติมลงไปมีค่าน้อยจึงไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และในขณะเดียวกันเฟสคริสโตบาไลต์ที่เกิดขึ้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์

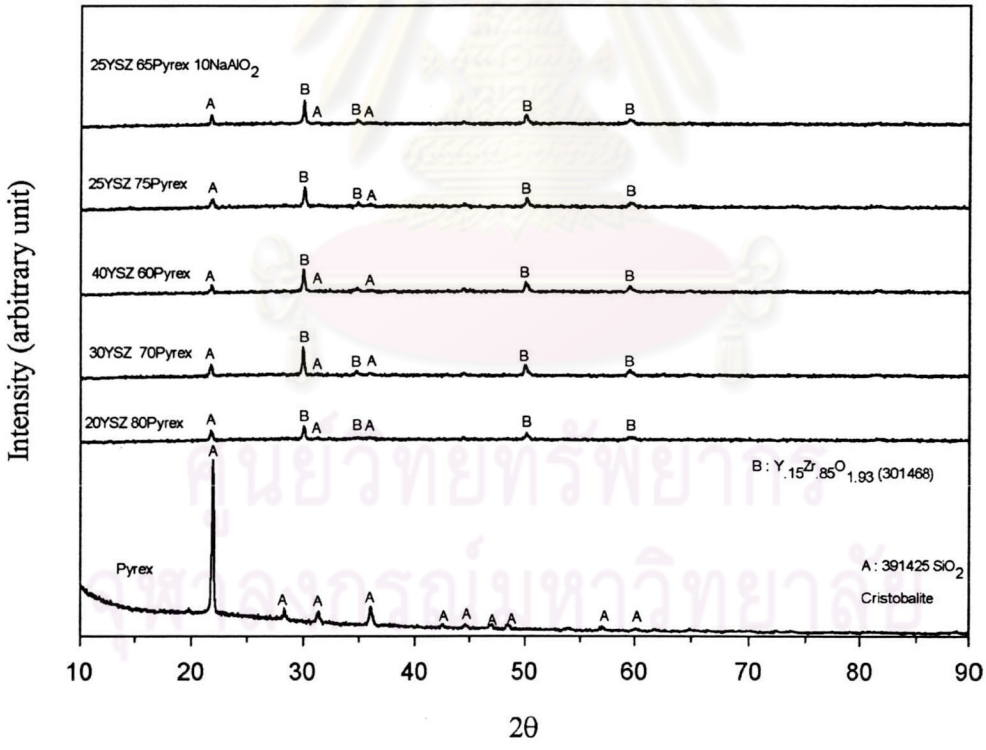
การขยายตัวทางความร้อนให้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนสูตรที่ 5 เป็นสูตรที่มีการเติมสารเติมแต่งคือโซเดียมอะลูมิเนต มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับสูตรที่ 3 โดยสูตรที่ 5 มีปริมาณผง YSZ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งน้อยกว่าสูตรที่ 3 ซึ่งมีผง YSZ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกัน ทั้งที่สูตรที่ 5 มีปริมาณผง YSZ น้อยกว่าจึงน่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าสารเติมแต่งที่เติมลงไปคือโซเดียมอะลูมิเนต มีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบซึ่งมีค่าการขยายตัวทางความร้อน 8×10^{-6} /°C มีค่าสูงใกล้เคียงกับ YSZ คือ 10.8×10^{-6}/°C จึงส่งผลให้สูตรที่ 5 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาแผนภาพการขยายตัวทางความร้อนในรูปที่ 5.31 พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วทุกสูตรมีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูงในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 200°C ซึ่งเป็นไปตามเฟสที่พบคือคริสโตบาไลต์ มีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูงคือ 27.1×10^{-6}/°C และทุกสูตรมีค่าการขยายตัวทางความร้อนลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 200°C เพราะเป็นผลจากการเปลี่ยนเฟสจากแอลฟา (α) คริสโตบาไลต์ ไปเป็นเบตา (β) คริสโตบาไลต์ [28,39] ตามรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.39 การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.7 ค่าการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ

สูตรที่	Pyrex (wt%)	YSZ (wt%)	$NaAlO_2$ (wt%)	ค่าการขยายตัวทางความร้อน x 10^{-6}/°C 250 – 450°C
	100	0	0	6.85
1	80	20	0	5.57
2	70	30	0	5.70
3	60	40	0	7.43
4	75	25	0	4.25
5	25	65	10	7.48



รูปที่ 5.32 เฟสที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบทั้ง 5 สูตร ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

5.2.1.3 ค่าความเค้นแรงเฉือน

ได้ศึกษาเปรียบทียบค่าความเค้นแรงเฉือนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ 2 สูตรคือ สูตรที่ 1 และ 5 ซึ่งสามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีกับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ โดยได้ผลการทดลองจากการทดสอบการรั่วของแก๊ส ค่าความเค้นแรงเฉือนมีค่าดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าความเค้นแรงเฉือนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 และ 5

สูตรที่	ค่าความเค้นแรงเฉือน (kgf/cm^2)
1	18.08
5	20.53

พบว่าค่าความเค้นแรงเฉือนของสูตรที่ 5 เป็นสูตรที่เติมโซเดียมอะลูมิเนต มีค่าสูงกว่าสูตรที่ 1 เนื่องจากโซเดียม จากโซเดียมอะลูมิเนต แพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้โครเมียมระเหยออกมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมมากขึ้นเกิดเป็นชั้นของโครเมียมออกไซด์ ช่วยให้การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมดีขึ้น [5]

5.2.1.4 การทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมี

ได้ศึกษาการเข้ากันได้ทางเคมีของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุผสมสูตรที่ 1 และ 5 กับ YSZ, Ni / YSZ, LSM และเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์, แอโนด, แคโทด และอินเตอร์คอนเนคตามลำดับ ทั้งในภาวะออกซิไดซิง และรีดิวซิง

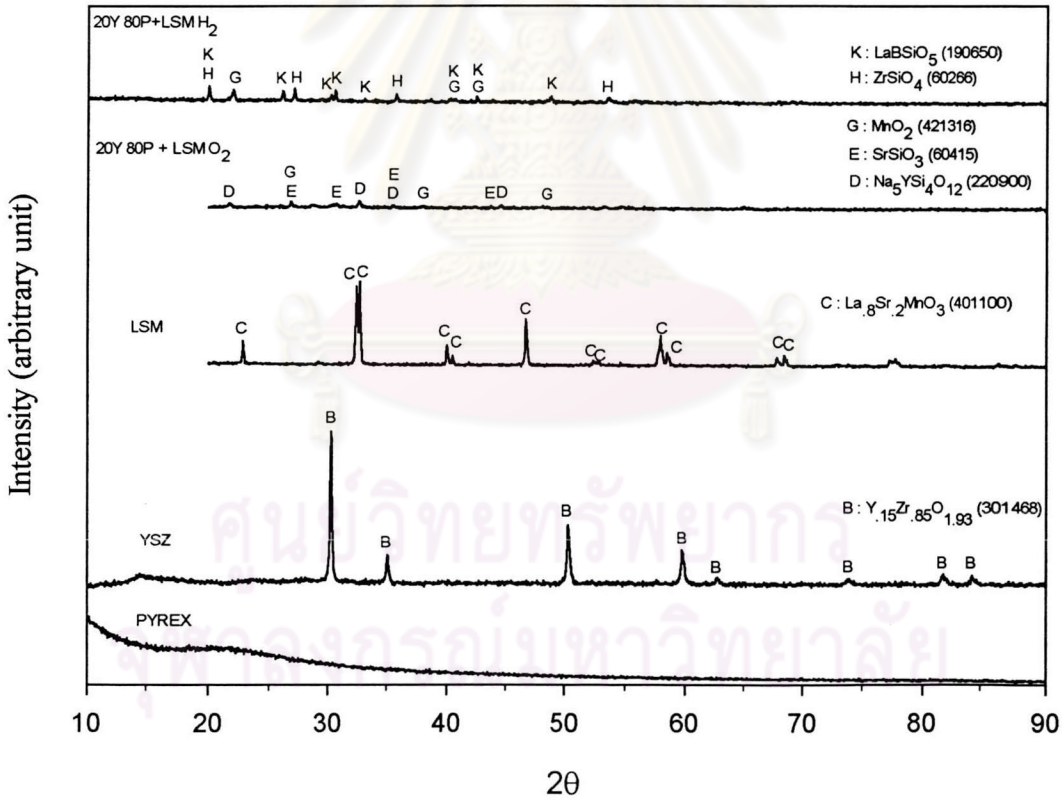
วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1

(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 กับ LSM ในภาวะออกซิไดซิง เกิดเฟสของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $Na_5YSi_4O_{12}$, $Na_2ZrSi_2O_7$ และเฟสที่เกิดจากการสลายตัวของ LSM คือ MnO_2 มาทำปฏิกิริยากับธาตุที่อยู่ในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเกิดเป็นเฟสใหม่คือ $SrSiO_3$ ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $ZrSiO_4$ และเฟสที่เกิดจากการสลายตัวของ LSM คือ MnO_2 มาทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ LSM เช่นกันเกิดเฟสใหม่คือ $LaBSiO_5$ ตามรูปที่ 5.33

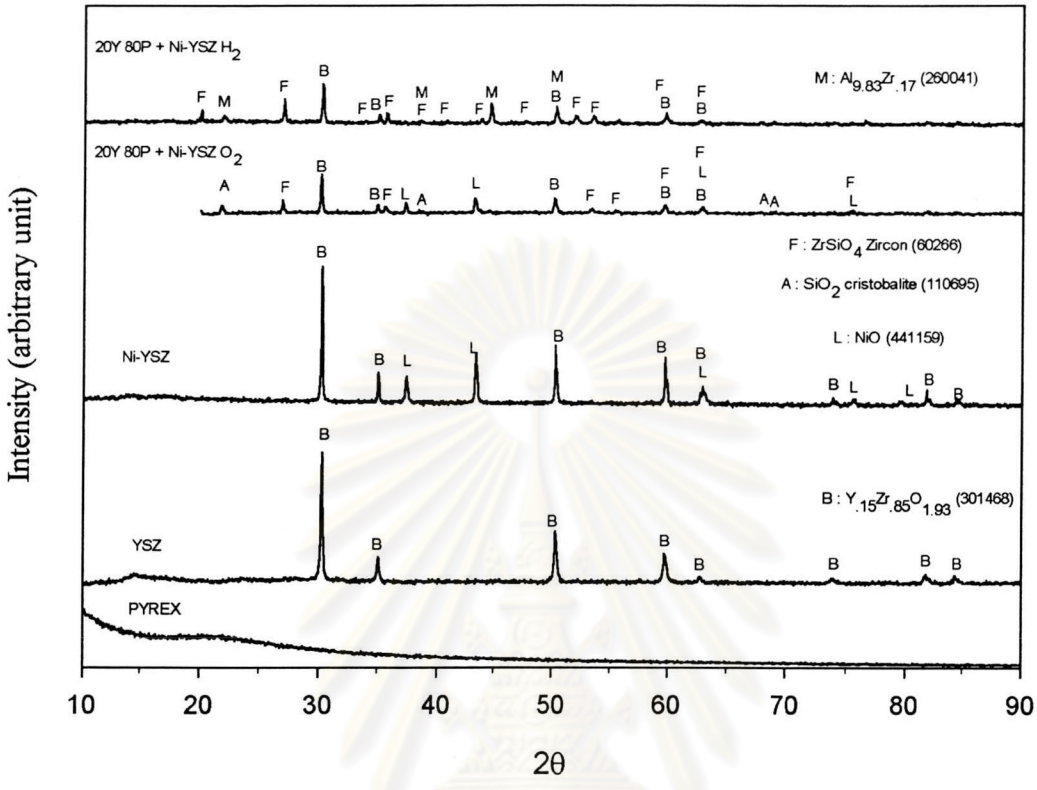
(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 กับ Ni-YSZ ในภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสเดิมของสารตั้งต้นคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$, NiO และ SiO_2 (cristobalite) และเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ Ni / YSZ คือเซอร์คอน ($ZrSiO_4$) ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา

ระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ Ni /YSZ คือเซอร์คอน และ $Al_{9.83}Zr_{.17}$ แสดงว่าเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง ส่วนธาตุนิกเกิลไม่สามารถตรวจสอบได้ หลังจากการทำปฏิกิริยาเมื่อตรวจสอบด้วย XRD แต่เมื่อตรวจสอบด้วย x-ray dispersive energy ก็ยังคงพบนิกเกิล การที่ตรวจสอบด้วย XRD ไม่พบนิกเกิลอาจเนื่องจากนิกเกิลแพร่ไปอยู่ที่ขอบเกรน ตามรูปที่ 5.34

(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 กับ YSZ ในภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และ SiO_2 (cristobalite) และเฟสใหม่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ YSZ คือ $ZrSiO_4$ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ YSZ คือ $ZrSiO_4$ และ $Al_{9.83}Zr_{.17}$ แสดงว่าเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ YSZ ทั้งภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิงโดยทั้งสองภาวะเกิดเฟส $ZrSiO_4$ ซึ่งเป็นเฟสที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ตามรูปที่ 5.34

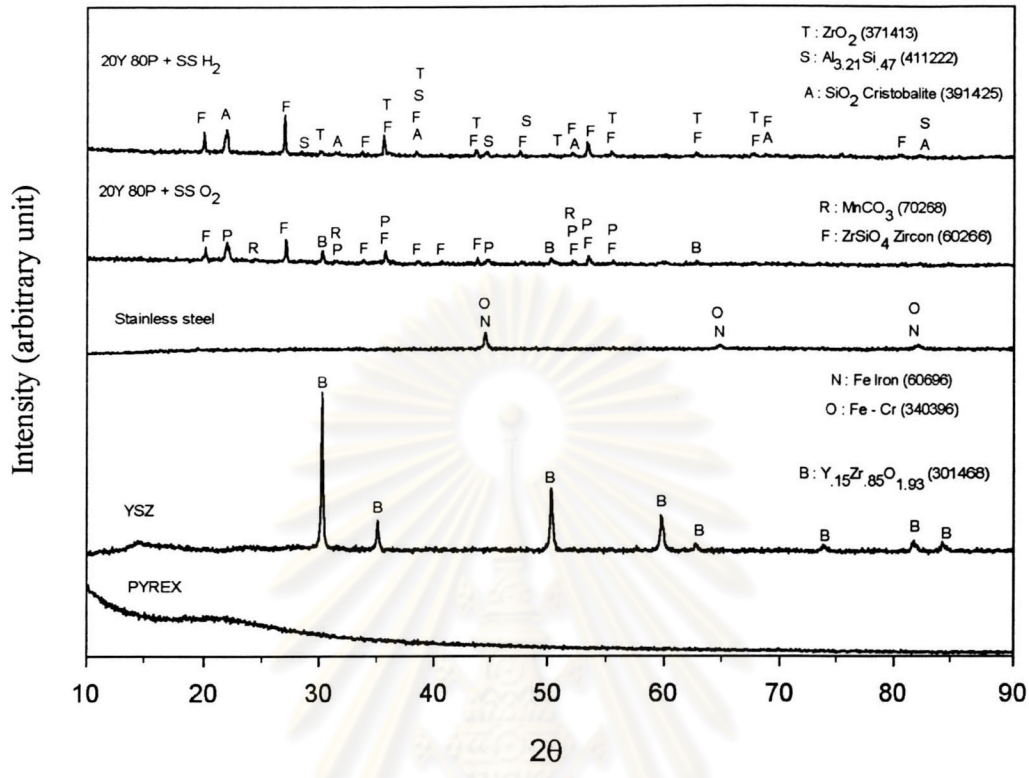


รูปที่ 5.33 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศและบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน



รูปที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศและบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 กับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ในภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และ $ZrSiO_4$ จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และเฟสที่เกิดจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิมคือ $AlPO_4$ และ $MnCO_3$ แสดงว่าไม่เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้น ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ คริสโตบาไลต์ (SiO_2), $ZrSiO_4$, และ $Al_{3.21}Si_{.47}$ โดยไม่พบธาตุ Fe และ Cr ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเหล็กกล้าไร้สนิมเลยซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวไปตามขอบเกรน ตามรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิง ประกอบสูตรที่ 1 ผสมกับเศษผงของเหล็กกล้าไรสนิม ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

