

การจำลองการคืนสภาพแบบแพสซีฟที่ควบคุมไม่ได้ของตัวกรองมลพิษอนุภาค Simulation of Uncontrolled Passive Regeneration of Diesel Particulate Filter

วิวรรณ คงทรัพย์¹ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย^{1,*}

¹ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

*e-mail: fengeka@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้แสดงถึงการออกซิไดซ์มลพิษอนุภาค (Particulate Matters, PM) ในตัวกรองมลพิษอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) ควบคู่กับดีเซลออกซิเดชันแคทาลิสต์ (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) ด้วยวิธีคืนสภาพแบบแพสซีฟ (Passive Regeneration) ซึ่งใช้ O_2 , NO_2 หรือ NO_2 และ O_2 ในการออกซิไดซ์กับ PM ใน DPF แบบต่างๆ ได้แก่ DPF แบบไม่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (DPF), DPF แบบเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (CDPF), แบบ CRT (DOC+DPF) และ CCRT (DOC+CDPF) งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการคืนสภาพเช่น อุณหภูมิทางเข้าอุปกรณ์, ปริมาณออกซิเจน (O_2), ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) รวมถึงสัดส่วนของ NO_2 ต่อ NO_x เป็นต้น เพื่อระบุตัวแปรที่สำคัญต่อการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการคืนสภาพแบบควบคุมไม่ได้ของ DPF อันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอุปกรณ์ เช่น การหลอมละลาย หรือการแตกหัก

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายเหล่านี้ในห้องปฏิบัติการและลดความยุ่งยากของการทดสอบ DPF หลายตัว ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม AVL-BOOST เพื่อแสดงแผนผังแสดงการทำงานของตัวกรองมลพิษอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซล และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 4 แบบตามที่กล่าวข้างต้น จากผลการจำลองพบว่า การออกซิไดซ์ PM ใน CDPF และ CCRT จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าใน DPF และ CRT การออกซิไดซ์ PM โดยการใช้น้ำ NO_2 และ O_2 มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้น้ำ NO_2 เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ อุณหภูมิ, ปริมาณของ NO_2 และอัตราส่วนของ $NO_2 : NO_x$ จะส่งผลต่อการเกิดการคืนสภาพแบบแพสซีฟที่ควบคุมไม่ได้โดยตรง

คำหลัก: ตัวกรองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล, การคืนสภาพแบบแพสซีฟ, การคืนสภาพแบบควบคุมไม่ได้

Abstract

This current study demonstrates PM oxidations in Diesel Particulate Filter (DPF) coupled to Diesel Oxidation Catalyst (DOC) by using passive regeneration. This technique relies on O_2 , NO_2 or NO_2 and O_2 oxidizing PM in four kinds of DPF setup: Non-catalytic coating DPF (DPF), Catalytic coating DPF (CDPF), CRT (DOC+DPF), and CCRT (DOC+CDPF). The performance of PM reduction in each setup depends on the inlet temperature, O_2 and NO_x amount, and the ratio of NO_2 to NO_x . The main focus of this study is to identify important parameters for avoiding damages to DPF such as melting and cracking in uncontrolled passive regeneration.

To avoiding these damages and reducing costs on DPF samples, the current study is done by using AVL-BOOST, a simulation tool for predicting exhaust gas aftertreatment performance of four DPF setups. Results indicate that oxidation temperatures of CDPF and CCRT are lower than those of DPF and CRT. Using NO_2 and O_2 to oxidize PM yields better performance than using NO_2 only. Additionally, temperature, NO_2 amounts, and ratio of NO_2 to NO_x affects uncontrolled passive regeneration directly.