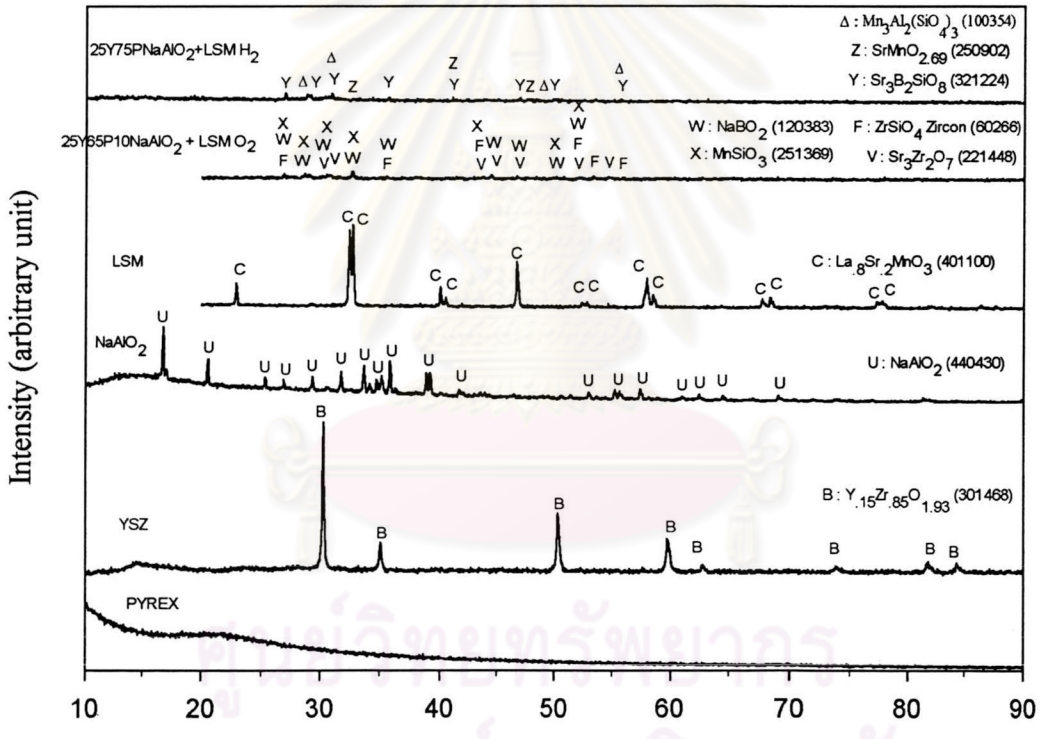
วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5

(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5 กับ LSM ในภาวะออกซิไดซิง พบว่ามีเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของธาตุในวัสดุเชิงประกอบคือ $ZrSiO_4$ และ $NaBO_2$ และเฟสที่เกิดจากการแยกตัวของ LSM ออกมาทำปฏิกิริยากับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $Sr_3Zr_2O_7$ และ $MnSiO_3$ ส่วนในภาวะรีดิวซิง เกิดการแยกตัวของ LSM ออกมาเป็น $SrMnO_{2.96}$ และ MnO_2 และเกิดเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของธาตุที่แยกออกมาจาก LSM มาทำปฏิกิริยากับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $Sr_3B_2SiO_8$ และ Mn_3Al_2Si แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ LSM ทั้งในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง ตามรูปที่ 5.36

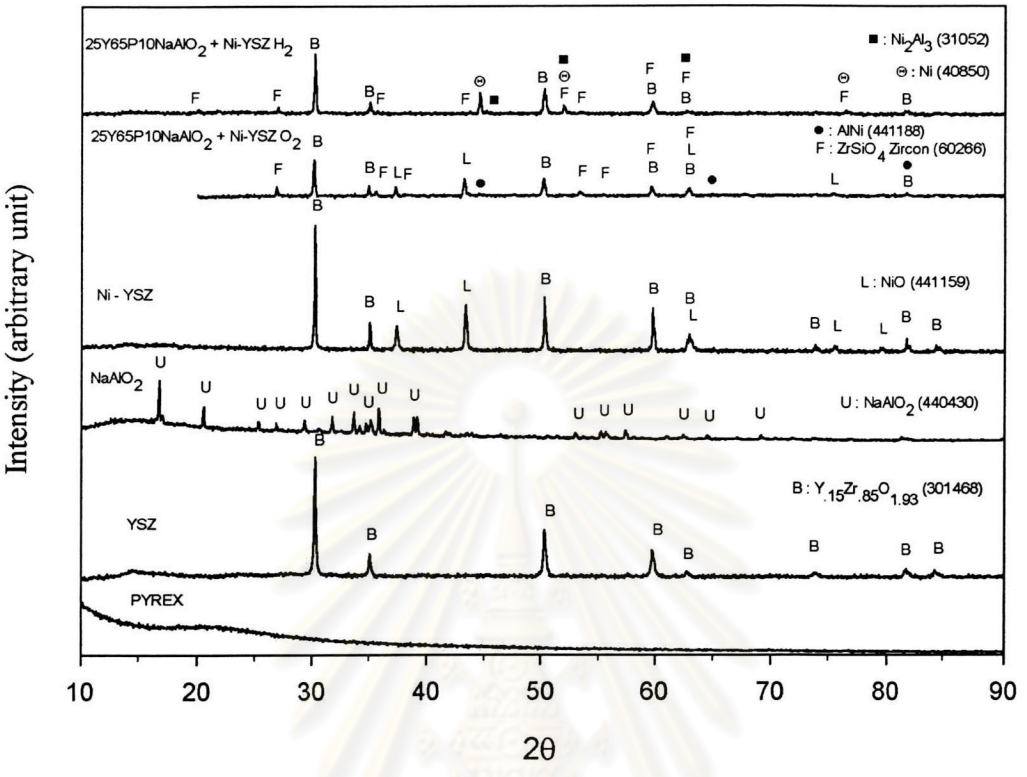
(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5 กับ Ni / YSZ ในภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ จาก Ni / YSZ และเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ Ni / YSZ คือ $ZrSiO_4$ และ AlNi ส่วนภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสาร

ตั้งต้นคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และ Ni ซึ่ง Ni ได้จาก NiO ที่ถูกรีดิวซ์ในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน และการเกิดเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Ni / YSZ กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $ZrSiO_4$ และ Ni_2Al_3 แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ Ni / YSZ ทั้งในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง ตามรูปที่ 5.37

(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5 กับ YSZ ในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ YSZ คือ $ZrSiO_4$ แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับ YSZ ทั้งในภาวะออกซิไดซิงและรีดิวซิง ตามรูปที่ 5.37

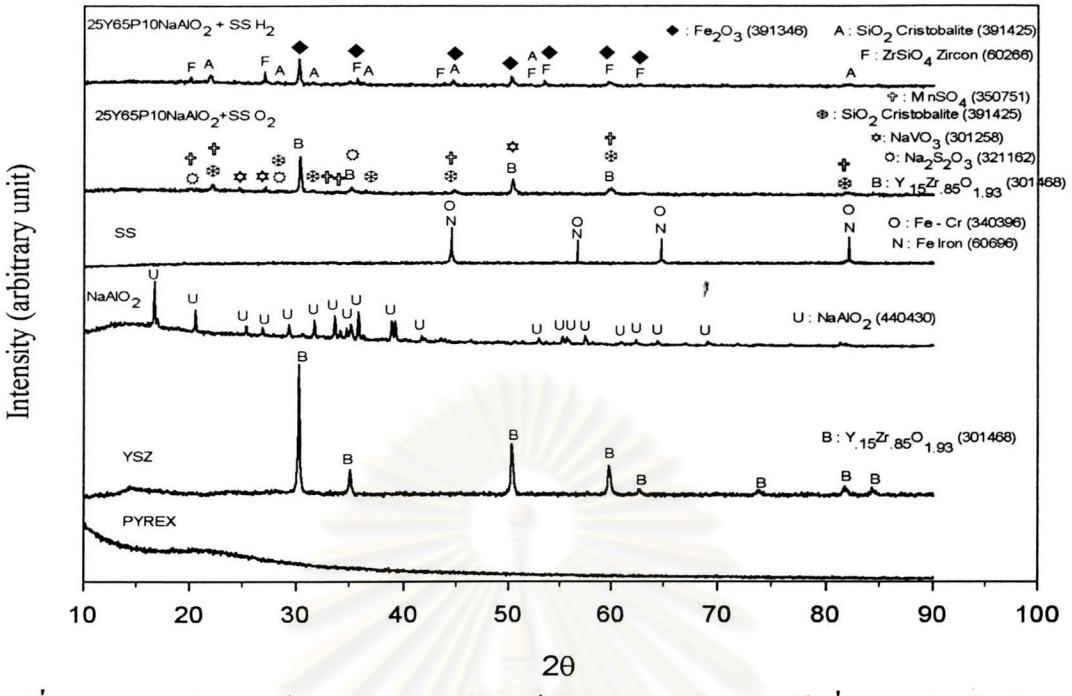


รูปที่ 5.36 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศและแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน



รูปที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศและแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุผสมสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ในภาวะออกซิไดซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นที่ได้จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ และ คริสโตบาไลต์ (SiO_2) และจากเหล็กกล้าไร้สนิมคือ $MnSO_4$ เฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมคือ $Na_2S_2O_3$ และ $NaVO_3$ ส่วนในภาวะรีดิวซิงเกิดเฟสของสารตั้งต้นที่มาจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วคือ $ZrSiO_4$, คริสโตบาไลต์ (SiO_2) และเฟสจากเหล็กกล้าไร้สนิมคือ Fe_2O_3 แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งภาวะออกซิไดซิงแต่ไม่เกิดปฏิกิริยาในภาวะรีดิวซิง ตามรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลเล็ตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 5 ผสมกับเศษผงเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน

เฟสที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 กับ LSM, Ni / YSZ, และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเผาที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิไดซิง และรีดิวซิง รวมสรุปไว้ในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แสดงเฟสที่เกิดจากการผสมผงของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 กับผงของ LSM, Ni / YSZ, YSZ และเหล็กกล้าไร้สนิม เผาที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิไดซิง และรีดิวซิง

Seal	LSM	Ni / YSZ	YSZ		SS	
	Air	$H_2$7% in Ar	Air	$H_2$7% in Ar	Air	$H_2$7% in Ar
1	$Na_5Ysi_4O_{12}$ $Na_2ZrSi_2O_7$ MnO_2 $SrZiO_3$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ $ZrSiO_4$ $Al_{9.83}Zr_{.17}$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ SiO_2 (cris) $ZrSiO_4$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ $Al_{9.83}Zr_{.17}$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ $ZrSiO_4$ $AlPO_4$ $MnCO_3$	SiO_2 (cris) $ZrSiO_4$ ZrO_2 $Al_{3.21}Si_{.47}$

ตารางที่ 5.9 (ต่อ)

Seal	LSM	Ni / YSZ	YSZ		SS	
	Air	$H_2$7% in Ar	Air	$H_2$7% in Ar	Air	$H_2$7% in Ar
5	$ZrSiO_4$ $NaBO_2$ $Sr_3Zr_2O_7$ $MnSiO_3$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ Ni $ZrSiO_4$ Ni_2Al_3	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ $ZrSiO_4$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ $ZrSiO_4$	$Y_{.15}Zr_{.85}O_{1.93}$ SiO_2(cris) $Na_2Si_2O_3$ $NaVO_3$	$ZrSiO_4$ SiO_2(cris) Fe_2O_3

5.2.1.5 ความพรุนปรากฏ

ได้ทำการทดสอบความพรุนปรากฏของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีที่สุดคือ สูตรที่ 1 และ 5 โดยได้ผลจากการทดสอบการรั่วกับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ค่าความพรุนปรากฏดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าความพรุนปรากฏของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ สูตรที่ 1 และ 5

สูตรที่	ความพรุนปรากฏ (%)
1	10.35
5	18.98

การเกิดความพรุนปรากฏจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุผสมทั้ง 2 สูตร เกิดเนื่องมาจากการเกิดผลึกคริสโตบาไลต์ขึ้นในแก้วไพเรกซ์ ทำให้ปริมาตรของแก้วลดลงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ [40] ค่าความพรุนปรากฏของสูตรที่ 5 มากกว่าสูตรที่ 1 เนื่องมาจากสูตรที่ 5 มีปริมาณผง YSZ มากกว่าสูตรที่ 1 และมีอะลูมินาที่ได้จากโซเดียมอะลูมิเนต จึงเกิดความพรุนปรากฏมากขึ้น เพราะความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของอนุภาคของเซอร์โคเนีย และอะลูมินากับแก้วไพเรกซ์ [41]

5.2.1.6 การทดสอบการยึดติดเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน

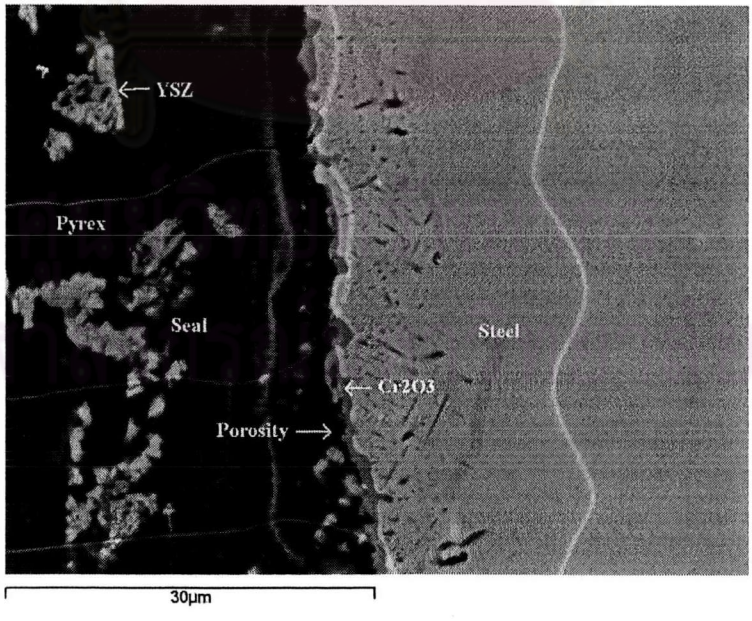
ได้ทำการทดสอบการยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีที่สุดคือ สูตรที่ 1 และ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ และแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน 5 วัฏจักรความร้อน วัฏจักรความร้อนละ 12 ชั่วโมง

วัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง 12 ชั่วโมง

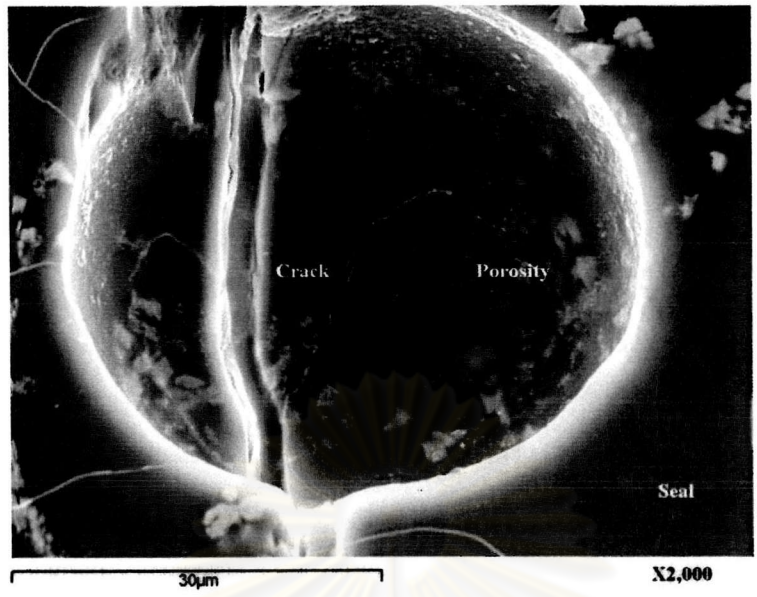
(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วยึดติดกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นการยึดติดแบบทางกล ตามรูปที่ 5.39 แต่มีรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ตามรูปที่ 5.40 เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมมาก คือมีค่า 18.35 x 10^{-6}/°C ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 200°C และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิม แพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และธาตุเซอร์โคเนียมจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.41 นอกจากนั้นยังพบว่าเกิดรูพรุนระหว่างผิวของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากธาตุโครเมียมที่แพร่ออกมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมทำปฏิกิริยากับน้ำที่เป็นส่วนผสมของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นที่บริเวณรอยต่อตามปฏิกิริยาที่ 5.2

$$Cr + 3/2H_2O = \tfrac{1}{2}Cr_2O_3 + 3/2H_2 \uparrow \quad \Delta G_{750\,C} = -222\ kJ/mol \qquad 5.2$$

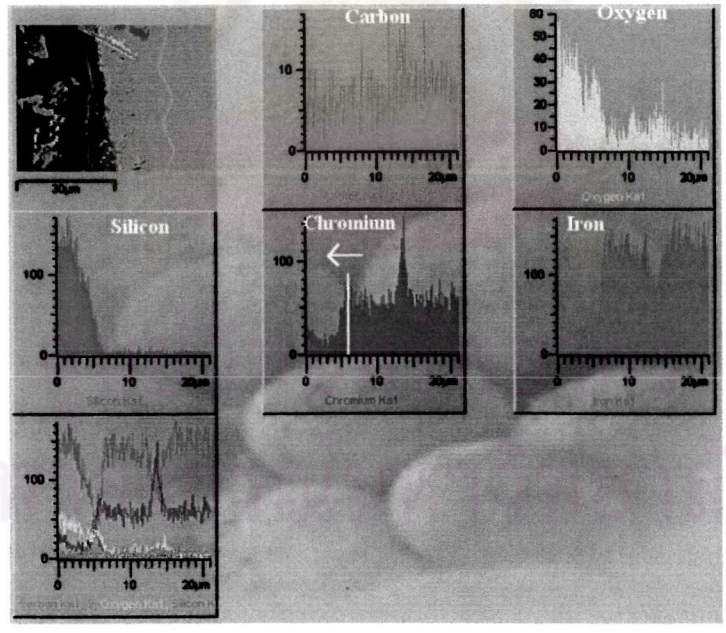
และเมื่อวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเปลี่ยนจากแก้วเปลี่ยนเป็นแก้วเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึก แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะอพยพเข้าไปในแก้วเซรามิกทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว [27]



รูปที่ 5.39 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



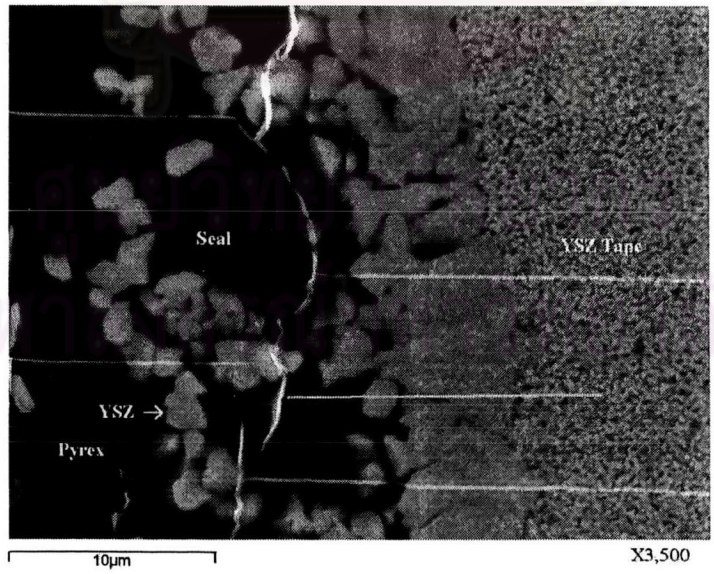
รูปที่ 5.40 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



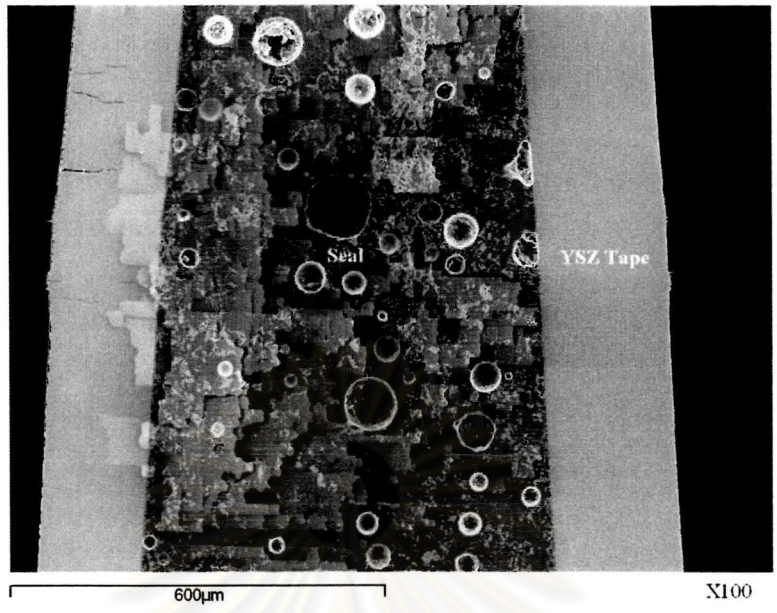
รูปที่ 5.41 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ ไม่พบการทำปฏิกิริยาและรูพรุนที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.42 ไม่พบรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแต่มีรอยแตกที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ การที่แผ่นเทป YSZ แตกเนื่องจากมีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วตามรูปที่ 5.43 และเมื่อพิจารณาการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบซิลิกอนแพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.44

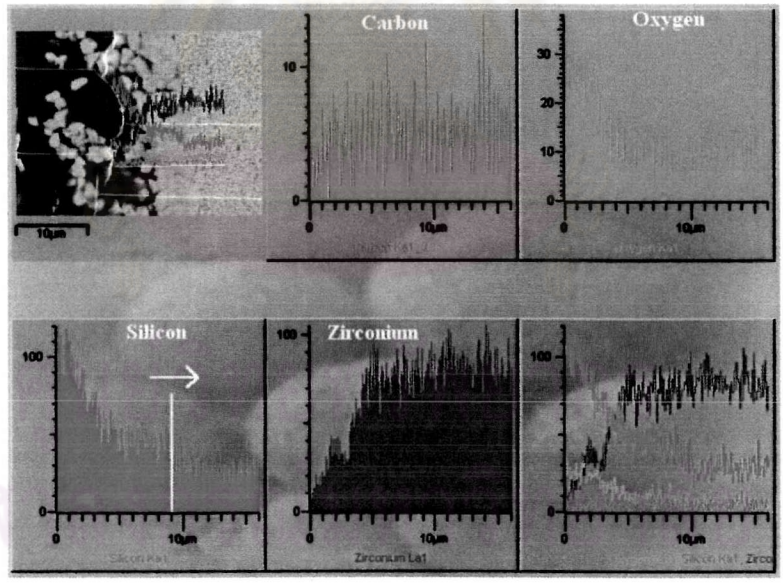
(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากการยึดติดระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ตามรูปที่ 5.45 แต่มีรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ตามรูปที่ 5.46 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 35.62 x 10^{-6} / °C ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 160°C ซึ่งมีค่าแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมมาก นอกจากนั้นยังพบรูพรุนที่เกิดจากการแยกออกจากกันระหว่างชั้นของโครเมียมออกไซด์กับผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโครเมียมออกไซด์มีค่า 4.9 x 10^{-6} / °C [37] ซึ่งมีค่าแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิม และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าธาตุ โซเดียม และ เซอร์โคเนียม จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม และธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมก็แพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วด้วยเช่นกัน ตามรูปที่ 5.47



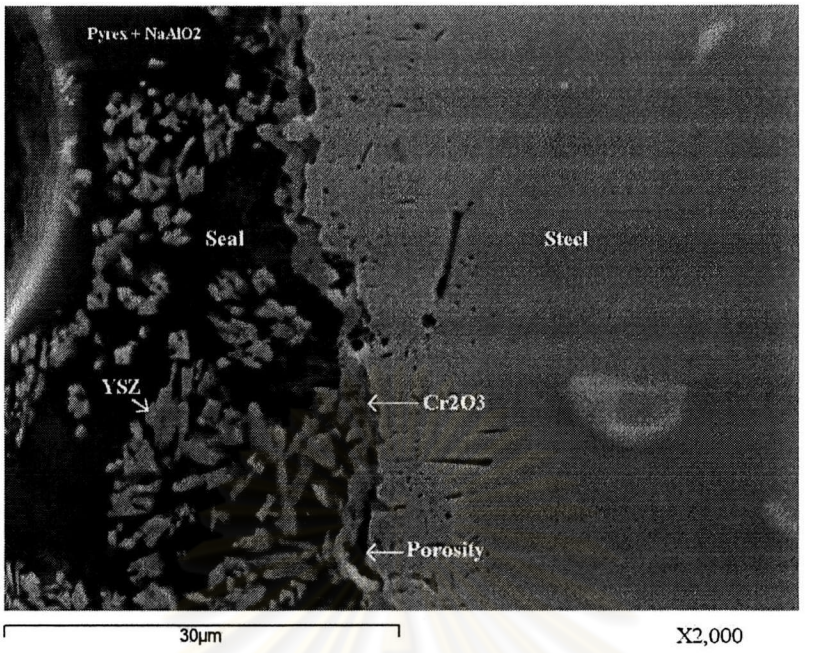
รูปที่ 5.42 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



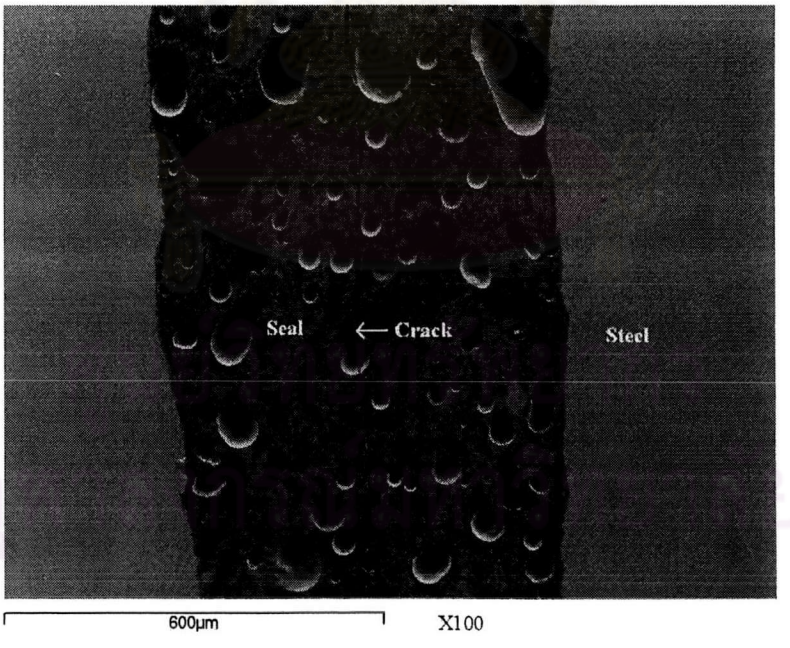
รูปที่ 5.43 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ ที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



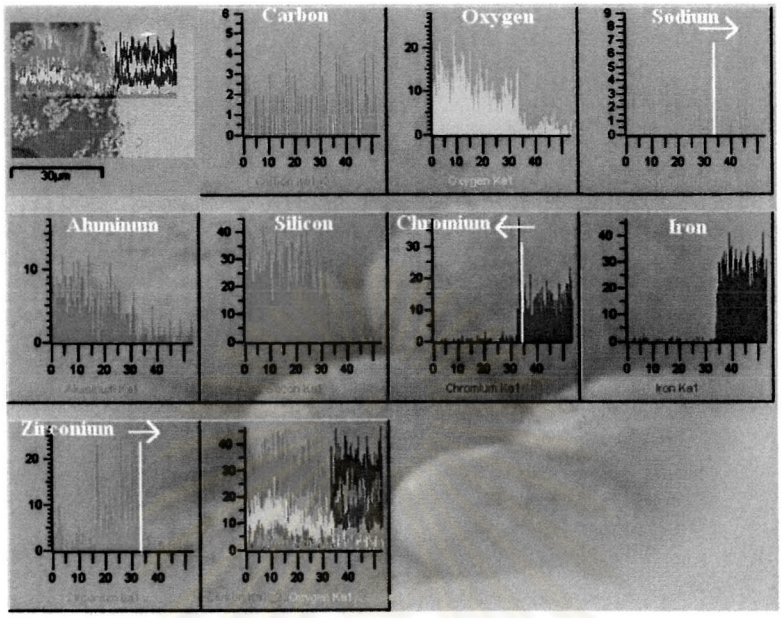
รูปที่ 5.44 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.45 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

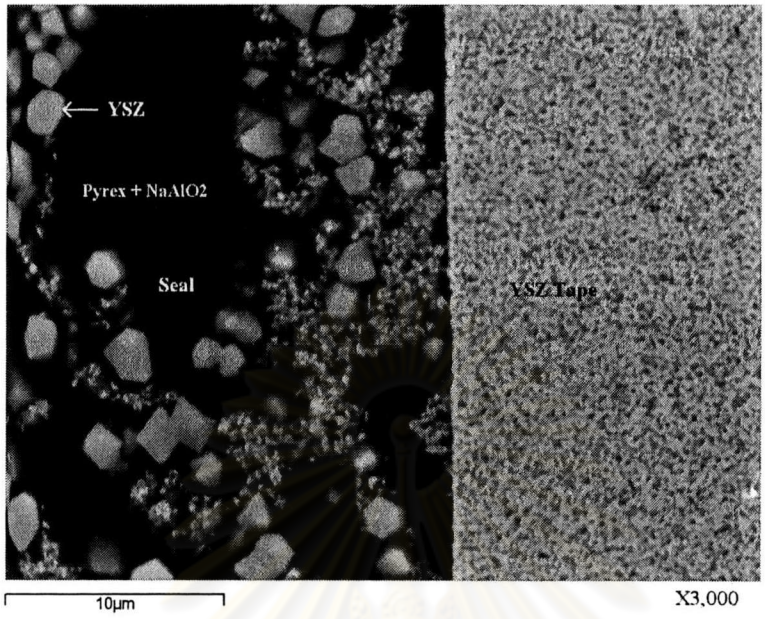


รูปที่ 5.46 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบกับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

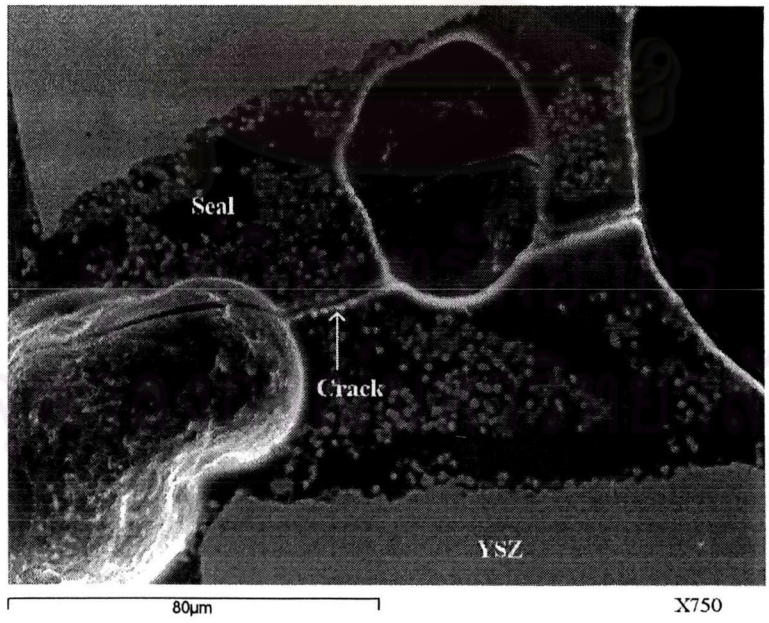


รูปที่ 5.47 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

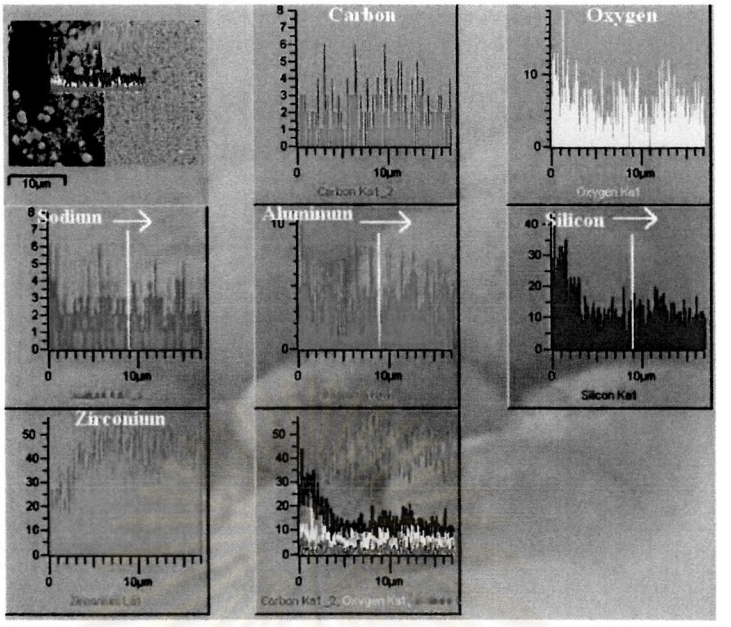
(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดกับแผ่นเทป YSZ ได้ดี และไม่มีรูพรุนที่รอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.48 แต่เกิดรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ เช่นกัน ตามรูปที่ 5.49 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบว่าธาตุโซเดียม, อะลูมิเนียม และ ซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.48 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.49 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบกับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