Keywords: Diesel Particulate Filter, Passive Regeneration, Uncontrolled Regeneration

1. บทนำ

ตัวกรองมลพิษอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) เป็นอุปกรณ์ลดไอเสียประเภทมลพิษอนุภาค ซึ่งเทคโนโลยีนี้ถูกคิดค้นขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1980 และได้ทำการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปัจจุบัน โดยอุปกรณ์นี้ได้รับการยอมรับว่าสามารถลดมลพิษอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซลได้ถึง 95% หลักการทำงานของตัวกรองมลพิษอนุภาคแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การกรองโดยไหลผ่านผนังที่มีรูพรุน (Porous Wall) และส่วนที่สองคือ การคืนสภาพ (Regeneration) โดยการขจัดมลพิษอนุภาคออกจากตัวกรองมลพิษอนุภาค วิธีขจัดมลพิษอนุภาคแบ่ง 2 วิธี คือวิธีแรกเป็นแบบ Active Regeneration เป็นการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียให้สูงถึงจุดที่มลพิษอนุภาคเกิดการสันดาป มีทั้งที่ใช้อุปกรณ์ภายนอกหรือการใช้การจัดการกับเครื่องยนต์ ส่วนวิธีที่สองเป็นแบบ Passive Regeneration คือ การลดอุณหภูมิในการสันดาปของมลพิษอนุภาคและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [1]

ในงานวิจัยนี้เราศึกษาการลดมลพิษอนุภาคโดยใช้อุปกรณ์ลดไอเสียแบบตัวกรองลดมลพิษอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) โดยวิธีแบบ Passive Regeneration ที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Filter Coating) โดยนำแบบจำลองจากงานวิจัยของ [2] มาประยุกต์ใช้กับพารามิเตอร์ของ [3, 4, 5] เพื่อทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสมกับการทำงานของระบบเช่น อุณหภูมิทางเข้าของอุปกรณ์

ลดมลพิษอนุภาค ปริมาณมลพิษอนุภาคเป็นต้น เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการคืนสภาพแบบควบคุมไม่ได้ของอุปกรณ์ลดมลพิษอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซล

2. แบบจำลอง

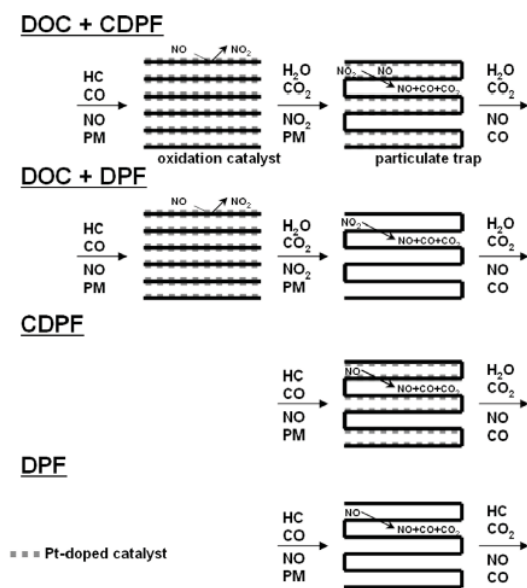
2.1 แบบจำลองอุปกรณ์ลดมลพิษอนุภาค

โปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรมชื่อ AVL-BOOST เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์รวมไปถึงอุปกรณ์ลดก๊าซไอเสีย รูปแบบการทำงานจะเป็นการนำแบบจำลองอุปกรณ์มาเชื่อมต่อกัน ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ในระบบ เช่น ทิศทางของของไหล ความดัน อุณหภูมิ ปริมาณมลพิษแต่ละชนิด อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เนื่องจาก AVL-BOOST เป็นโปรแกรมจำลองเครื่องยนต์แบบ 1 มิติ ซึ่งการคำนวณคุณสมบัติของก๊าซจะขึ้นกับ 1 ทิศทาง ส่งผลให้การจำลองเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ประหยัดต้นทุน ไม่ว่าจะป็นทั้งด้านเวลา แรงงาน และค่าใช้จ่ายอย่างมาก รวมถึงตัวโปรแกรมยังเอื้อให้กับการทำงานวิจัยที่มีความเสี่ยงสูงที่อาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์และผู้ทดสอบได้ [9]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแบบจำลอง DPF ในโปรแกรม AVL-BOOST มาศึกษาพฤติกรรมการทำงานของ DPF ในการคืนสภาพแบบ Passive โดยการใช้ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในการออกซิไดซ์กับเขม่าอนุภาค แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และไม่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalyst) เคลือบ DPF ในเทคนิคนี้สามารถติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของดีเซล (Diesel Oxidation Catalyst: DOC) ที่ด้านหน้าของ DPF เพื่อทำการเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) เป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) เมื่อใช้ NO₂ เป็นตัวสันดาปทำให้อุณหภูมิในการสันดาปของเขม่าจะลดลงอยู่ในช่วง 200 - 450 °C เทคโนโลยีนี้ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกเกิดขึ้นครั้งแรกโดยบริษัท Johnson Matthey Inc. สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของเทคโนโลยีการดักจับการคืนสภาพอย่างต่อเนื่อง (Continuously Regenerating Trap: CRT) หรือการดักจับการคืนสภาพอย่างต่อเนื่องเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalyzed Continuously Regenerating Trap: CCRT) โดยระบบนี้ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ของ DPF (CDPF หรือเรียกว่า Catalytic Soot Filter: CSF) เนื่องจากเทคโนโลยีขึ้นอยู่กับการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเหมาะสำหรับน้ำมันดีเซลกำมะถันต่ำ (<10ppm) [6, 7]

แบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้มี 4 แบบ คือ DPF แบบไม่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (DPF), DPF แบบเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (CDPF), แบบ CRT (DOC+DPF) และแบบ CCRT (DOC+CDPF) ได้แสดงดังรูปที่ 1 [3]



รูปที่ 1 แผนภาพการศึกษาระบบการกรองของเขม่า

2.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีในการคืนสภาพ DPF

เขม่าอนุภาคจะออกซิไดซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C หรือในกรณีที่แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Pt-doped) อนุภาคจะออกซิไดซ์ประมาณ 450 °C อีกประการหนึ่งคือทำการออกซิไดซ์กับ NO₂ ซึ่งมีนัยสำคัญกับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 150 °C การสันดาปโดย NO₂ สามารถทำได้ทั้ง 2 ปฏิกิริยาคือใช้ NO₂ อย่างเดียวหรือใช้ NO₂ ร่วมกับ O₂ โดยทั้ง 2 ปฏิกิริยาได้ CO หรือ CO₂ ส่วนในกรณีของ NO₂ + O₂ ออกซิไดซ์เขม่าอนุภาคได้เร็วกว่าผลรวมของอัตราการออกซิไดซ์โดย NO₂ และ O₂ อย่างเดียว ผลกระทบของ O₂ บนปฏิกิริยา C + NO₂ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง O₂ และสารชนิดกลาง (Intermediate species) ที่พื้นผิวทำให้เกิด CO, CO₂, NO และ NO₂ ในกรณีของการใช้ O₂ 10% อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ 300 °C เป็นสองเท่าของการเกิดปฏิกิริยา C + NO₂ อย่างเดียว (ที่อุณหภูมินี้ O₂ ไม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอน) ในการสันดาปของเขม่าร่วมกับการใช้แพลทินัม (Platinum: Pt) หรือโรเดียม (Rhodium: Rh) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ NO₂ เกิดการสันดาปโดยตรงจะไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ [3, 4]

2.3 Filter

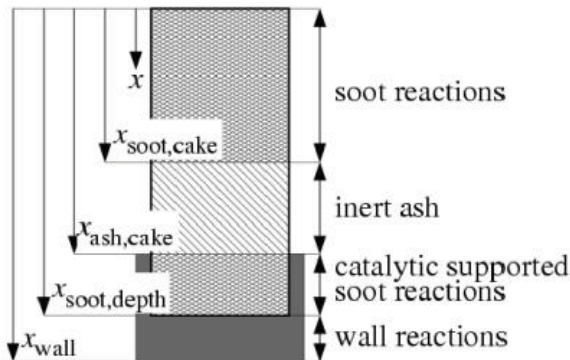
โดยทั่วไป DPF จะมีโครงสร้างเป็นวัสดุพรุน (Porous) ที่ผลิตจากเซรามิก เช่น คอร์ดิไรท์ (Cordierite) หรือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ในงานวิจัยนี้เราจะใช้ DPF แบบคอร์ดิไรท์ ที่ช่องทางไหลมีรูปทรงสี่เหลี่ยมและขนาดของช่องทางไหล ขาเข้า - ออก เท่ากัน (Symmetric Cell Structure) ซึ่งมีคุณสมบัติตาม ตารางที่ 1 [8]