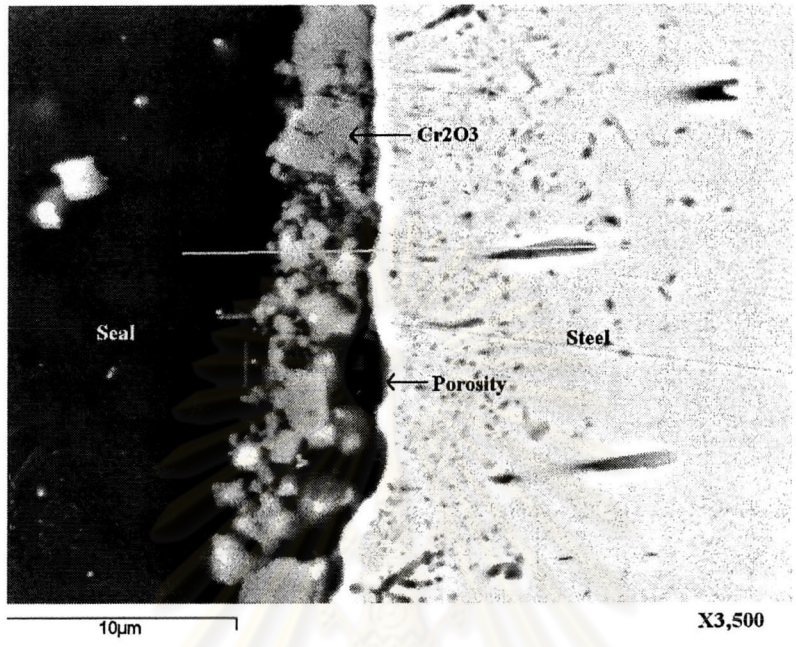
รูปที่ 5.50 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

วัฏจักรความร้อนที่สอง 24 ชั่วโมง

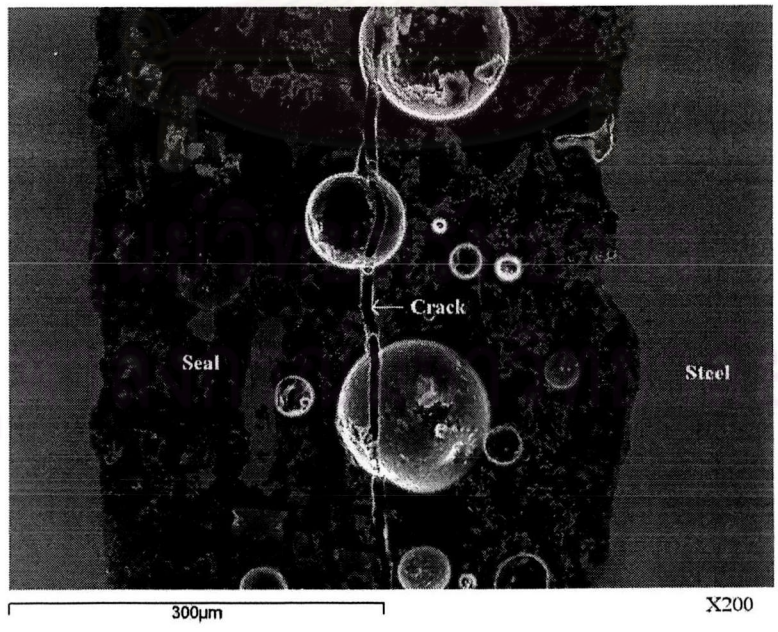
(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการยึดติดกันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เกิดรูพรุนระหว่างโครเมียมออกไซด์กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันตามรูปที่ 5.51 เมื่อสังเกตที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว พบรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.52 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุโครเมียม และแมงกานีสจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ตามรูปที่ 5.53 กระบวนการแพร่ของธาตุ แมงกานีสเกิดขึ้น โดยผ่านทางแลสติส (lattice site) ของโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) เกิดเป็นชั้นที่ไม่ต่อเนื่องของ $MnCr_2O_4$ สปิเนล (spinel) ที่ผิวชั้นบนของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) [42]

(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ ไม่พบรูพรุนที่รอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.54 แต่เกิดรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และมีรอยแตกที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกัน

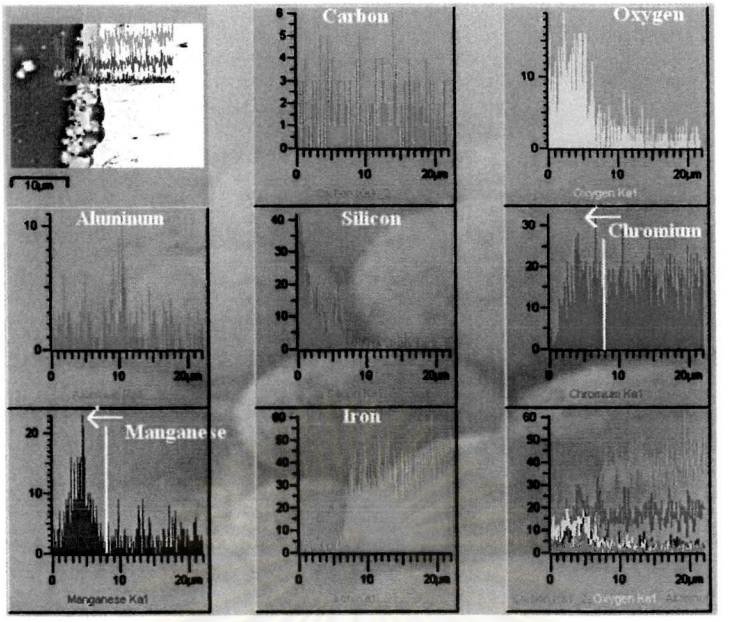
แก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.55 เมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบว่าธาตุโซเดียม, อะลูมิเนียม และ ซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.56



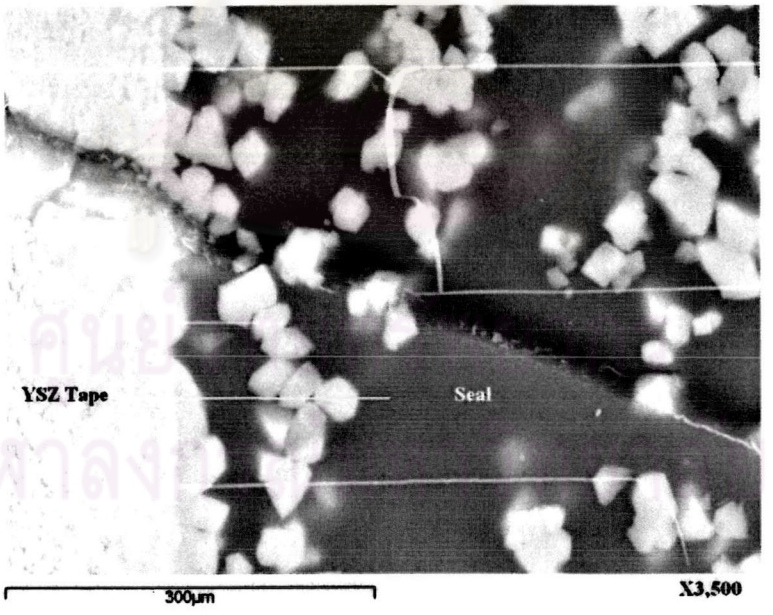
รูปที่ 5.51 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



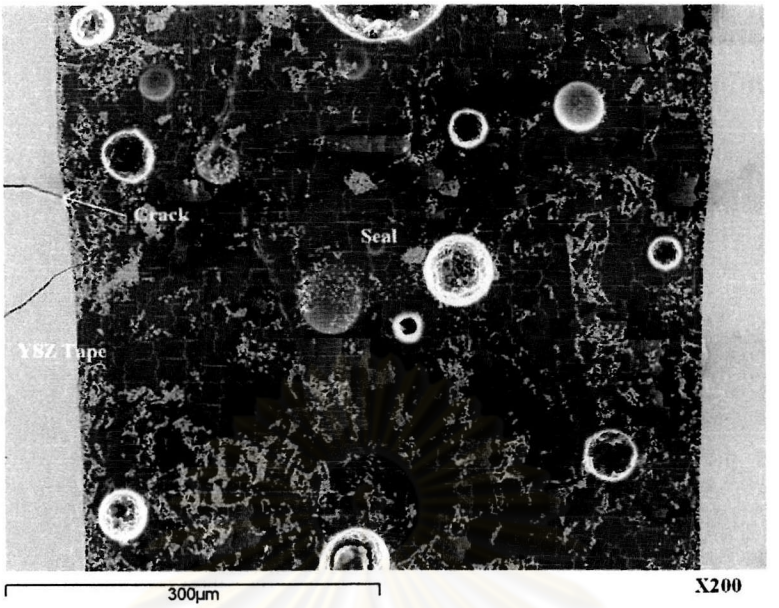
รูปที่ 5.52 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



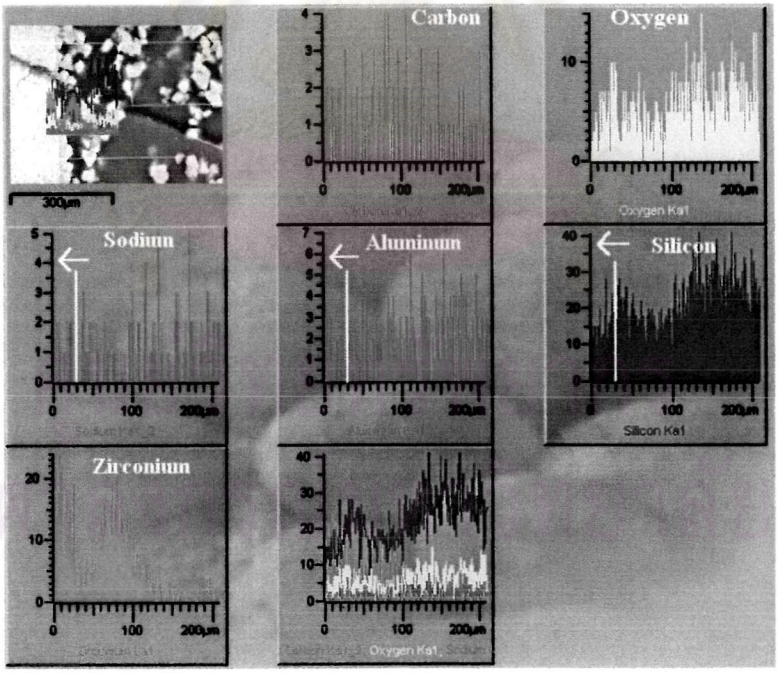
รูปที่ 5.53 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.54 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



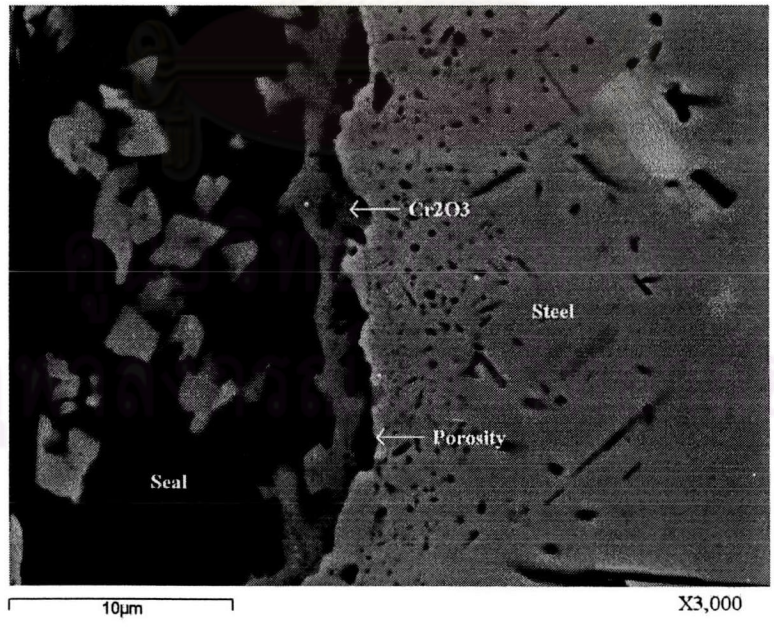
รูปที่ 5.55 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่ด้วยกันเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



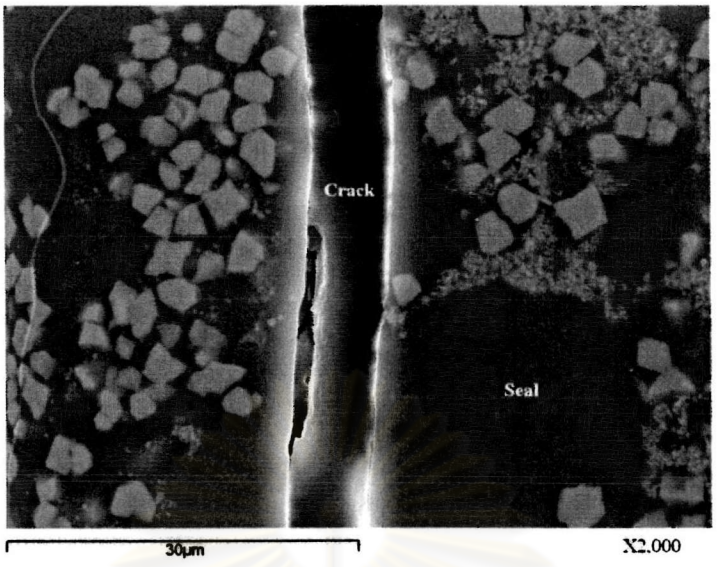
รูปที่ 5.56 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากการยึดติดระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนั้นยังพบรูพรุนที่เกิดจากการแยกออกจากกันระหว่างชั้นของโครเมียมออกไซด์กับผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.57 และมีรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมมากตามรูปที่ 5.58 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุโซเดียม และเซอร์โคเนียม จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม และธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมก็แพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วด้วยเช่นกัน ตามรูปที่ 5.59

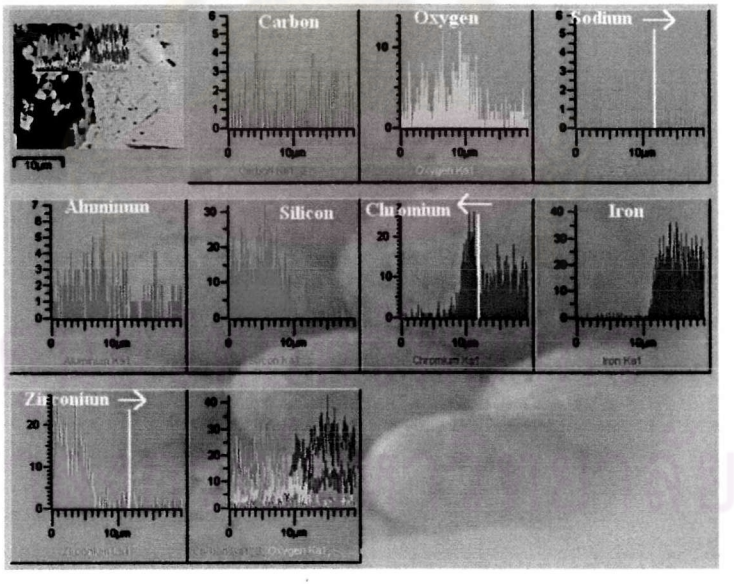
(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ และไม่มีรูพรุนระหว่างรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.60 แต่เกิดรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.61 เมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบว่าธาตุโซเดียม, อะลูมิเนียม และ ซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.62



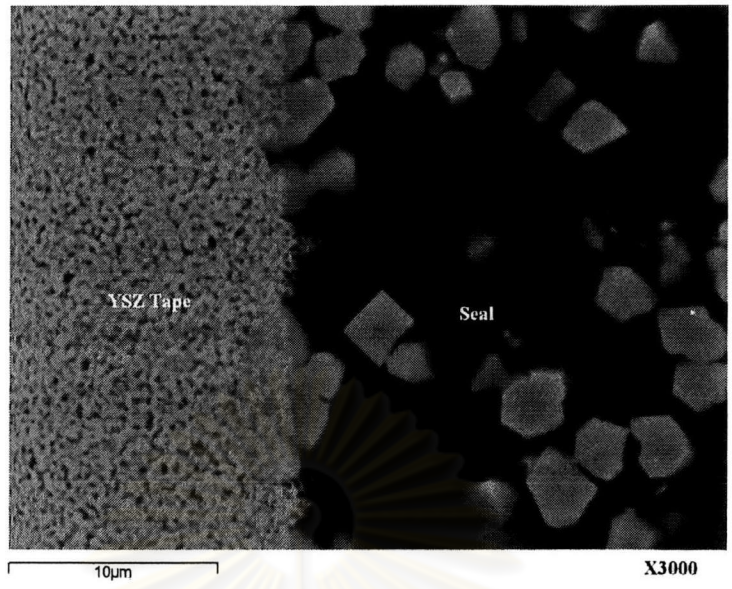
รูปที่ 5.57 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