ตารางที่ 1 DPF Physical Properties

DPF type	Wall flow
Monolith material	Cordierite
Coating material	Pt
Monolith diameter/length (mm)	142 / 152

Monolith volume (l)	2.44
Channel density (CPSI)	88
Wall Thickness (mm)	17
Geometric Filter Area, GFA (m ² /l)	0.62
Density (kg/m ³)	2510
Thermal conductivity (W/m·K)	2
Specific heat (J/kg·K)	1110

การกรองเขม่าโดยการไหลผ่านผนังที่มีรูพรุน (Porous Wall) เขม่าจะถูกสะสมตามช่องทางไหลของผนังโดยเขม่าจะถูกแบ่งเป็นสองชั้นคือชั้นลึก (depth filtration layer) ซึ่งเป็นชั้นที่เขม่าจะถูกสะสมอยู่ในรูพรุนที่ผนังของ DPF และชั้นเค้ก (soot cake layer) ซึ่งเป็นชั้นที่เขม่าจะสะสมจนเป็นรูปแบบของพื้นผิวเหนือผนังของ DPF และ จะมีชั้นของเขม่าที่กลายเป็นขี้เถ้า (ash) แทรกอยู่ระหว่างชั้นเค้กกับชั้นลึก จะอยู่บริเวณใกล้กับปลั๊กขาเข้า ได้แสดงในรูปที่ 2 แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ ไม่รวมผลกระทบที่เกิดขึ้นจากขี้เถ้า จึงไม่มีชั้นของขี้เถ้าในงานวิจัยนี้ [9]



รูปที่ 2 ชั้นของเขม่าที่เกิดจากการกรองของ DPF

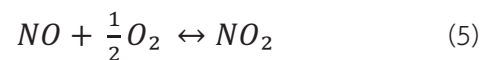
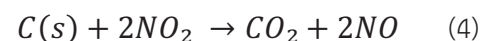
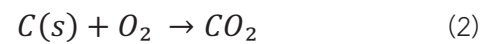
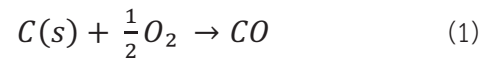
ส่วนของค่า Wall Permeability, Soot Permeability และ Depth Filtration Permeability ของการกรองที่ใช้ในแบบจำลองนั้นได้มาจากผลของการสอบเทียบแบบจำลองการไหลกับผลการทดลองจริงตาม [2] โดยใช้สมการของ Darcy Forchheimer กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ AVL BOOST ค่าที่ใช้อย่างต่าง ๆ ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Permeability ของ Wall, Soot และ Depth Filtration [2]

Permeability	CDPF	DPF
Wall Permeability (m ²)	2.65E-13	2.70E-13
Soot Permeability (m ²)	1.38E-14	1.37E-14
Depth Filtration Permeability (m ²)	7.66E-15	7.70E-15

2.4 Regeneration

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการคืนสภาพของแต่ละแบบจำลองด้วยโปรแกรม AVL BOOST โดยใช้สมการจลนศาสตร์เคมีแบบ Langmuir Hinshelwood คำนวณการออกซิไดซ์เขม่า (C(s)) ด้วย O₂ ในสมการที่ (1) – (2), ออกซิไดซ์เขม่า (C(s)) ด้วย NO₂ ในสมการที่ (3) – (4) และตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยน NO เป็น NO₂ ในสมการที่ (5) [9]



อัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบสมการ Arrhenius ของ O₂ และ NO₂ ได้ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (6) – (9) เรียงตามลำดับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ NO เป็น NO₂ ในสมการที่ (10) [9]

$$\dot{r}_1 = f_{co} \cdot K_1 \cdot e^{\frac{-E_{a,1}}{R \cdot T_s}} [O_2] \quad (6)$$

$$\dot{r}_2 = (1 - f_{co}) \cdot K_1 \cdot e^{\frac{-E_{a,1}}{R \cdot T_s}} [O_2] \quad (7)$$

$$\dot{r}_3 = K_3 \cdot e^{\frac{-E_{a,3}}{R \cdot T_s}} [NO_2] \quad (8)$$

$$\dot{r}_4 = K_4 \cdot e^{\frac{-E_{a,4}}{R \cdot T_s}} [NO_2] \quad (9)$$

$$\dot{r}_5 = K_5 \cdot e^{\frac{-E_{a,5}}{R \cdot T_s}} \cdot (c_{NO} \cdot c_{O_2}^{0.5} - \frac{c_{NO_2}}{K_{Eq}(T_s)}) \quad (10)$$

โดย $f_{co} = \frac{1}{1 + 0.02 \cdot [O_2]^{0.21} \cdot e^{\frac{3000}{R \cdot T_s}}}$

K = Pre Factor,

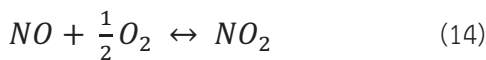
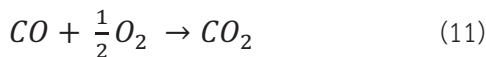
\dot{r} = Rate Constant

$e^{\frac{-E_a}{R \cdot T_s}}$ = The probability that each collision will result in a reaction

K_{Eq} = Equilibrium constant

2.5 Catalytic Wall Reaction

สำหรับแบบจำลองการออกซิไดซ์ CO, C₃H₆, C₃H₈ และ NO ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผนังในโปรแกรม AVL BOOST นั้นก็มีการใช้สมการจลนศาสตร์แบบ Langmuir Hinshelwood ดังแสดงในสมการที่ (11) - (14) แบบจำลองนี้ทำงานควบคู่กับ Regeneration ของ CDPF และ CCRT ซึ่งการออกซิไดซ์ NO ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผนังสามารถเปลี่ยนอัตราส่วนของ NO_x ได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนของ NO₂ ใน NO_x ในสมการที่ (14) [9]



อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ CO, C₃H₆, C₃H₈ และ NO ในสมการที่ (15) - (18) [9]

$$\dot{r}_{11} = \frac{\left[K_1 e^{\left(\frac{-E_1}{T_s}\right)} y_{CO} y_{O_2} \right] \left[1 + K_2 e^{\left(\frac{-E_2}{T_s}\right)} y_{CO} + K_3 e^{\left(\frac{-E_3}{T_s}\right)} y_{C_3H_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 e^{\left(\frac{-E_4}{T_s}\right)} y_{CO}^2 y_{C_3H_6}^2 \right] \left[1 + K_5 e^{\left(\frac{-E_5}{T_s}\right)} y_{NO}^{0.7} \right] T_s} \quad (15)$$

$$\dot{r}_{12} = \frac{\left[K_1 e^{\left(\frac{-E_1}{T_s}\right)} y_{C_3H_6} y_{O_2} \right] \left[1 + K_2 e^{\left(\frac{-E_2}{T_s}\right)} y_{CO} + K_3 e^{\left(\frac{-E_3}{T_s}\right)} y_{C_3H_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 e^{\left(\frac{-E_4}{T_s}\right)} y_{CO}^2 y_{C_3H_6}^2 \right] \left[1 + K_5 e^{\left(\frac{-E_5}{T_s}\right)} y_{NO}^{0.7} \right] T_s} \quad (16)$$

$$\dot{r}_{13} = \frac{\left[K_1 e^{\left(\frac{-E_1}{T_s}\right)} y_{C_3H_8} y_{O_2} \right] \left[1 + K_2 e^{\left(\frac{-E_2}{T_s}\right)} y_{CO} + K_3 e^{\left(\frac{-E_3}{T_s}\right)} y_{C_3H_6} \right]^{-2}}{\left[1 + K_4 e^{\left(\frac{-E_4}{T_s}\right)} y_{CO}^2 y_{C_3H_6}^2 \right] \left[1 + K_5 e^{\left(\frac{-E_5}{T_s}\right)} y_{NO}^{0.7} \right] T_s} \quad (17)$$

$$\dot{r}_{14} = \left[K_6 e^{\left(\frac{-E_6}{R \cdot T_s}\right)} \right] \left[C_{NO} C_{O_2}^{0.5} - \frac{C_{NO_2}}{K_{Eq}(T_s)} \right] \quad (18)$$