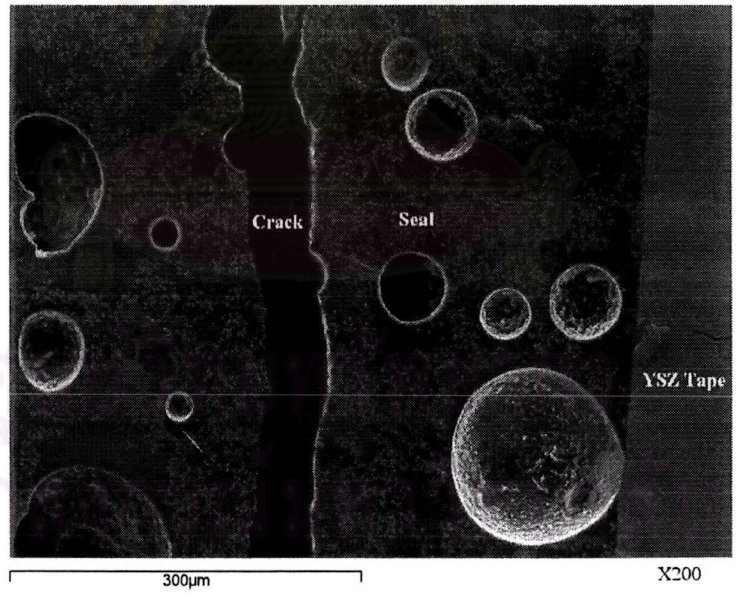
รูปที่ 5.58 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



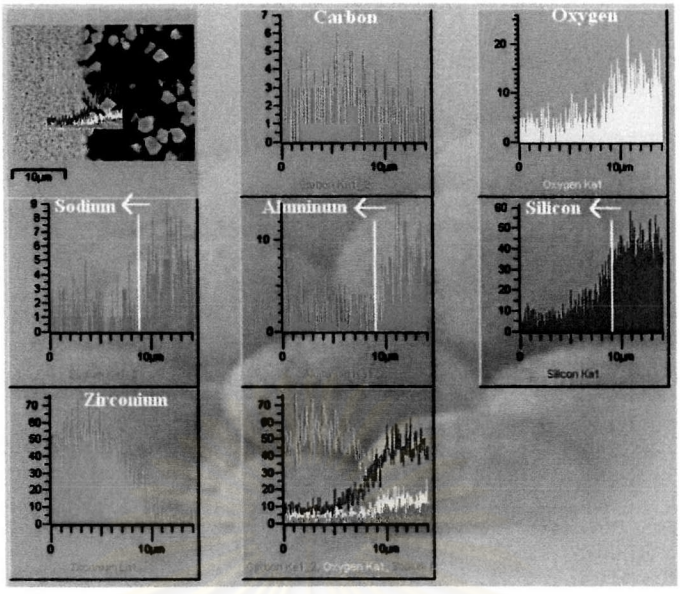
รูปที่ 5.59 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.60 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.61 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



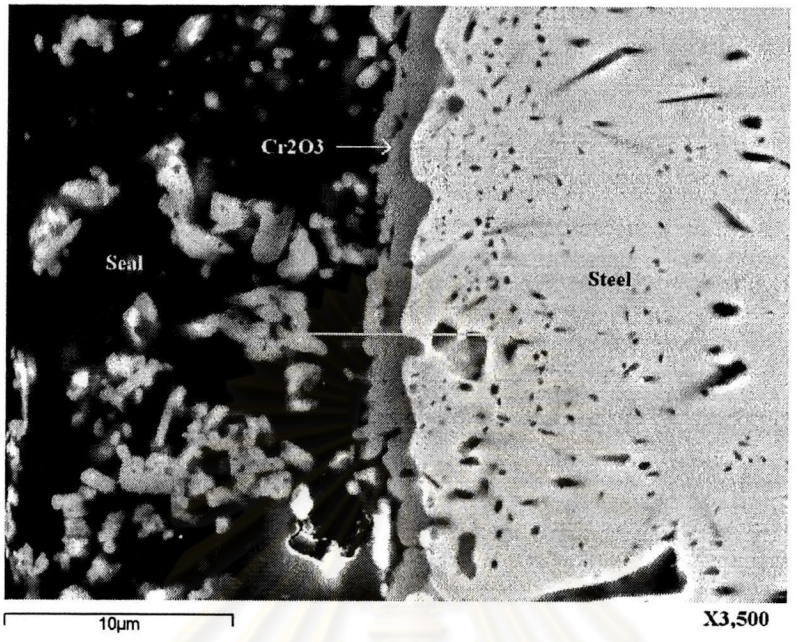
รูปที่ 5.62 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

วัฏจักรความร้อนที่สาม 36 ชั่วโมง

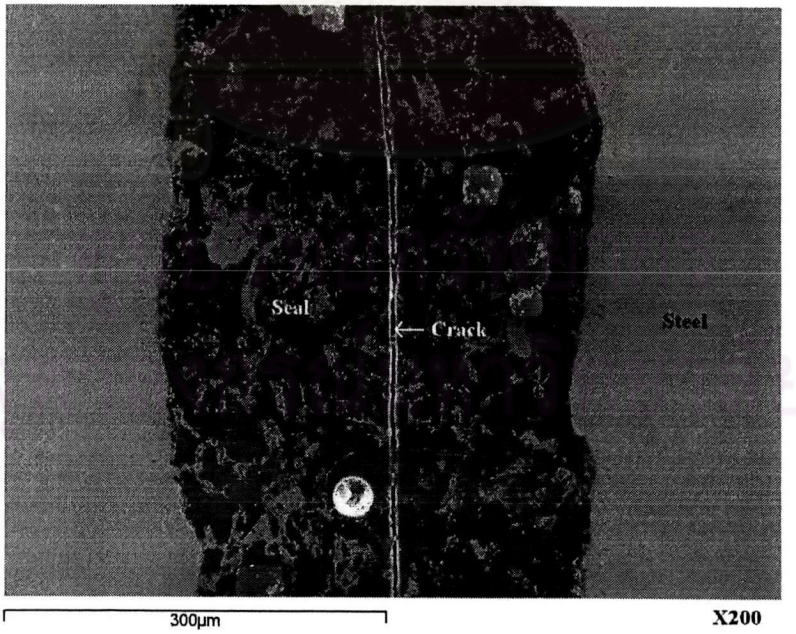
(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการยึดติดกันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เกิดรูพรุนระหว่างโครเมียมออกไซด์กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันตามรูปที่ 5.63 เมื่อสังเกตที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วพบรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.64 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุโครเมียม และแมงกานีสจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วตามรูปที่ 5.65

(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ และไม่พบรูพรุนระหว่างรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.66 แต่เกิดรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.67 เมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบว่าธาตุซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ การที่ธาตุโซเดียม และอะลูมิเนียมหายไป

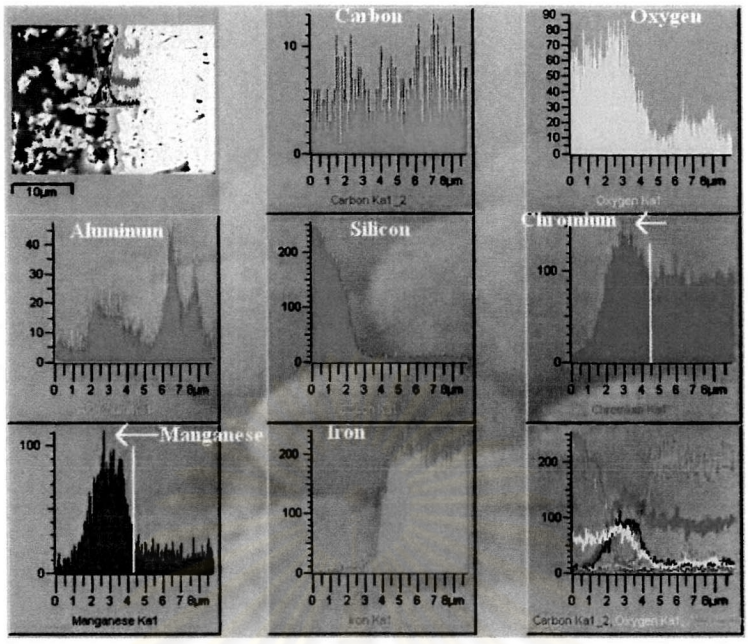
เนื่องจากตำแหน่งที่ทำการสแกนมีอนุภาคของ YSZ ขวางอยู่ที่รอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ จึงมีเฉพาะ ซิลิกอนที่มีปริมาณมากเท่านั้นผ่านไปได้ ตามรูปที่ 5.68



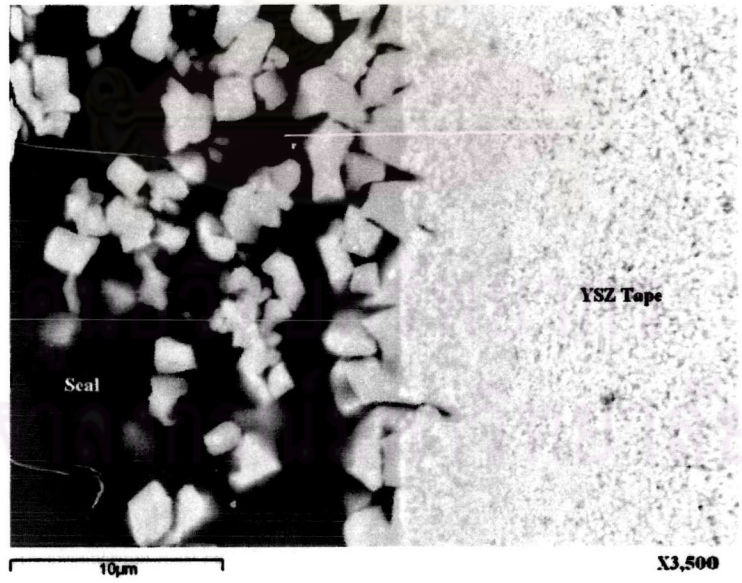
รูปที่ 5.63 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



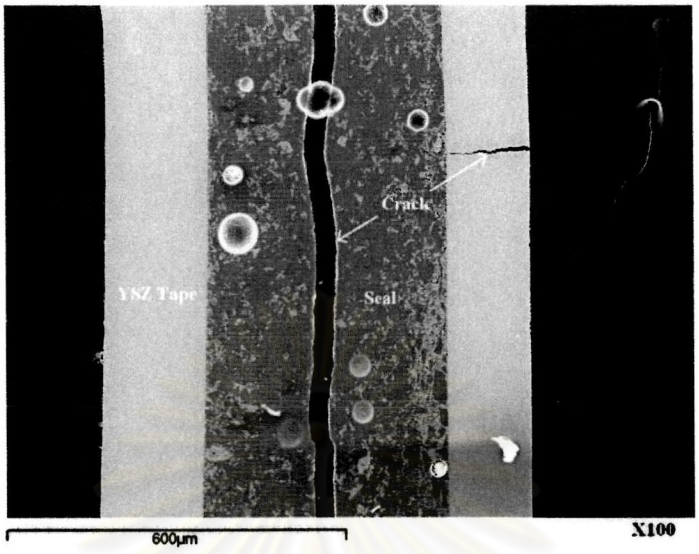
รูปที่ 5.64 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



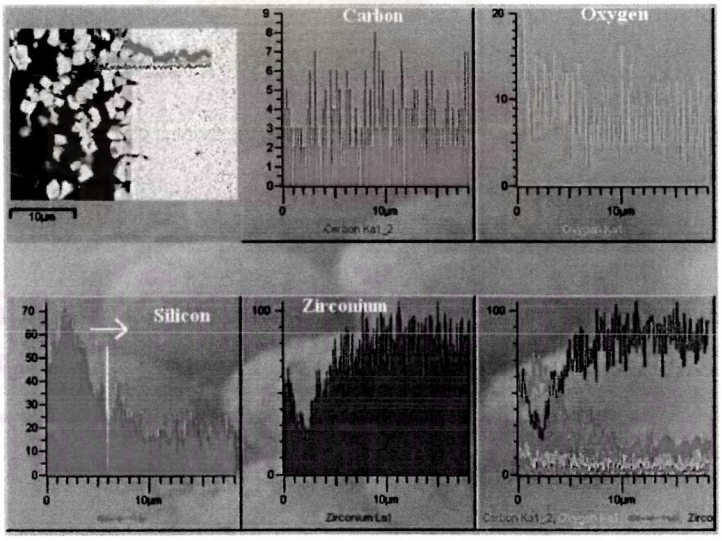
รูปที่ 5.65 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.66 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



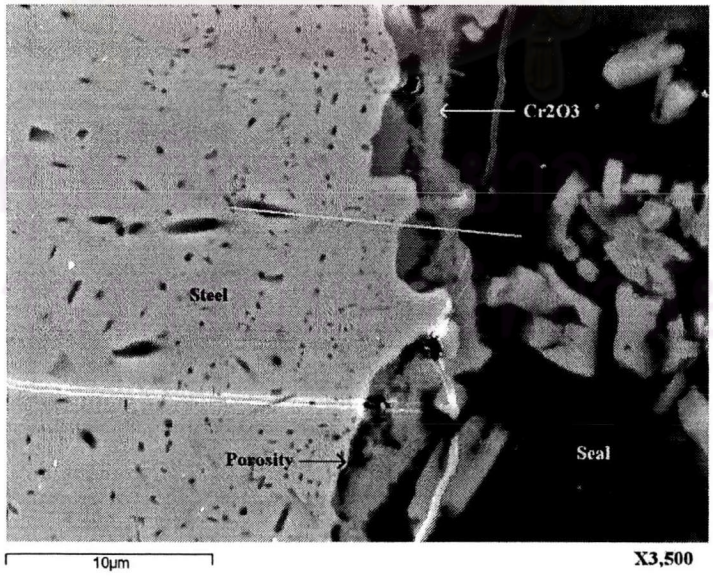
รูปที่ 5.67 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



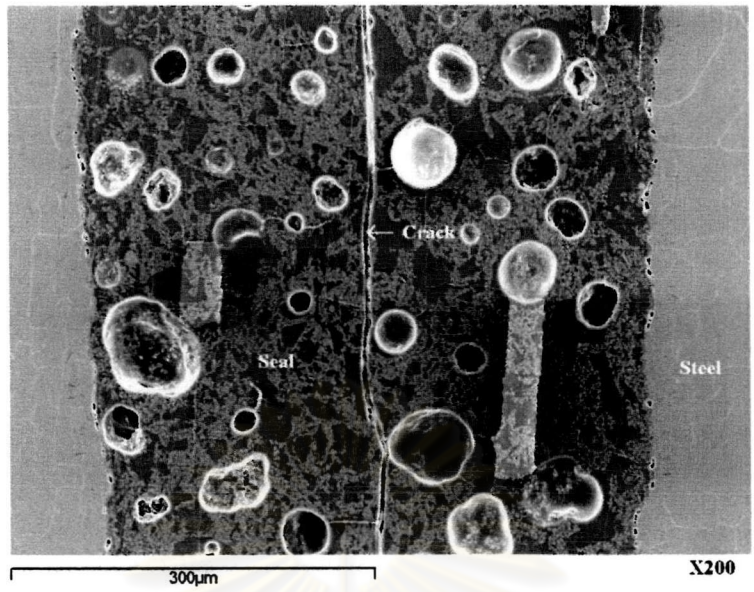
รูปที่ 5.68 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการยึดติดกันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เกิดรูพรุนระหว่างโครเมียมออกไซด์กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันตามรูปที่ 5.69 เมื่อสังเกตที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วพบรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.70 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุโครเมียม และแมงกานีสจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วตามรูปที่ 5.71

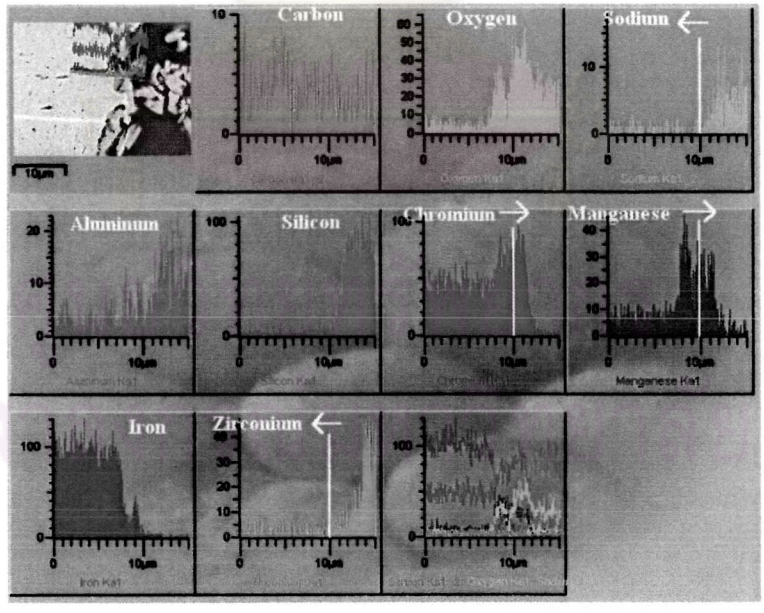
(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดกับแผ่นเทป YSZ ได้ดี และไม่พบรูพรุนที่รอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.72 แต่เกิดรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ เช่นกัน ตามรูปที่ 5.73 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบว่าธาตุ โซเดียม, อะลูมิเนียม และ ซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.74