3 พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ทางเคมี

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม AVL-BOOST กำหนดให้การจำลองทางเคมีและทางกายภาพของผนังตัวกรองอนุภาค ในการทำนายผลเชิงตัวเลขการคืนสภาพของ DPF ทำผ่านสมการในหัวข้อ 2.4 และต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ทางเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาตั้งต่อไปนี้

3.1 O₂ – NO₂ Regeneration Reaction

การคืนสภาพโดยการออกซิไดซ์เขม่า (C(s)) ด้วย O₂ และ NO₂ ของแบบจำลอง DPF และ CDPF ในสมการที่ (1) - (4)

3.2 O₂ – NO₂-NO₂-Catalytic Regeneration Reaction

การคืนสภาพโดยการออกซิไดซ์เขม่า (C(s)) ด้วย O₂ และ NO₂ ของแบบจำลอง CRT และ CCRT ในสมการที่ (1) - (5)

ค่าพารามิเตอร์ของการคืนสภาพในแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ของโปรแกรม AVL BOOST เป็นไปตามตารางที่ 3 - 5 ดังนี้ [9]

ตารางที่ 3 การออกซิไดซ์เขม่า (C(s)) ด้วย O₂

K ₁	E ₁	E _f
1/(K·s)	kJ/kmol	kJ/kmol
5.00E+08	150000	3000

ตารางที่ 4 การออกซิไดซ์เขม่า (C(s)) ด้วย NO₂

K ₃	E ₃	K ₄	E ₄
1/s	kJ/kmol	1/s	kJ/kmol
10000	500	10000	500

ตารางที่ 5 NO₂- Catalytic

K ₅	E ₅
m ^{1.5} /kmol ^{0.5} s	kJ/kmol
1.50E+08	51000

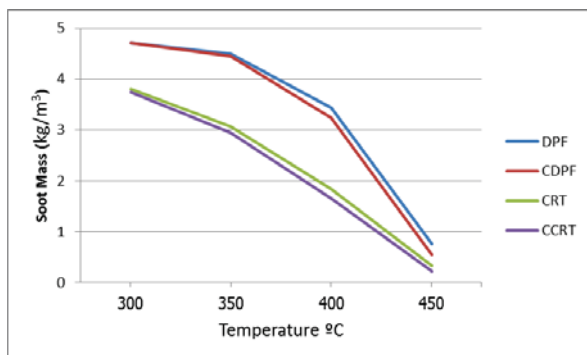
4 ผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิทางเข้าของ DPF ที่ 300, 350, 400 และ 450 °C ปริมาณของ soot mass 5 kg/m³, ปริมาณของ mass flux 0.042 kg/s, ปริมาณของ $C(s)$ 4.794E-06 kg_{solid}/kg_{gas} และปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดตามตารางที่ 6 ซึ่งเป็นตัวแทนของสภาวะไอเสียในช่วงโหลดการทำงานเครื่องยนต์ต่ำ [2]

ตารางที่ 6 องค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ใช้ในการจำลอง

O ₂	CO	CO ₂	NO	NO ₂	H ₂ O	HC
(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
10	302	50368	352.25	52.65	33958	79

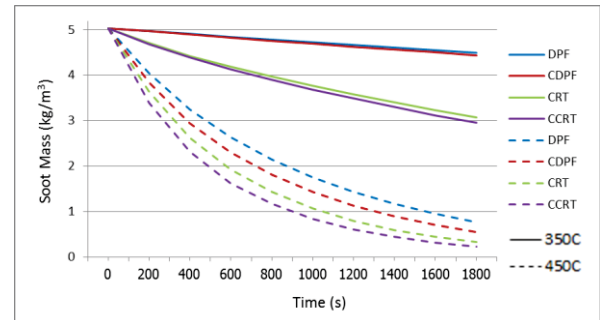
แบบจำลองที่เวลา 1800 วินาที จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 450°C มีการออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ได้ดีทั้ง 4 แบบจำลอง แต่ที่อุณหภูมิต่ำลงมา แบบจำลองของ DPF และ CDPF มีการออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ได้ในปริมาณที่น้อยกว่า CRT และ CCRT อย่างชัดเจนจากรูปที่ 3



รูปที่ 3 การออกซิไดซ์เขม่าที่เวลา 1800 วินาที ของ DPF, CDPF, CRT และ CCRT

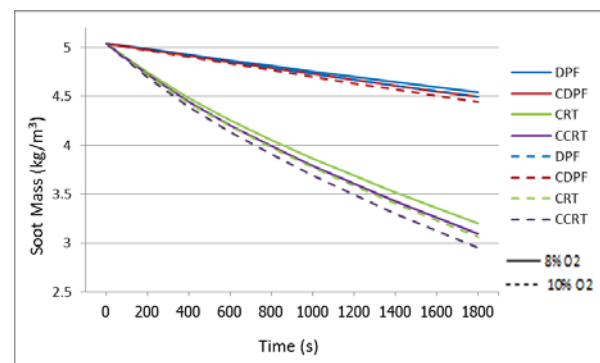
รูปที่ 4 แสดงการออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นฟังก์ชันของเวลาพบว่า ปริมาณเขม่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีปริมาณเขม่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 350°C ที่ลดลงอย่างคงที่

ผลที่ได้ เมื่อลดปริมาณ O₂ จาก 10% เป็น 8% ที่อุณหภูมิ 350°C ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าแบบจำลองของ DPF และ CDPF มีปริมาณเขม่าแตกต่างจากเดิมเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ CRT และ CCRT

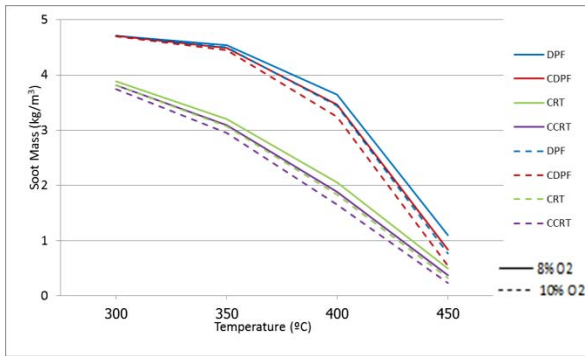


รูปที่ 4 การออกซิไดซ์เขม่าที่อุณหภูมิ 350°C และ 450°C ของ DPF, CDPF, CRT และ CCRT

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทางเข้า ของ DPF และ CDPF จาก 350°C เป็น 450°C ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าผลทำให้การออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ที่ปริมาณ O₂ 10% ออกซิไดซ์ได้มากกว่า 8%



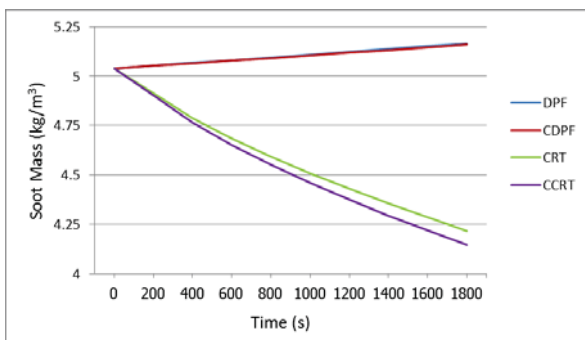
รูปที่ 5 การออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ที่ O₂ 8% และ O₂ 10% ที่อุณหภูมิ 350°C ของ DPF, CDPF, CRT และ CCRT



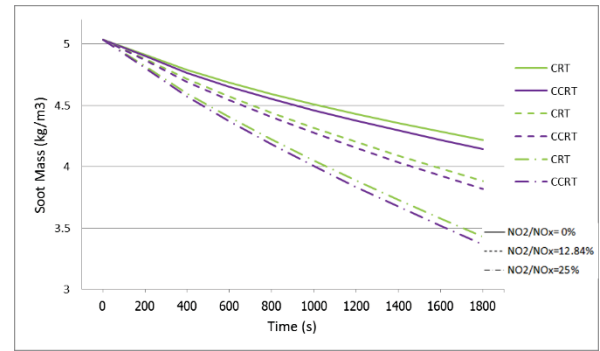
รูปที่ 6 การออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ที่ O_2 8% และ O_2 10% ของแบบจำลอง DPF และ CDPF ที่ 1800 วินาที ของ DPF, CDPF, CRT และ CCRT

เมื่อลดปริมาณของ $NO_2/NO_x = 0$ ที่อุณหภูมิ 300°C ทำให้ไม่สามารถออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ได้ ในแบบจำลองของ DPF และ CDPF ส่งผลให้มีการสะสมของปริมาณเขม่าที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 ส่วนแบบจำลองของ CRT และ CCRT มีการออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ได้น้อยลงเมื่อเทียบกับการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิเท่ากันแต่มีปริมาณ NO_2/NO_x สูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 8 แสดงการออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ในแบบจำลอง CRT และ CCRT ที่อุณหภูมิ 300°C เมื่อเพิ่มอัตราส่วน NO_2/NO_x ให้มากขึ้นจาก 0 เป็น 12.84 และ 25% ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณเขม่าลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 7 การออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ที่ปริมาณ $NO_2/NO_x = 0$ ที่อุณหภูมิ 300°C ของ DPF, CDPF, CRT และ CCRT



รูปที่ 8 การออกซิไดซ์เขม่า ($C(s)$) ที่ปริมาณ $NO_2/NO_x = 0$, $NO_2/NO_x = 12.84\%$ และ $NO_2/NO_x = 25\%$ ที่อุณหภูมิ 300°C ของ CRT และ CCRT

5 สรุปผล

แบบจำลองทั้ง 4 ประเภทคือ DPF, CDPF, CRT และ CCRT ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม AVL-BOOST เพื่อแสดงผลการออกซิไดซ์เขม่าได้ดีด้วยวิธีการแบบแพสเซิฟ ผลการจำลองพบว่า

1. อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการออกซิไดซ์ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเขม่ากับ O_2 และ NO_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้น
2. เมื่อเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันแบบจำลองของ CRT และ CCRT ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบแพสเซิฟด้วย O_2 และ NO_2 ผลการออกซิไดซ์กับเขม่าในแบบจำลองทั้งสองนี้ทำได้ดีกว่า DPF และ CDPF ที่ใช้เพียง O_2 อย่างเดียวในการออกซิไดซ์
3. ปริมาณ O_2 ที่เพิ่มขึ้นในไอเสียจะมีผลต่อการออกซิไดซ์เขม่าที่ดีขึ้นเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 350°C ขึ้นไปในทุกๆ แบบจำลอง
4. อัตราส่วน NO_2/NO_x มีผลต่อประสิทธิภาพการออกซิไดซ์เขม่าของ CRT และ CCRT โดยตรง คือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 25% จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการออกซิไดซ์เขม่าเพิ่มขึ้นกว่า 30%

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] Konstandopoulos, A.G. et al. 2000. Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration, and Aging, presented at SAE World Congress. **SAE International** (2000-01- 1016):
- [2] นายกมลฉัตร เทียงแก้ว.2557.การศึกษาแบบจำลอง การคืนสภาพที่ควบคุมไม่ได้ของตัวกรองมลพิษอนุภาค จากเครื่องยนต์ดีเซล. วิทยานิพนธ์.ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ,กรุงเทพฯ
- [3] Schejbal, M. et al. 2010.Modelling of soot oxidation by NO₂ in various types of diesel particulate filters. **Elsevier**. Ltd., Fuel 89, pp.2356-2375.
- [4] Tschamber V, Jeguirim M, Villani K, Martens J, Ehrburger P. Comparison of the activity of Ru and Pt catalysts for the oxidation of carbon by NO₂. **Elsevier**. Ltd., Applied Catalysis B: Environmental 72 (2007), pp. 299–303.
- [5] Kristine R.(2011). **Investigation and Modeling of the Regeneration of a Coated DPF**. Master Thesis. Department of Mechanical Engineering Technical University, Denmark
- [6] Eastwood, P., 2000.Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment. **Research Studies Press**. Ltd., England.
- [7] Johnson, J.H. et al. 1994. A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effects -1992 Horning Memorial Award lecture, **SAE Technical Paper** 940233.
- [8] เอกไท วิโรจน์สกุลชัย.2551.สารมลพิษอนุภาคจาก เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter).วารสาร วิศวกรรมสาร มก.ภาควิชาเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,กรุงเทพฯ

- [9] AVL BOOST Version 2010.1 Manual.AVL Inc..Austria,2010