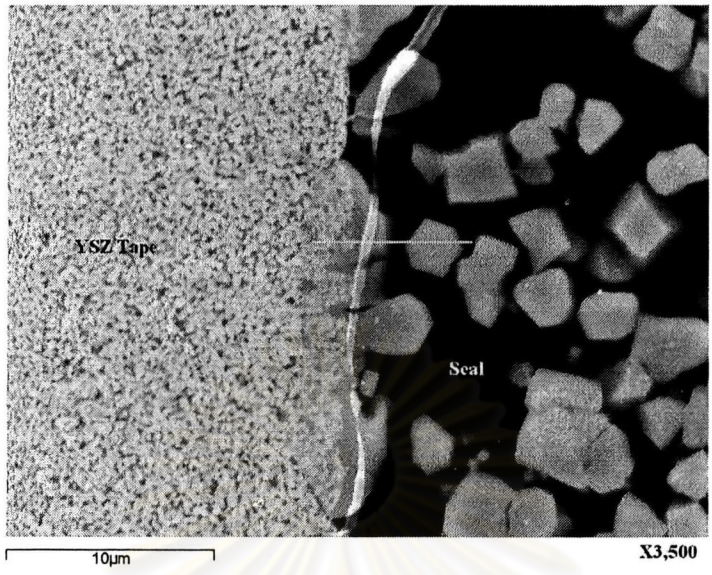
รูปที่ 5.69 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



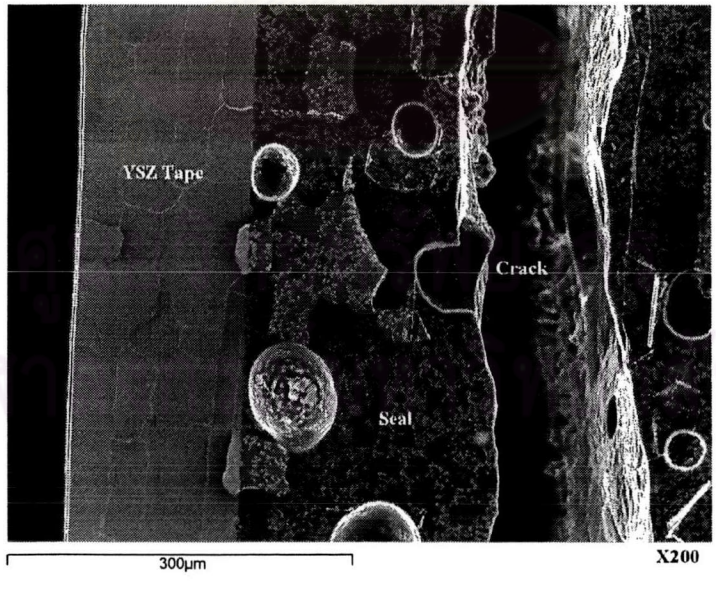
รูปที่ 5.70 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



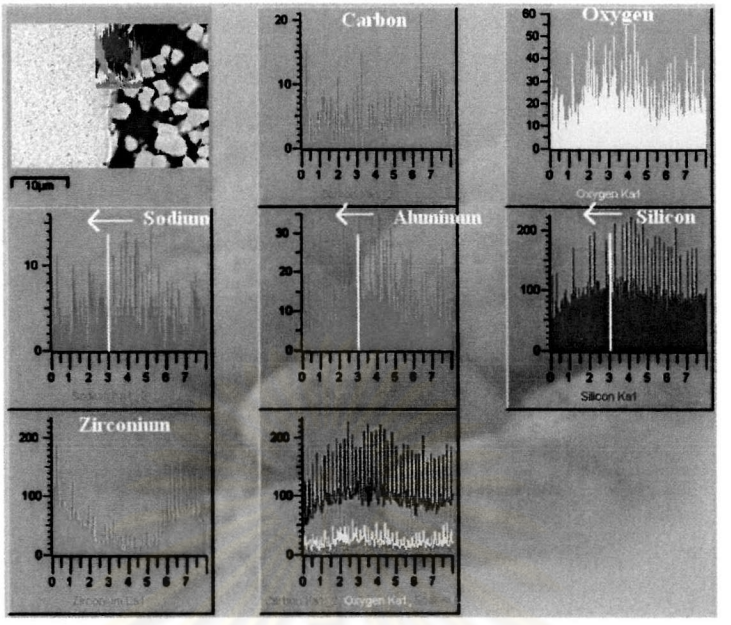
รูปที่ 5.71 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.72 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.73 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่กับแผ่นเทป YSZ และเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



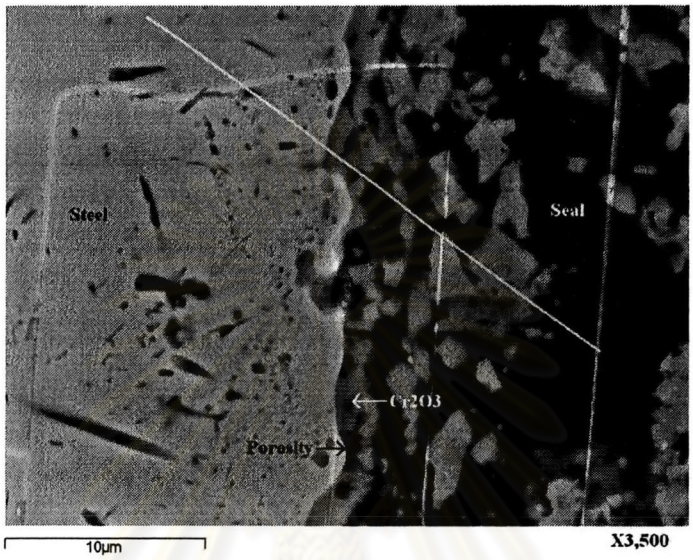
รูปที่ 5.74 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

วัฏจักรความร้อนที่สี่ 48 ชั่วโมง

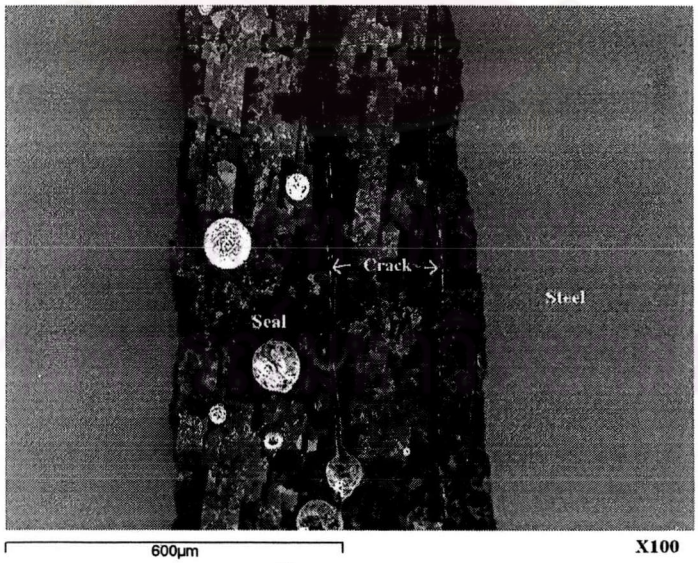
(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยการยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากการยึดติดระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนั้นยังพบรูพรุนที่เกิดจากการแยกออกจากกันระหว่างชั้นของโครเมียมออกไซด์กับผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.75 และพบรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมมากตามรูปที่ 5.76 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าธาตุ เซอร์โคเนียม จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม และธาตุโครเมียมและแมงกานีสจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ตามรูปที่ 5.77

(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ และไม่พบรูพรุนระหว่างรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.78 แต่เกิดรอยแตกที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.79 เมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุ

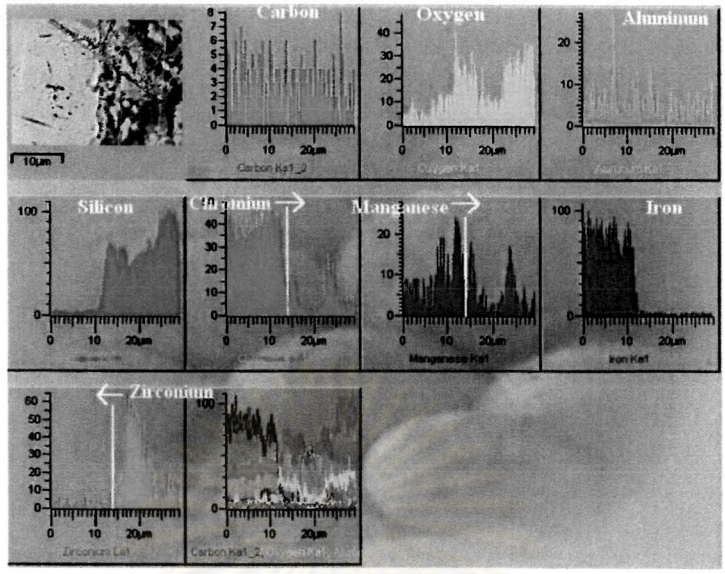
ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบว่าธาตุซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ การที่ธาตุโซเดียม และอะลูมิเนียมหายไปเนื่องจากตำแหน่งที่ทำการสแกนเชิงเส้น (line scan) มีอนุภาคของ YSZ ขวางอยู่ที่รอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ จึงมีเฉพาะ ซิลิกอนที่มีปริมาณมากเท่านั้นผ่านไปได้ ตามรูปที่ 5.80



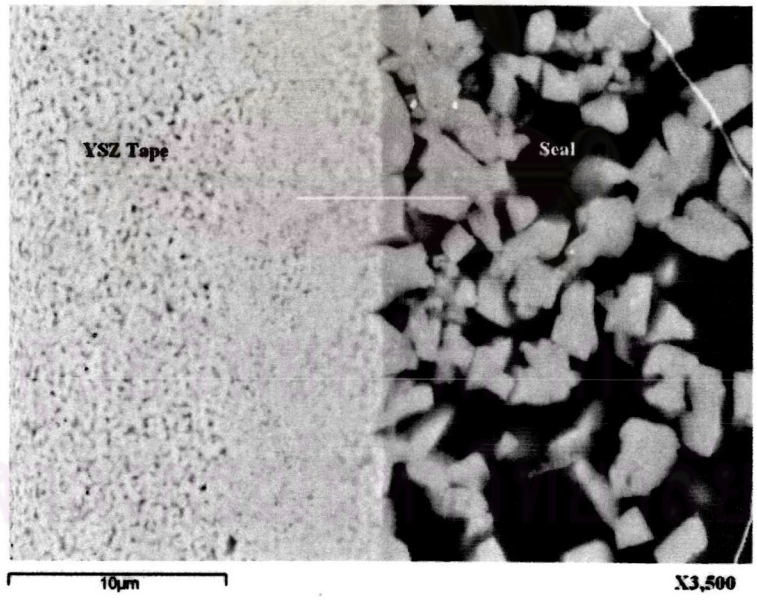
รูปที่ 5.75 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



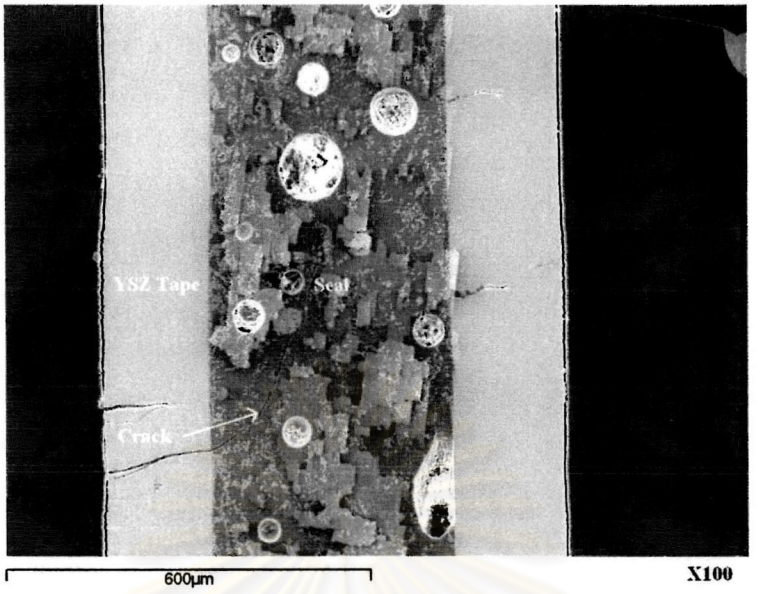
รูปที่ 5.76 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ



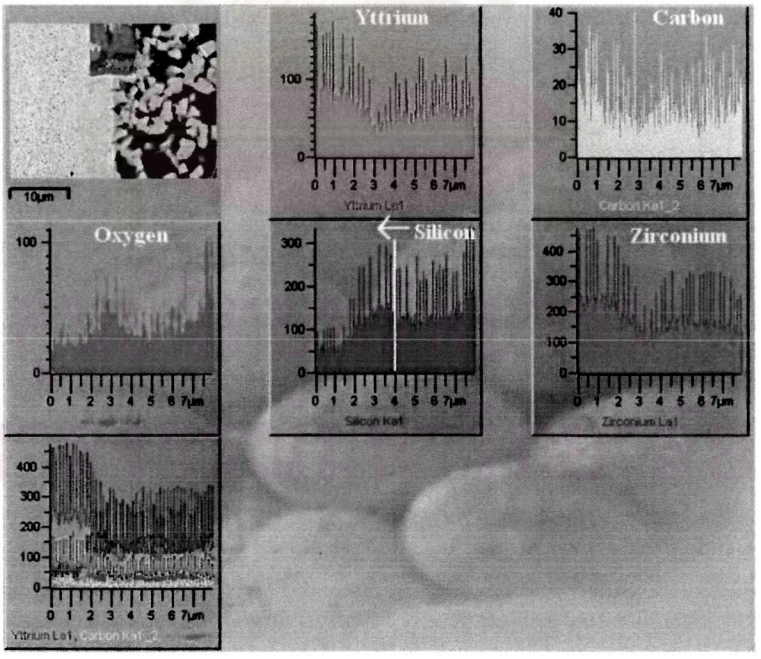
รูปที่ 5.77 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.78 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



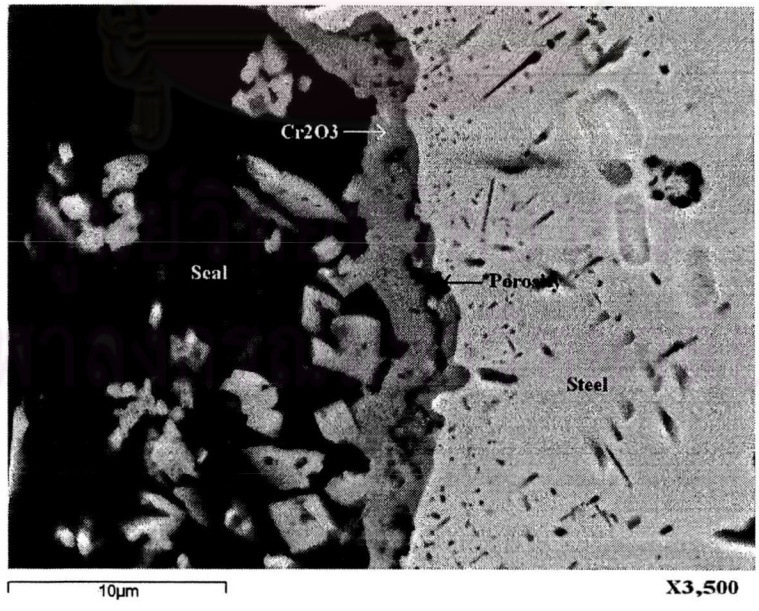
รูปที่ 5.79 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ ที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



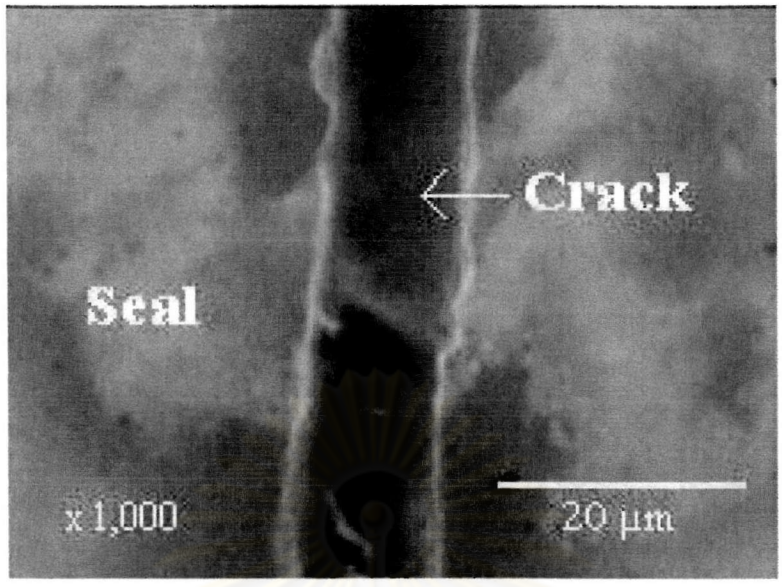
รูปที่ 5.80 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการยึดติดกันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เกิดรูพรุนระหว่างโครเมียมออกไซด์กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันตามรูปที่ 5.81 เมื่อสังเกตที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วพบรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.82 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุโซเดียม และเซอร์โคเนียม จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม และธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ตามรูปที่ 5.83 การที่ธาตุแมงกานีสหายไปอาจเป็นเพระตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบมีปริมาณธาตุแมงกานีสน้อย

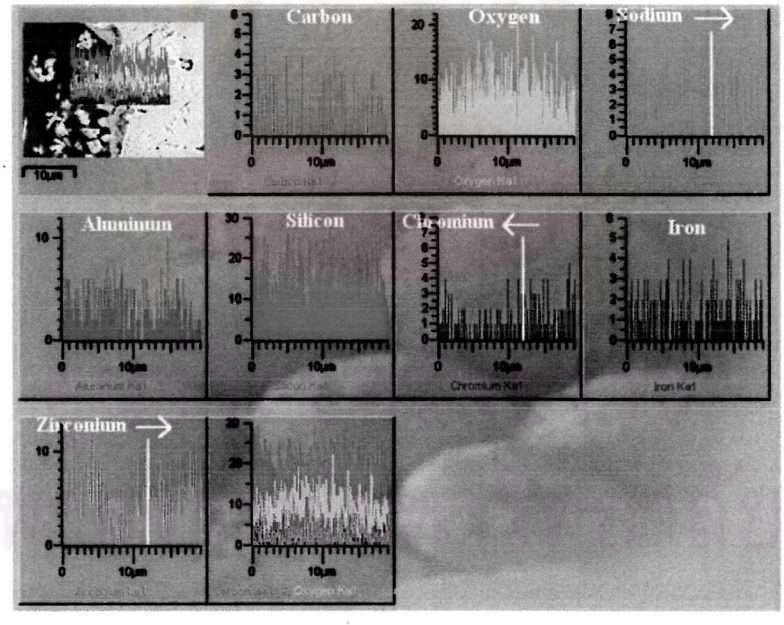
(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ และไม่พบรูพรุนระหว่างรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.84 และไม่มีรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแต่มีรอยแตกที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ การที่แผ่นเทป YSZ แตกเนื่องจากมีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วตามรูปที่ 5.85 และเมื่อพิจารณาการรั่วที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบธาตุ โซเดียม, อะลูมิเนียม และซิลิกอนแพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.86



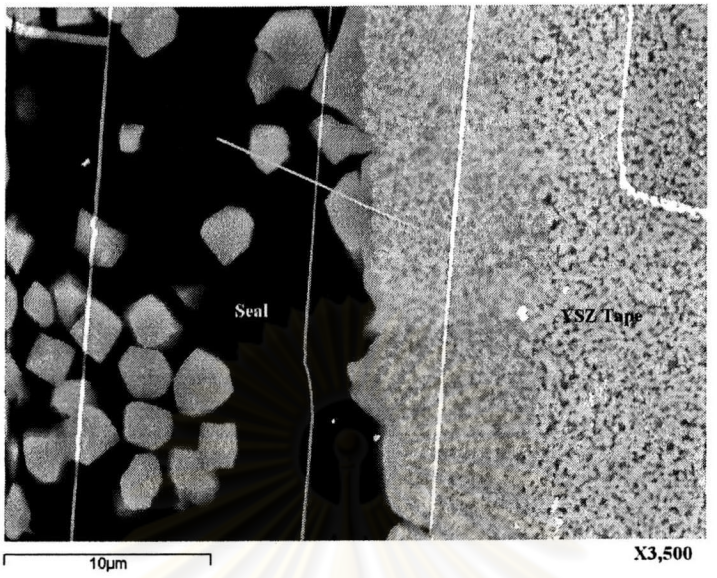
รูปที่ 5.81 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



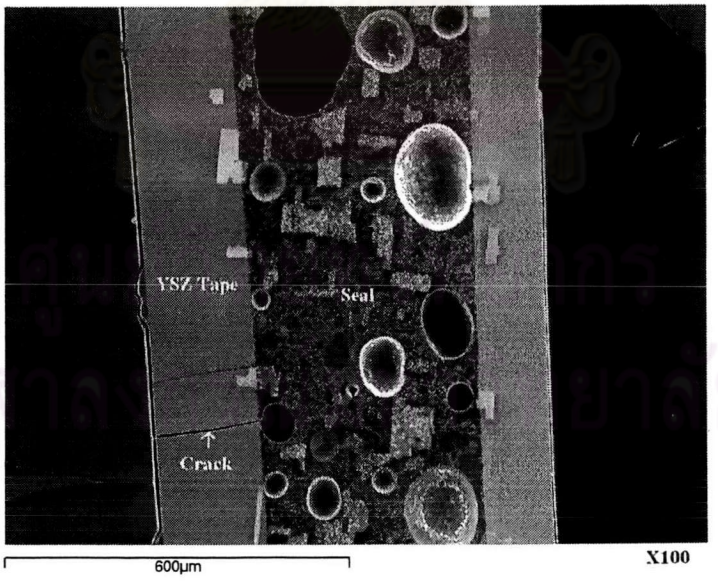
รูปที่ 5.82 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของรอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



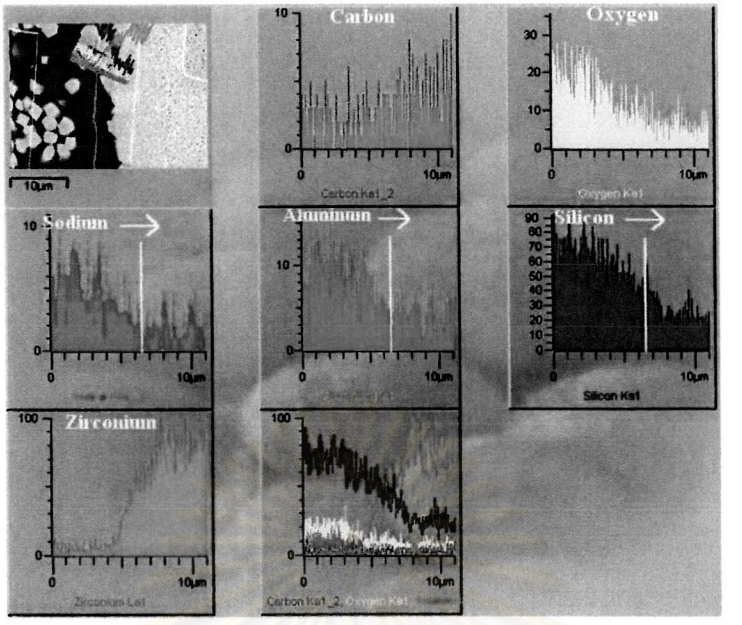
รูปที่ 5.83 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.84 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.85 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ ที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



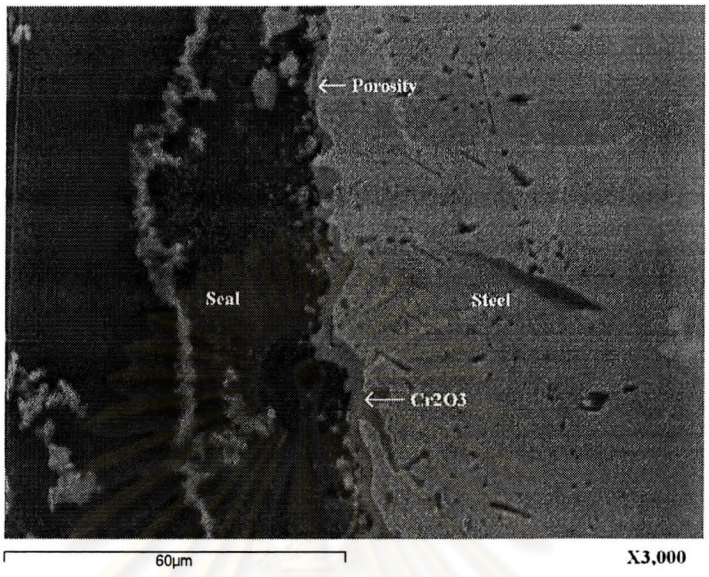
รูปที่ 5.86 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

วัฏจักรความร้อนที่ห้า 60 ชั่วโมง

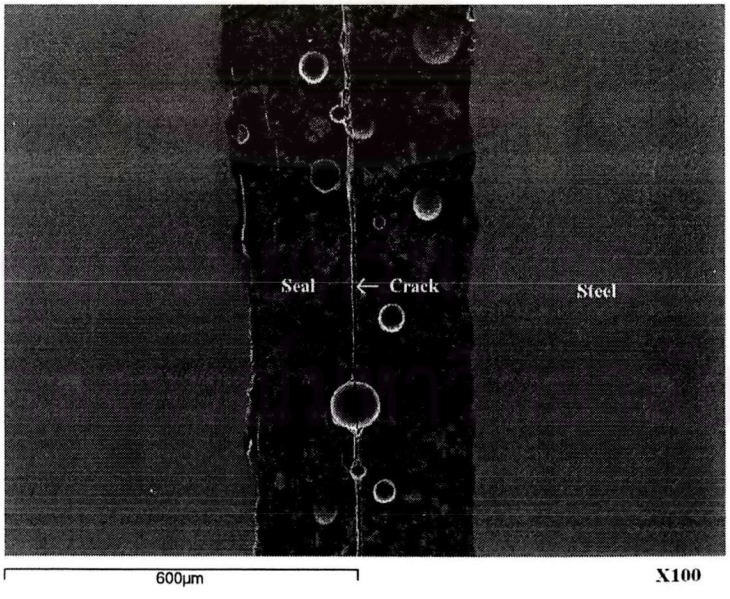
(1) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วยังคงสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการยึดติดกันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดรูพรุนระหว่างโครเมียมออกไซด์กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันตามรูปที่ 5.87 เมื่อสังเกตที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วพบรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.88 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุโครเมียม และแมงกานีสจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วตามรูปที่ 5.89

(2) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ และไม่พบรูพรุนที่รอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.90 แต่มีรอยแตกที่แผ่นเทป YSZ โดยไม่มีรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ การที่แผ่นเทป YSZ แตกเนื่องจากมีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วตามรูปที่ 5.91 และเมื่อพิจารณาการ

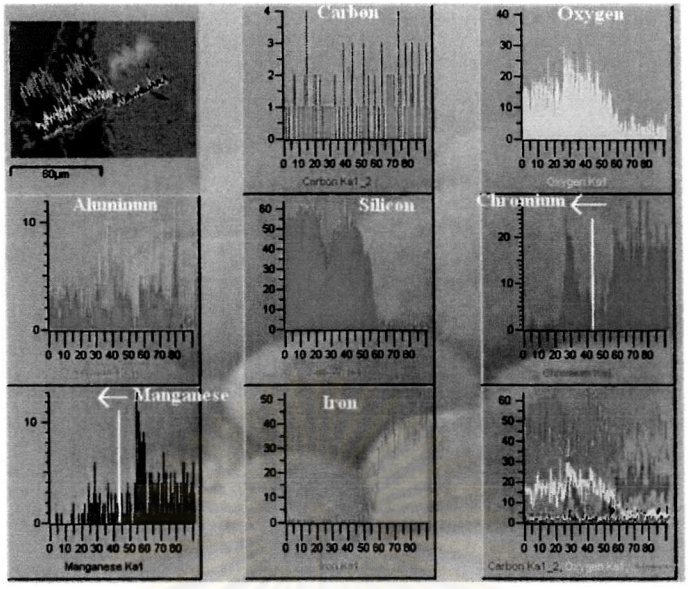
แพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบธาตุโซเดียม, อะลูมิเนียม, เหล็ก และซิลิกอนแพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.92



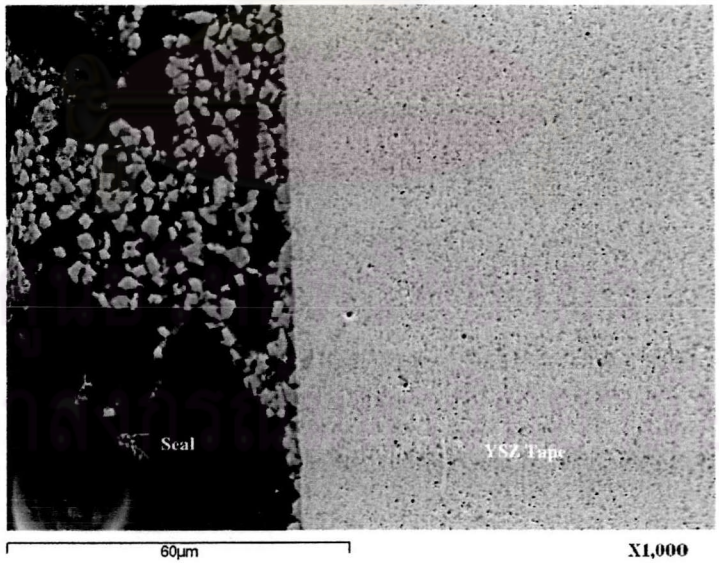
รูปที่ 5.87 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



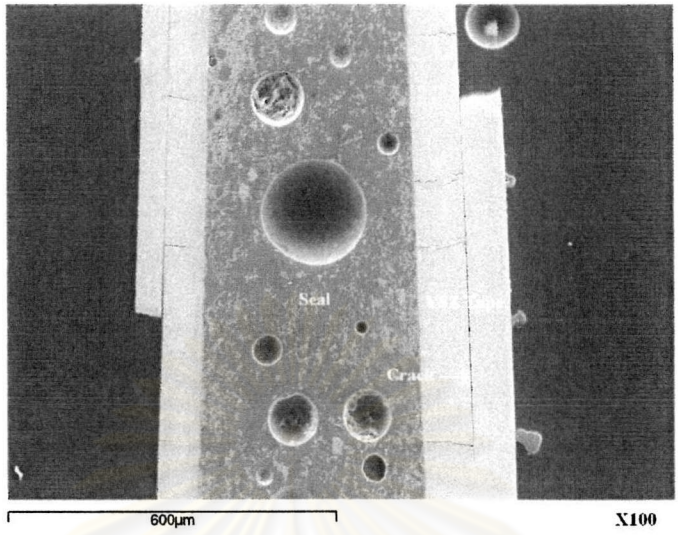
รูปที่ 5.88 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



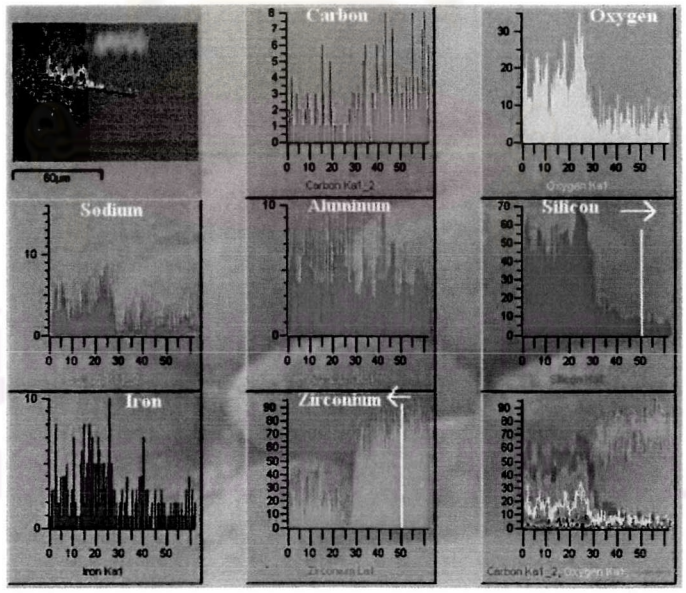
รูปที่ 5.89 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.90 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้า เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

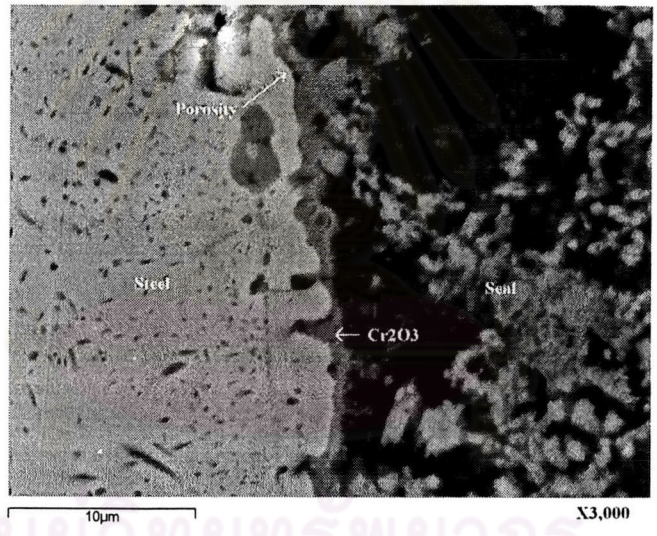


รูปที่ 5.91 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ ที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



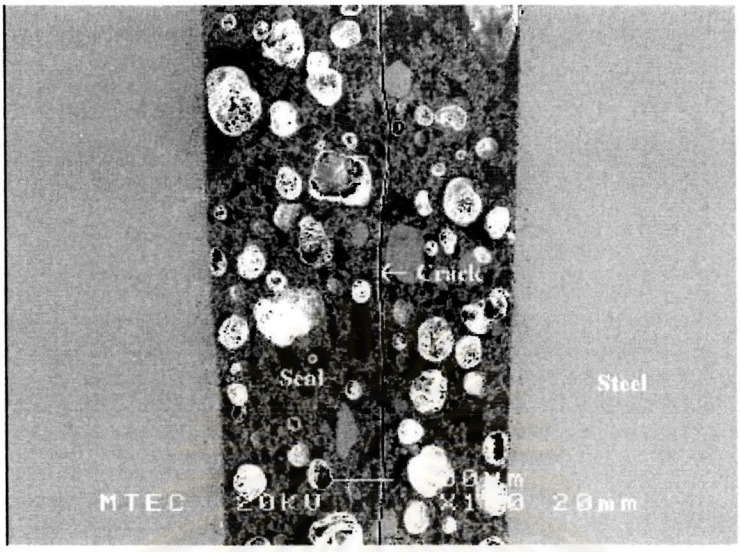
รูปที่ 5.92 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

(3) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ พบว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการยึดติดกันระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับโครเมียมออกไซด์ที่เกิดบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เกิดรูพรุนระหว่างโครเมียมออกไซด์กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่างกันตามรูปที่ 5.93 เมื่อสังเกตที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่วพบรอยแตกผ่านกลางวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมตามรูปที่ 5.94 และเมื่อพิจารณาการแพร่ของธาตุที่บริเวณรอยต่อระหว่างระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าธาตุเซอร์โคเนียม จากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแพร่เข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม และธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว ตามรูปที่ 5.95 การที่ธาตุแมงกานีสหายไปอาจเป็นเพราะตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบมีปริมาณธาตุแมงกานีสน้อย

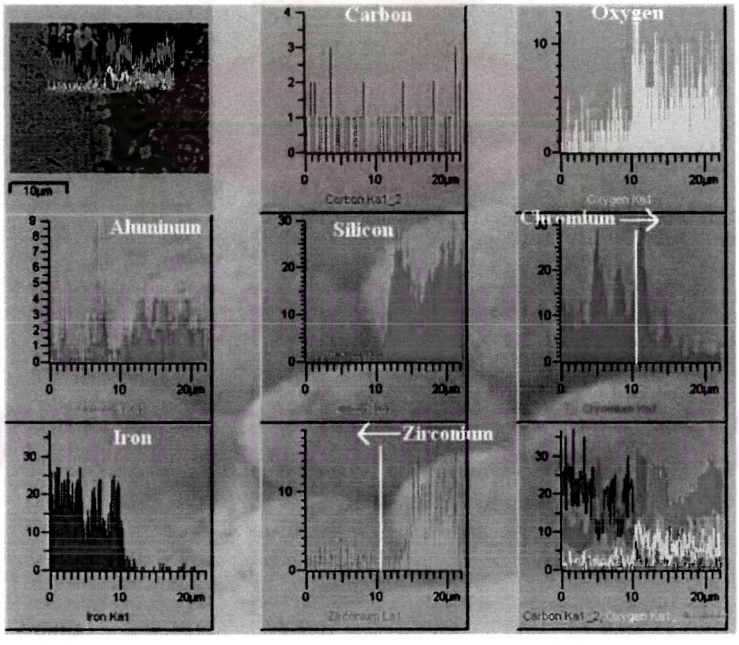


รูปที่ 5.93 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

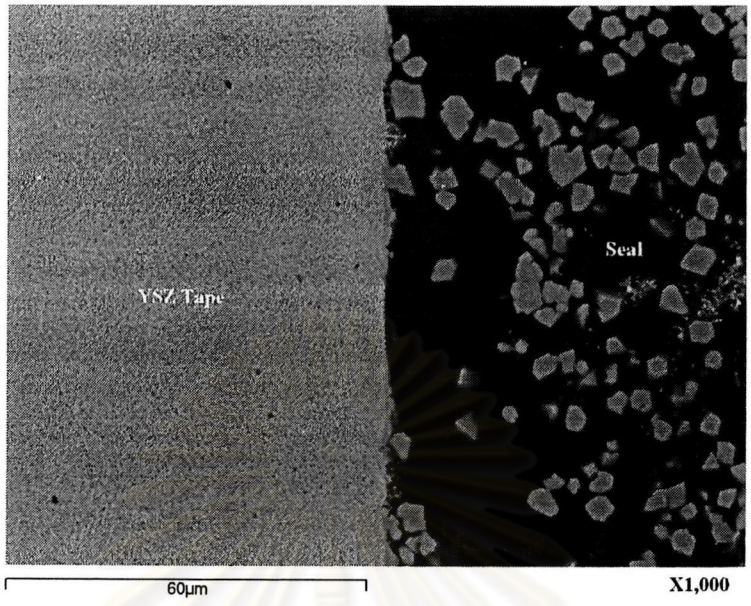
(4) วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสามารถยึดติดได้ดีกับแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.96 แต่พบรอยแตกที่วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว และที่แผ่นเทป YSZ เนื่องจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างจากแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.97 และเมื่อพิจารณาการรั่วที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วกับแผ่นเทป YSZ พบธาตุ โซเดียม, อะลูมิเนียม และซิลิกอน แพร่เข้าไปในรูพรุนของแผ่นเทป YSZ ตามรูปที่ 5.98



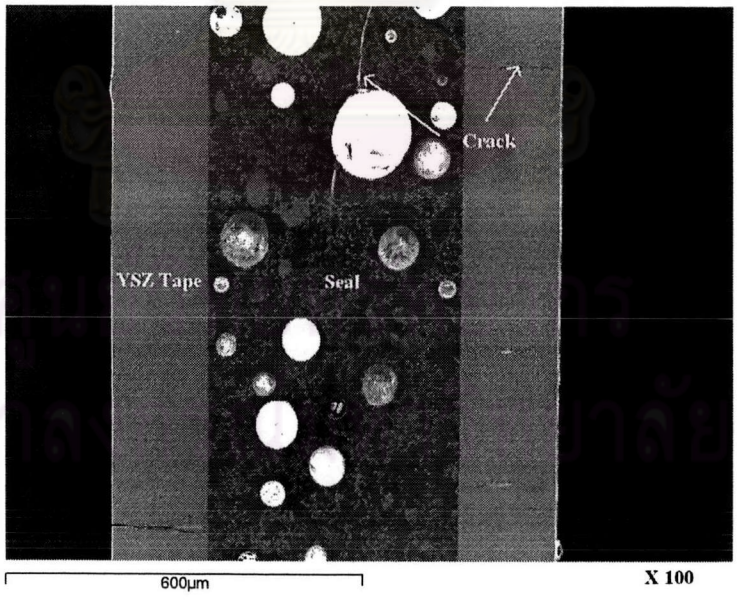
รูปที่ 5.94 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ



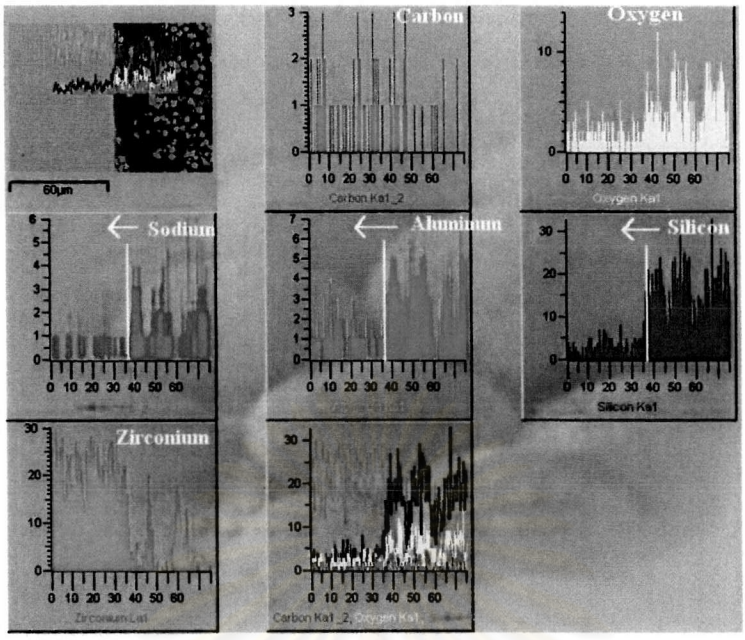
รูปที่ 5.95 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.96 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้า เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.97 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 และแผ่นเทป YSZ ที่ประกบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ



รูปที่ 5.98 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

จากผลการทดสอบการยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมและแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ทั้งหมด 5 วัฏจักร สรุปรวมไว้ในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 สรุปผลรวมการยึดติด ลักษณะโครงสร้าง และการแพร่ของธาตุ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนของ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมและแผ่นเทป YSZ

สาร	วัฏจักรที่ 1	วัฏจักรที่ 2	วัฏจักรที่ 3	วัฏจักรที่ 4	วัฏจักรที่ 5
สูตรที่ 1 กับ SS	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Zr → ← Cr	ยึดติดดี เกิดรอยแตก ← Cr , Mn	ยึดติดดี เกิดรอยแตก ← Cr , Mn	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Zr → ← Cr , Mn	ยึดติดดี เกิดรอยแตก ← Cr , Mn
สูตรที่ 1 กับ YSZ	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Fe , Si →

ตารางที่ 5.11 (ต่อ)

สาร	วัฏจักรที่ 1	วัฏจักรที่ 2	วัฏจักรที่ 3	วัฏจักรที่ 4	วัฏจักรที่ 5
สูตรที่ 5 กับ SS	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Zr → ← Cr	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Zr → ← Cr	ยึดติดดี เกิดรอยแตก ← Cr , Mn	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Zr → ← Cr	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Zr → ← Cr
สูตรที่ 5 กับ YSZ	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Si →	ยึดติดดี เกิดรอยแตก Na , Al , Si →

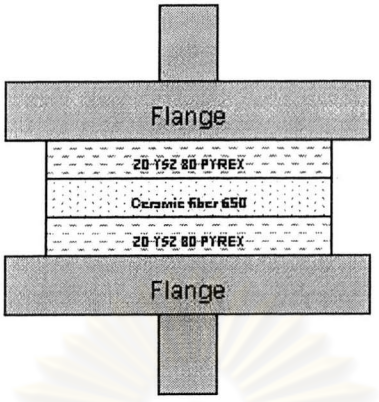
หมายเหตุ "⟶ " เกิดการแพร่ของธาตุจากวัสดุป้องกันแก๊สรั่วเข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม หรือที่แผ่นเทป YSZ

"← " เกิดการแพร่ของธาตุจากเหล็กกล้าไร้สนิม หรือจากแผ่นเทป YSZ เข้าไปในวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว

5.2.1.7 การทดสอบการรั่วของวัสดุป้องกันการรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบโดยใช้วัสดุป้องกันการรั่วสูตรที่ 1 กับเส้นใยเซรามิก 650 ที่อุณหภูมิ 800°C

สาเหตุที่เลือกใช้วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 เนื่องจากสามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม และเพลเล็ตของ YSZ โดยออกแบบการป้องกันการรั่วของแก๊สออกเป็น 2 ลักษณะ

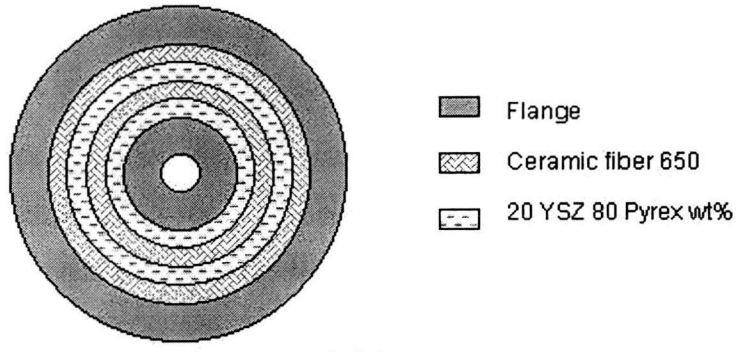
(1) แบบที่1 ใช้เส้นใยเซรามิก 650 เป็นวัสดุป้องกันแก๊สรั่วหลัก และใช้วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 เป็นอินเตอร์เลเยอร์ ตามรูปที่ 5.99 พบว่าอัตราการรั่วของแก๊สมีค่า 7.3512×10^{-2} cm^3 / min . cm ซึ่งมีอัตราการรั่วสูงมากกว่าการใช้วัสดุป้องกันการรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 ประมาณ 100 เท่า เนื่องจากแก๊สรั่วออกทางเส้นใยเซรามิก ตามรูปที่ 5.100



รูปที่ 5.99 ลักษณะของวัสดุป้องกันการรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบโดยใช้วัสดุป้องกันการรั่วสูตรที่ 1 กับเส้นใยเซรามิก 650 แบบที่ 1

รูปที่ 5.100 ภาพถ่าย SEM ด้านบนแสดงการรั่วของแก๊สผ่านทางเส้นใยเซรามิกขณะทำการทดสอบการรั่วของ แก๊สที่อุณหภูมิ 800°C ในอากาศ

(2) แบบที่ 2 ใช้เส้นใยเซรามิก 650 ร่วมกับใช้วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 โดยเรียงสลับกันเป็นวงระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิด ตามรูปที่ 5.101 พบว่าอัตราการรั่วเป็นไปตามตารางที่ 5.12

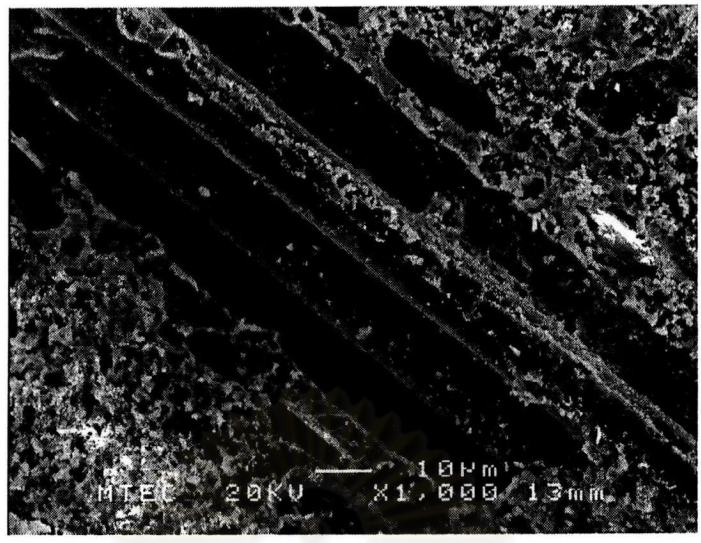


รูปที่ 5.101 ลักษณะของวัสดุป้องกันการรั่วแบบวัสดุผสมโดยใช้วัสดุป้องกันการรั่วสูตรที่ 1 กับเส้นใยเซรามิก 650 แบบที่ 2

ตารางที่ 5.12 การรั่วของแก๊สของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบแบบที่ 2

วัฏจักรความร้อน	อัตราการรั่วของแก๊ส $\times 10^{-4}$ (cm^3 / min . cm)
1	3.8384
2	3.3482
3	2.9762

พบว่าอัตราการรั่วของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบที่สองเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน 3 วัฏจักรความร้อน มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะว่าวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยเซรามิกซึ่งเป็นทางรั่วของแก๊สตามรูปที่ 5.102 ข้อดีของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบที่ 2 คือ ช่วยลดความเค้นที่เกิดจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่างวัสดุป้องกันการรั่วแบบยึดติดกับส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง วัสดุป้องกันการรั่วของแก๊สแบบที่ 2 นี้เป็นการใช้ระบบป้องกันการรั่วแบบยึดติดร่วมกับระบบการป้องกันการรั่วแบบสไลด์ (sliding seal) โดยพื้นที่วัสดุป้องกันการรั่วยึดติดกับวัสดุที่ทำการทดสอบการรั่วลดลง โดยส่วนที่เหลือเป็นเส้นใยเซรามิก ค่าอัตราการรั่วของแก๊สยังคงมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อใช้วัสดุป้องกันการรั่วแบบยึดติดอย่างเดียว และมีอัตราการรั่วใกล้เคียงกับการป้องกันการรั่วของแก๊สแบบไฮบริด [3] เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วที่เท่ากัน



รูปที่ 5.102 ภาพถ่าย SEM ลักษะด้านบนของวัสดุป้องกันการรั่วของแก๊สสูตรที่ 1 เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยเซรามิกขณะทำการทดสอบการรั่วของแก๊สที่อุณภูมิ 800°C ในอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย