การควบคุมปริมาณมลพิษจากเครื่องยนต์ดีเซลด้วยกระบวนการซีเล็คทีฟแคทตาลิสต์รีดักชั่น

The Control of Nitrogen Oxide Emission from Diesel Engine using Selective Catalyst Reduction-SCR

กัมปนาท เทียนน้อย ปร.ด. (Kampanart Theinnoi, Ph.D.)[1]

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเอสซีอาร์เป็นเทคโนโลยีที่นำแคทตาลิสต์ในกลุ่มของแพลตตินัม และซีโอไลต์ มาทำปฏิกิริยากับสารรีดักแทนซ์ได้แก่ แอมโมเนีย ยูเรีย และไฮโดรคาร์บอน เพื่อช่วยลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ เทคโนโลยีเอสซีอาร์ มีประสิทธิภาพสูงในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (>90%) ในก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ และเป็นเทคโนโลยีราคาถูก จึงเป็นที่นิยมในโรงงานอุตสาหกรรมแ เทคโนโลยีเอสซีอาร์ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งในปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกให้ความสำคัญต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดสภาวะโลกร้อน มลพิษที่มีปริมาณมากเกิดจากการเผาไหม้ยานยนต์ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดมาตรการควบคุมมลพิษจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ที่เข้มงวดขึ้น ตามมาตรฐานยุโรป (EURO) มาตรฐานอเมริกา (US) และ มาตรฐานญี่ปุ่น (JAPAN) เป็นต้น และมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณมลพิษในอากาศได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนนอกไซด์ และฝุ่นละออง ให้อยู่ในมาตรฐานความปลอดภัย ทั้งนี้ในอนาคตเทคโนโลยีเอสซีอาร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสำคัญเพื่อช่วยควบคุมปริมาณมลพิษในไอเสียให้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนด

คำสำคัญ : เทคโนโลยีเอสซีอาร์ แคทตาลิสต์ ไนโตรเจนออกไซด์

Abstract

Selective Catalyst Reduction-SCR is the technology for nitrogen oxides (NO_x) reduction using the reaction between catalyst (i.e. Platinum and Zeolite group) and reductant, such as ammonia, urea, and hydrocarbon. The SCR post-treatment has the high efficiency in NOx reduction (>90%) and low cost thus it is well proven in industrial stationary applications. The SCR application has been introduced and developed for the automotive industrial.

[1] อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

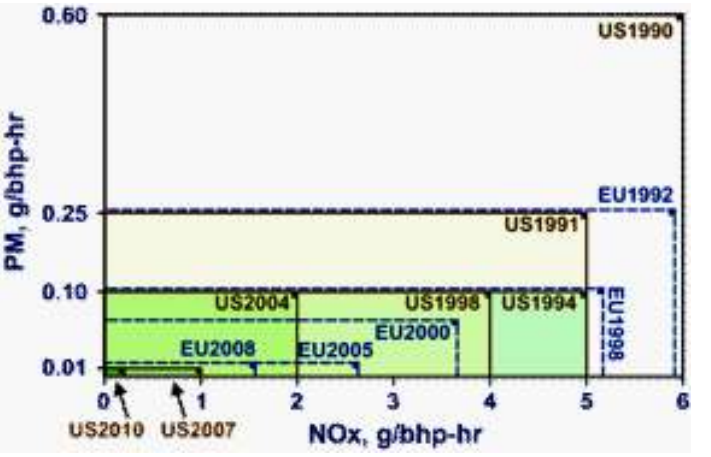
In addition, the countries all over the world are growing environmental concerns regarding global warming. Major primary pollutants are produced by vehicles. Therefore, legislative automotive emission standards (e.g. EURO, US, Japan emission standards) have been established in order to regulate toxic exhaust gases, i.e. nitrogenoxides (NO_x), hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), and particulate matter (PM) within the current limits. SCR aftertreatment technology has to be considered as one of the available options in order to significantly reduce emissions and fulfill future emission regulations.

Keywords : Selective Catalyst Reduction-SCR, Catalyst, Nitrogen oxides-NO_x

บทนำ

สภาวะปัจจุบันปริมาณการขยายตัวของตลาดยานยนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ความต้องการเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ราคาของน้ำมันเชื้อเพลิงในตลาดโลกที่เพิ่มสูงขึ้นนอกจากนี้ยังส่งผลต่อมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่สูงขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นปัญหาที่สำคัญในปัจจุบัน ซึ่งการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ เครื่องยนต์จุดระเบิดโดยใช้หัวเทียน (Spark Ignition-SI Engine) หรือเครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดโดยการอัด (Compression Ignition-CI Engine) หรือเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งแนวโน้มความต้องการในการใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูงขึ้น อันเนื่องจากเป็นเครื่องยนต์ที่มีสมรรถนะสูง ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถใช้น้ำมันทางเลือกได้ เช่น ไบโอดีเซลเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์เบนซิน ประกอบกับราคาค้าปลีกของน้ำมันดีเซลต่อลิตรที่มีมูลค่าต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน จึงทำให้มีแนวโน้มการนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ในรถยนต์นั่งส่วนบุคคลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในอดีตการใช้งานถูกจำกัดอยู่ในกลุ่มของรถบรรทุก รถเมล์ และรถกระบะเป็นส่วนใหญ่ ถึงแม้การเผาไหม้แบบส่วนผสมบาง (lean combustion) ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นแตกต่างจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์เบนซิน อย่างไรก็ตามมีวิธีการควบคุมมลพิษที่แตกต่างกัน ซึ่งมลพิษส่วนใหญ่ในเครื่องยนต์ดีเซลคือ ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide-NO_x) และฝุ่นละออง (Particulate Matter-PM) มลพิษดังกล่าวยากต่อการควบคุมให้อยู่ในระดับต่ำ จึงนำไปสู่ความพยายามแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ประกอบกับสนธิสัญญาเกียวโต (Theinnoi et al., 2007) ทำให้นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นปัญหาหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม ดังนั้นมาตรฐานมลพิษจึงถูกกำหนดขึ้น โดยกำหนดปริมาณมลพิษ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และ ฝุ่นละออง (PM) ในอนาคตแนวโน้มของมาตรฐานการควมคุมมลพิษ เช่น มาตรฐาน Euro 6 มาตรฐาน Tier 4 มาตรฐาน Low Emission Vehicle III (LEV III) มีความเข้มงวดขึ้นดังรูปที่ 1 จึงได้มีการพัฒนาการออกแบบเครื่องยนต์และเทคโนโลยีการกำจัดไอเสียมาใช้งานเพื่อควบคุม

ปริมาณมลพิษให้อยู่ภายใต้มาตรฐาน เช่น ดีเซลออกซิเดชั่นแคทตาลิสต์ (Diesel Oxidation Catalyst-DOC) กรองอนุภาคเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter-DPF) ซีเล็คทีฟแคทตาลิสต์รีดักชั่น (Selective Catalyst Reduction-SCR) มาใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์จึงเป็นแนวทางสำคัญที่น่าสนใจเพื่อควบคุมปริมาณ PM และ NO_x



รูปที่ 1 มาตรฐานควบคุมมลพิษสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลของยุโรปและอเมริกา
ที่มา: Majewski & Jaaskelainen, 2007

มลพิษไอเสียที่สำคัญของเครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลที่เกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์นั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากรูปของสารเคมีให้กลายเป็นพลังงานทางกล ซึ่งเชื้อเพลิงดีเซลนั้นประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) การเผาไหม้ทางทฤษฎีได้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) เป็นผลิตภัณฑ์ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าปริมาณของก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนมาก ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และออกซิเจนส่วนเกินจากการเผาไหม้ ความเข้มข้นของปริมาณก๊าซในก๊าซไอเสียนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ได้แก่ ภาระในการทำงานและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ช่วงเวลาในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงและรูปแบบการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Heywood, 1988) โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบของสารดังต่อไปนี้

1. คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีประมาณ 2% - 12%
2. ไอน้ำ (H_2O) มีประมาณ 2% - 12%
3. ออกซิเจน (O_2) มีประมาณ 3% - 17%
4. ไนโตรเจนออกไซด์ (N_2)

มลพิษไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล ประกอบด้วยสารมลพิษหลายอย่างที่เป็นพิษต่อมนุษย์และเป็นสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษของเชื้อเพลิงดีเซลเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ที่ทำปฏิกิริยากับอากาศระหว่างการผสมภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง สารมลพิษหลักที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล ประกอบไปด้วย

1. ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)

ไอเสียของเครื่องยนต์ทั่วไปประกอบด้วยปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่ต่ำ (~200 ppm) ซึ่งไนโตรเจนออกไซด์ ประกอบด้วยไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นจากไนโตรเจนเพียงเล็กน้อยในอากาศซึ่งอาจรวมไปถึงไนโตรเจนในเชื้อเพลิงรวมทั้งสารประกอบในรูปของ แอมโมเนีย (Ammonia-NH_3) และ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen Cyanide–HCN) ซึ่งมีปริมาณที่ต่ำมาก ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศในสภาวะที่อุณหภูมิการเผาไหม้สูง (>1600°C) (Bacha et al., 1998) โดยทั่วไปปริมาณการเกิด NO_x เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ซึ่งมี NO เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณ NO_2 เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ลักษณะการเกิด NO มีปฏิกิริยาหลายแบบระหว่างหรือเมื่อสิ้นสุดการเผาไหม้ ซึ่งสมการการเกิด NO มีดังต่อไปนี้

$$O + N_2 \longrightarrow NO + N \quad (1)$$

$$N + O_2 \longrightarrow NO + O \quad (2)$$

$$N + OH \longrightarrow NO + H \quad (3)$$

ภายหลัง NO ซึ่งเป็นองค์ประกอบในไอเสียบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น NO_2 ภายหลังที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยที่ NO จะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องกับไอน้ำและออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนเป็น NO_2 ตามสมการ

$$NO + H_2O \longrightarrow NO_2 + H_2 \quad (4)$$

$$NO + O_2 \longrightarrow NO_2 + O \quad (5)$$

ปริมาณ NO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สามารถแบ่งประเภทตามกลไกการเกิด (Turn 2000; Nichols et al., 1993; Jiang et al., 2006) ได้แก่

1.1 Thermal NO mechanism เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) ของไนโตรเจนในบรรยากาศในสภาวะที่อุณหภูมิสูง

1.2 Fuel NO mechanism เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) ของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้

1.3 Prompt NO mechanism เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารไฮโดรคาร์บอนอนุมูลอิสระกับ โมเลกุลของไนโตรเจนทำให้เกิด NO ตั้งต้น

สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลโดยส่วนใหญ่เกิดจาก Thermal NO (Turn, 2000) เกิดปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิสูงและในช่วงอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) ที่กว้าง การเกิด Prompt NO เกิดจากการเผาไหม้นั้นมีส่วนผสมเข้มข้น ซึ่งไม่พบกลไกของ Fuel NO โดยที่กลไกการเกิดไนโตรเจนออกไซด์สามารถอธิบายด้วยสมการของ Zeldovich Kinetics ถ้าให้ความร้อนกับอากาศที่ 2,000 K และทิ้งเวลาให้นานเพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลปฏิกิริยาที่แสดงในสมการ

$$O + N_2 \longrightarrow NO + N \quad (6)$$

$$N + O_2 \longrightarrow NO + O \quad (7)$$

จากสมการที่ (6) และ (7) สามารถเพิ่มเติมด้วยปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$N + OH \longrightarrow NO + H \quad (8)$$

อัตราการเกิดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในเครื่องยนต์ดีเซลเกิดขึ้นในสภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงซึ่งเกิดระหว่างช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion) และในช่วงเวลาสั้นภายหลังจากเกิดความดันสูงสุดในกระบอกสูบ โดยที่อัตราการเกิด NO_x สูงขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศที่ถูกอัดในกระบอกสูบ ประกอบกับอัตราการเผาไหม้และความดันสูงสุดจากการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น

ไนโตรเจนออกไซด์เป็นมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เมื่อได้รับ NO_x ในปริมาณที่สูงจะส่งผลทำให้เป็นอันตรายต่อฮีโมโกลบิน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ (Fernando et al., 2006) นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดหมอกควัน (Smog) ในบรรยากาศ อันเป็นต้นเหตุให้เกิดมลพิษทางอากาศ (Majewski & Khair, 2006)

2. ฝุ่นละออง (Particulate Matter : PM)

ไอเสียจากเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดมีฝุ่นละอองคาร์บอนในสถานะของแข็งปะปนอยู่ด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าในรูปของควันดำที่ออกมาจากท่อไอเสียของรถยนต์ บริมาณไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของรถบรรทุกขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.6 กรัมต่อกิโลเมตร และประมาณ 0.5 ถึง 1.5 กรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับเครื่องยนต์ที่มีระบบการฉีดน้ำมันแบบไดเร็กอินเจ็คชั่น (Heywood, 1988) ฝุ่นละอองที่พบเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นผลมาจากหยดของน้ำมันเชื้อเพลิงบางส่วนไม่สามารถระเหยกลายเป็นไอและถูกเผาไหม้ได้หมดและฝุ่นละอองดังกล่าวจะถูกปล่อยออกมากับไอเสียในรูปของฝุ่นละอองหนักหรือเขม่าคาร์บอนในรูปของแข็ง นอกจากนี้น้ำมันหล่อลื่นบริเวณผนังกระบอกสูบบางส่วนถูกเผาไหม้และรวมตัวกันกลายเป็นฝุ่นละอองของแข็ง (Bacha et al.,1988) โดยปกติทั่วไปละอองน้ำมันที่เหลือจากการเผาไหม้และไอของน้ำมันหล่อลื่นจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic fraction-VOC) หรือ สารอินทรีย์ละลาย (Soluble organic fraction-SOF) ในไอเสียรถยนต์ (Lapuerta et al., 2007)

ฝุ่นละอองสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลอยู่ในรูปเขม่าคาร์บอนแข็ง โดยมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 นาโนเมตร ในช่วงเริ่มต้นการก่อตัวของก้อนคาร์บอนแข็งจะเกิดขึ้น

บริเวณการเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงผสมหนา (Fuel-rich combustion regions) ของการเกิดการเผาไหม้แบบ premixed หลังจากนั้นคาร์บอนเม็ดกลมอยู่ในสถานะของของแข็งเหล่านี้จะดูดซับไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบอื่นมีขนาดเพิ่มขึ้นและทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเขม่าคาร์บอนซับซ้อนขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปเป็นฝุ่นละอองในที่สุด (Majewski & Khair, 2006) องค์ประกอบของฝุ่นละอองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ คือ (1) ส่วนประกอบของก้อนคาร์บอน เช่น พวกถ่าน ก้อนคาร์บอน เป็นต้น (2) ส่วนประกอบของสารระเหยอินทรีย์ ได้แก่ สารระเหยที่เกิดจากน้ำมันหล่อลื่น รวมไปถึงสารระเหยที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิง และ (3) ส่วนประกอบของสารซัลเฟอร์ เช่น กรดซัลฟุริก เป็นต้น (Kittelson, 1998; Majewski & Khair, 2006) องค์ประกอบทั้งหมดขึ้นอยู่กับกลไกการเผาไหม้และระบบไอเสียของเครื่องยนต์ ปัจจัยหลักคืออุณหภูมิการเผาไหม้ของขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองสามารถแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้แก่ Nuclei-mode ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-50 นาโนเมตร Accumulation mode ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-1000 นาโนเมตร และ Coarse mode ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง >1000 นาโนเมตร (Kittelson, 1998) ซึ่งฝุ่นละอองที่ได้จากการเผาไหม้เครื่องยนต์ดีเซลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร (PM_{10})

ฝุ่นละอองเป็นอันตรายต่อสุขภาพ กล่าวคือเมื่อได้รับปริมาณ PM10 ซึ่งสามารถเข้าไปในระบบทางเดินหายใจและในเยื่อหุ้มปอด จึงอาจส่งผลกระทบทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับการอักเสบของทางเดินหายใจและเป็นอันตรายกับปอดได้ (Lakkireddy et al., 2006)

3. ไฮโดรคาร์บอน (HC)

ไฮโดรคาร์บอนเป็นดัชนีบ่งชี้กลไกและประสิทธิภาพของการเผาไหม้ โดยที่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนนั้นเป็นผลอันเนื่องจากเกิดจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้เพียงบางส่วนโดยส่วนมากจะอยู่ในสภาวะก๊าซของไอเสีย โดยที่ไฮโดรคาร์บอนจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดอากาศจะมีมวลโมเลกุลและมีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวที่สูง (>190°C) เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงมีอิทธิผลอย่างมากต่อการเกิดปริมาณไฮโดรคาร์บอนในเครื่องยนต์ดีเซล กล่าวคือ อัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่เจือจางมากไป (Fuel-lean mixture) ในจังหวะการจุดระเบิดล่าช้า (Ignition delay) และช่วงเวลาการเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในปริมาณที่ไม่เหมาะสม จึงส่งผลให้ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนในไอเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้น (Under mixing) (Heywood, 1988) นอกจากนี้น้ำมันหล่อลื่นที่เคลือบบริเวณผนังของกระบอกสูบยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น (Burtscher et al.,1998) ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ดีเซลนั้นพบว่ามีปริมาณที่ต่ำ ซึ่งไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น จะมีลักษณะโครงสร้างที่มีส่วนประกอบของพันธะคาร์บอนที่สั้นและพบว่าไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากน้ำมันหล่อลื่นนั้น

มีส่วนประกอบของวัสดุหนัก (Majewski & Khair, 2006) ลักษณะไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันออกไป ตามประเภทของเชื้อเพลิง รูปทรงทางเรขาคณิตของห้องเผาไหม้และสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ไฮโดรคาร์บอนโดยลำพัง ซึ่งไม่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมแต่เมื่อทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์โดยส่งผลให้ปริมาณโอโซนลดลงและทำให้เกิดหมอกควันแบบโฟโตเคมี (Photochemical smog) (Heywood, 1988; Majewski & Khair, 2006)

4. คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ทำให้เกิดการผุกร่อนแต่มีอันตรายมาก คาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์โดยส่วนมากพบในสภาวะการเผาไหม้ส่วนผสมเข้มข้น ซึ่งมีออกซิเจนไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ดังนั้นปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์สามารถควบคุมได้โดยอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศสมมูล (Fuel/air equivalence ratio) (Ferguson, 1986; Heywood, 1988) โดยทั่วไปแล้วปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์จากเครื่องยนต์ดีเซลจะมีปริมาณที่ต่ำเนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่มากจึงทำให้อัตราส่วนสัมพัทธ์อากาศต่อเชื้อเพลิงมากกว่าทฤษฎี (λ>1) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงส่งผลทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปกับกระบวนการดังนั้นจึงถือได้ว่าคาร์บอนมอนนอกไซด์ก็เป็นอีกเชื้อเพลิงหนึ่งซึ่งสามารถให้พลังงานความร้อนได้ดังสมการที่ 9

$$CO + O_2 \longleftrightarrow CO_2 + Heat \qquad (9)$$

คาร์บอนมอนนอกไซด์นั้นเป็นมลพิษที่อันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ซึ่งปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่สะสมในเม็ดเลือดแดงส่งผลให้คุณภาพการลำเลียงออกซิเจนที่ลดลงทำให้เกิดภาวะขาดอากาศหายใจ (Strauss et al., 2004) นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ยังเป็นสารมลพิษที่เป็นอันตรายต่อระดับโอโซนในชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะโลกร้อน

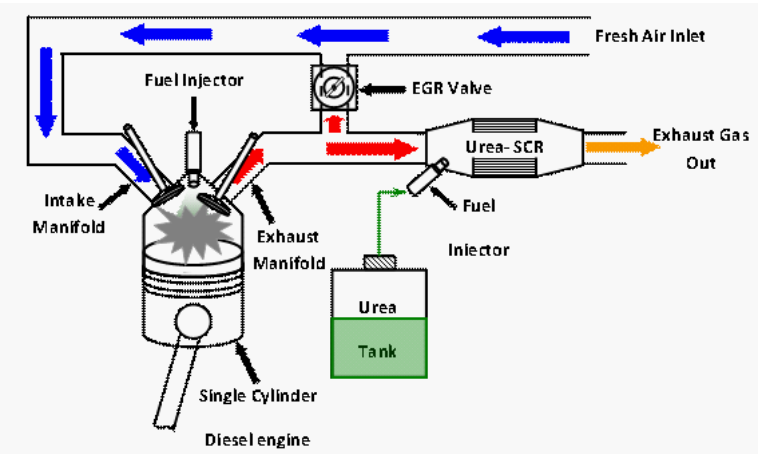
ดังนั้นมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เปลี่ยนไป ส่งผลกระทบกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม สำหรับมลพิษที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ดีเซลที่เป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับสภาวะอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูง คือไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งเป็นมลพิษหลักเกิดขึ้น ซึ่งนักวิจัยได้พยายามนำเสนอวิธีการลดและควบคุมปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นให้อยู่ภายใต้มาตรฐานการควบคุมปริมาณมลพิษ ดังนั้นการนำเอาระบบบำบัดไอเสียโดยใช้กระบวนการเอสซีอาร์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง

ประเภทของซีเล็คทีฟแคทตาลิสต์รีดักชั่น

กระบวนการเอสซีอาร์เพื่อการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นในปี 1970 โดยมีการใช้งานกับเครื่องจักรใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีแอมโมเนียในสภาวะของเหลว ทำหน้าที่เป็นรีดักแทนซ์ (Reductant) เพื่อฉีดผสมกับไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ ต่อมาในปัจจุบันได้ถูกนำเข้ามาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับรถบรรทุกขนาดใหญ่โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้น ถึงอย่างไรก็ตาม การใช้งานของเอสซีอาร์ยังไม่กว้างขวางนักเนื่องจากมีราคาสูง สูญเสียประสิทธิภาพในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อใช้ระยะเวลานานทำให้ให้ประสิทธิภาพลดลง เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวนักวิจัยจึงได้พยายามค้นคว้าพัฒนาระบบเอสซีอาร์สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้นอาทิเช่น ไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์ ยูเรียเอสซีอาร์ โดยที่รีดักแทนซ์มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแคทตาลิสต์ ดังนั้นเอสซีอาร์จึงถูกแบ่งประเภทตามความแตกต่างของรีดักแทนซ์ ซึ่งประเภทของเอสซีอาร์สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทหลักดังต่อไปนี้

แอมโมเนียและยูเรียเอสซีอาร์ (Ammonia and Urea -SCR)

ในช่วงเริ่มแรกนิยมใช้แอมโมเนียเป็นรีดักแทนซ์ ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนออกไซด์ในโรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรมผลิตไนตริก โรงงานอุตสาหกรรมหม้อไอน้ำ (Larrubia et. al., 2000) ซึ่งแอมโมเนียเอสซีอาร์มีประสิทธิภาพสูงในการลดไนโตรเจนออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรม จากข้อได้เปรียบดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาและนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล แต่ก็ยังมีขีดจำกัดในเรื่องของระบบความปลอดภัยในการจัดเก็บ การขนย้าย และการติดตั้งบนรถเพื่อนำไปใช้งานของแอมโมเนีย (Schmieg & Lee, 2005) ดังนั้น ยูเรียจึงได้ถูกนำมาใช้เป็นรีดักแทนซ์ เพื่อทดแทนแอมโมเนียเพื่อใช้สำหรับซีเล็คทีฟแคทตาลิสต์รีดักชั่นโดยเรียกระบบดังกล่าวว่า “ยูเรียเอสซีอาร์ (Urea-SCR)” โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบยูเรียเอสซีอาร์ ที่มา: Theinnoi (2008)

ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพการทำงานคล้ายคลึงกับการใช้แอมโมเนีย ซึ่งปลอดภัยและมีสารพิษที่เกิดขึ้นน้อยกว่าแอมโมเนีย (Eastwood, 2000; Lambert et al., 2004; Tennison et al., 2004) ในปัจจุบันยูเรียเอสซีอาร์ได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้งานในรถบรรทุกดีเซลเพื่อควบคุมปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ให้อยู่ภายใต้กรอบมาตรฐานควบคุมมลพิษเพื่อสิ่งแวดล้อมซึ่งมีแนวโน้มที่เข้มงวดขึ้นในทุกปี

กระบวนการทำงานของยูเรียเอสซีอาร์ประกอบไปด้วย กระบวนการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermal decomposition) โดยยูเรีย (NH2-CO-NH2) จะสลายตัวกลายเป็นแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยาที่ 10 และเกิดการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังปฏิกิริยาที่ 11 (Willand, 1998)

$$NH_2\text{-}CO\text{-}NH_{2(l)} \longrightarrow NH_3 + HNCO\ NO + N \quad (10)$$

$$HNCO + H_2O \longrightarrow NH_{3(g)} + CO_2 \quad (11)$$

กระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนออกไซด์กับแอมโมเนียบนผิวของแคทตาลิสต ได้ผลิตภัณฑ์คือไนโตรเจนและน้ำดังปฏิกิริยาที่ 12 ถึง 14 ซึ่งอัตราส่วนระหว่างไนตริกออกไซด์ (NO) ต่อไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 1 (ปฏิกิริยาที่ 13) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดไนโตรเจนออกไซด์สูงขึ้นภายใต้อุณหภูมิการทำงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ 12 และ 14 (Koebel et al., 2000; Blakeman et al., 2003; Chatterjee et al., 2008)

$$4NH_3 + 4NO + O_2 \longrightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (12)$$

$$2NH_3 + NO + NO_2 \longrightarrow 2N_2 + 3H_2O \quad (13)$$

$$4NH_3 + 2NO_2 + O_2 \longrightarrow 3N_2 + 6H_2O \quad (14)$$

อัตราส่วนระหว่าง NH_3 ต่อ NO_x ขึ้นอยู่กับสภาวะการออกซิเดชั่นของไนโตรเจนออกไซด์ประกอบกับปริมาณของแอมโมเนียมากเกินไปหรือไม่เพียงพอ จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อแอมโมเนียหรือไนโตรเจนออกไซด์ ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชั่นสามารถกระทำได้โดยการติดตั้งออกซิเดชั่นแคทตาลิสต์บริเวณทางออกของแอมโมเนียเอสซีอาร์ เพื่อที่ลดปริมาณของแอมโมเนียที่คงเหลือในไอเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (Koebel et al., 2000; Adelman et al., 2002)

ทีมวิจัยหลายกลุ่ม (Walker et al., 2003; Johnson, 2004; Kusaka et al., 2005) ได้ทำการศึกษาการทำงานของยูเรียเอสซีอาร์พบว่า เป็นอุปกรณ์บำบัดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงภายใต้อุณหภูมิการทำงานที่ต่ำและไม่มีผลต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel penalty) มีระยะเวลาใช้งานยาวนานเมื่อใช้ร่วมกับน้ำมันดีเซลซึ่งมีส่วนผสมของซัลเฟอร์ในสภาวะการใช้งานจริงที่อุณหภูมิต่ำ การติดตั้งระบบยูเรียเอสซีอาร์เพื่อการใช้งานจริงในรถบรรทุกดังรูปที่ 3 พบว่ามีข้อจำกัดในเรื่องของการติดตั้งถังบรรจุแยกจากถังเชื้อเพลิง ระบบการจ่ายแอมโมเนีย การกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแอมโมเนีย เกิดการแข็งตัวของสารรีดักแทนซ์ภายใต้สภาวะการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ และอัตราส่วนของปริมาณแอมโมเนียที่เหลือต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ลดลง (NH_3 slip and NO_x trade-off) (Luders et al., 1995)

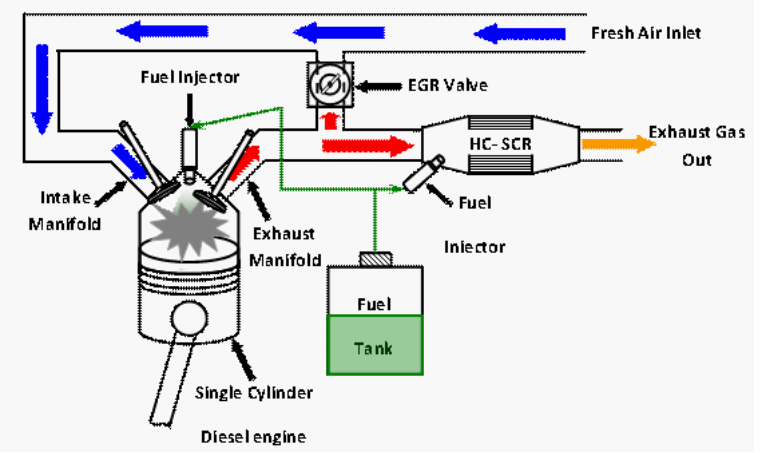


รูปที่ 3 การติดตั้งระบบยูเรียเอสซีอาร์บนรถบรรทุก ที่มา: Majewski (2009)

ไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์ (Hydrocarbon -SCR)

การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเช่น ดีเซล ไบโอดีเซล และน้ำมันดีเซลสังเคราะห์ พบว่า อัตราส่วนของไฮโดรคาร์บอนต่อไนโตรเจนออกไซด์ และประเภทไฮโดรคาร์บอนที่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังนั้น การนำไฮโดรคาร์บอนมาใช้เป็นรีดักแทนซ์สำหรับทำปฏิกิริยากับแคทตาลิสต์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งเพื่อลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ โดยที่ส่วนประกอบและปริมาณของไฮโดรคาร์บอนมีส่วนสำคัญ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแคทตาลิสต์ในสภาวะการทำงานส่วนผสมบาง (Arve et al., 2005) ซึ่งปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียที่เหมาะสมจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการทำปฏิกิริยาการลดไนโตรเจนออกไซด์ ปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่พบในไอเสียโดยทั่วไปพบว่ามีปริมาณค่อนข้างต่ำซึ่งส่งผลให้ในช่วงการทำงานของแคทตาลิสต์ไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพดังนั้น การฉีดไฮโดรคาร์บอนเพิ่มเข้าไปในไอเสียจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดไนโตรเจนออกไซด์ได้ ระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์มีลักษณะดังรูปที่ 4

ในปัจจุบันงานวิจัยสำหรับระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์ได้รับความสนใจอย่างมากเพื่อที่จะพัฒนาไปใช้งานจริงในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อนอันเนื่องจากการใช้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในไอเสียมาทำปฏิกิริยากับแคทตาลิสต์โดยที่ไม่จำเป็นต้องฉีดไฮโดรคาร์บอนเพิ่มเติมในขณะที่ทำปฏิกิริยากับแคทตาลิสต์ (Passive mode) หรือทำการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียให้สูงขึ้นก่อนทำปฏิกิริยากับแคทตาลิสต์ (Active mode) เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาการลดไนโตรเจนออกไซด์บนผิวของแคทตาลิสต์ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังไม่ต้องติดตั้งถังบรรจุเชื้อเพลิงเพิ่มเติมเพราะว่าใช้ไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นเชื้อเพลิงหลักมาใช้เป็นรีดักแทนซ์สำหรับในกรณีของ Active mode ประกอบกับไม่ต้องติดตั้งระบบป้อนรีดักแทนซ์สำหรับการทำงานใน Passive mode (Er nen et al., 2003; Theinnoi et al., 2007)



รูปที่ 4 ระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์ ที่มา: Theinnoi (2008)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์พบว่าไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยากับปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (สมการที่ 15) มากกว่าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (สมการที่ 16) เพื่อผลิตไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Majewski & Khair, 2006)

$$\{HC\} + NO_x \longrightarrow N_2 + CO_2 + H_2O \qquad (15)$$

และเมื่อเกิดปฏิกิริยากลไกของ Nonselective กับออกซิเจนดังสมการต่อไปนี้

$$\{HC\} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O \qquad (16)$$

ซีเล็คทีฟแคทตาลิสต์ที่นำมาใช้สำหรับระบบนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของแคทตาลิสต์ เช่น ซีโอไลต์ อลูมิน่า และซิลิก้าผสมอลูมิน่า เป็นต้น ช่วงอุณหภูมิการทำงาน ประเภทของไฮโดรคาร์บอน และส่วนประกอบของไอเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนไฮโดรคาร์บอนต่อไนโตรเจนออกไซด์ โดยที่ในปัจจุบัน ซีลเวอร์และอลูมิน่าแคทตาลิสต์ (Ag/Al_2O_3) เป็นที่นิยมและถูกเลือกมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์สำหรับยานยนต์ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการทำงานในอุณหภูมิที่ต่ำ (<300 °C) ซึ่งส่งผลทำให้ซีลเวอร์แคทตาลิสต์เกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากไนเตรทซึ่งเกิดขึ้นบริเวณผิวของแคทตาลิสต์ (Meunier et al., 1999) และไฮโดรคาร์บอนในสภาวะก๊าซจะเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอนและทำให้คาร์บอนดังกล่าวไปเคลือบบริเวณผิวของแคทตาลิสต์ ทำให้แคทตาลิสต์มีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลง (Houel et al., 2007; Theinnoi et al., 2007) ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวนักวิจัยได้นำเสนอการใช้ไฮโดรเจนเพื่อช่วยเพิ่มปฏิกิริยาของแคทตาลิสต์ในช่วงอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส (Meunier et al., 1999; Shibata et al., 2004; Shimizu, et al., 2006; Satokawa et al., 2007) ซึ่งพบว่า ไฮโดรเจนสามารถช่วยทำความสะอาดและลดการก่อตัวของคาร์บอนบริเวณผิวของแคทตาลิสต์ นอกจากนี้ยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาของการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ได้อีกด้วย

สรุป

ระบบเอสซีอาร์เป็นระบบบำบัดไอเสียที่ถูกนำมาใช้งานจริงเพื่อวัตถุประสงค์หลักในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อรองรับมาตรฐานการควบคุมมลพิษที่เข้มงวดขึ้นในอนาคตอันใกล้นี้

การนำเอาแอมโมเนียมาเป็นตัวรีดักแทนซ์นั้นยังมีข้อจำกัดอย่างมากโดยเฉพาะในเรื่องของความปลอดภัยดังนั้นการใช้รีดักแทนซ์ซึ่งทำมาจากยูเรียจึงเป็นแนวทางที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะสามารถลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ได้มากกว่า 90% ซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในอนาคต อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระบบยูเรียเอสซีอาร์ที่ยังคงที่มีราคาสูง การเก็บรักษาและการบรรทุกยูเรียสำหรับรถยนต์ขนาดเล็กยังคงเป็นสาเหตุหลักที่สำคัญ ดังนั้นระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์จึงเป็นอีกทางเลือกที่สำคัญเพื่อรองรับรถยนต์ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและไม่จำเป็นต้องรับภาระในการบรรทุกรีดักแทนซ์อีกด้วย เพราะรีดักแทนซ์ที่ใช้สำหรับระบบเอสซีอาร์คือไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการเผาไหม้ และเป็นองค์ประกอบสำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้การทำงานของระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์ยังมีข้อจำกัดในบางสภาวะการทำงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานแบบ Active mode เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ นั้นส่งผลให้อัตราสิ้นเปลืองที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ประกอบกับในช่วงอุณหภูมิการทำงานที่ต่ำ (<300°C) พบว่าประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการใช้งานระบบไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์เป็นระบบที่อยู่ระหว่างงานวิจัยเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้น

ถึงอย่างไรก็ตามระบบเอสซีอาร์ได้ออกแบบมาเพื่อลดไนโตรเจนออกไซด์เพียงอย่างเดียวซึ่งยังไม่เพียงพอที่ทำให้ยานยนต์สามารถผ่านมาตรฐานมลพิษได้ ดังนั้นระบบเอสซีอาร์จึงถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบบำบัดไอเสียชนิดอื่นเช่น ดีเซลออกซิเดชั่นแคทตาลิสต์ (Diesel Oxidation Catalyst-DOC) เพื่อลดปริมาณไฮโดรคาร์บอน หรือ กรองอนุภาคเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter-DPF) เพื่อช่วยลดปริมาณของฝุ่นละออง (PM) ซึ่งเป็นมลพิษที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในไอเสียซึ่งเกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ดีเซล เทคโนโลยีของระบบบำบัดไอเสียที่ดีควรจะมีระบบไม่ซับซ้อน ขนาดเล็ก ประสิทธิภาพในการลดมลพิษสูง ราคาประหยัด และสามารถนำไปใช้งานในยานยนต์ได้ง่าย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามที่จะสร้างระบบบำบัดไอเสียที่ครอบคลุมความต้องการดังกล่าวให้ได้มากที่สุดเพื่อตอบสนองความต้องการของบริษัทยานยนต์เพื่อรองรับมาตรฐานการควบคุมมลพิษที่เข้มงวดขึ้นอย่างมากในอนาคตอันใกล้นี้



รายการอ้างอิง

Adelman, B., Rohe, R. & Christopher, R., (2002) Literature survey to assess the state-of-the-art of selective catalytic reduction of vehicle NO_x emissions. **CRC Project**, No. AVFL-7.

Arve, K., Klingstedt, F., Er nen, K., Lindfors, L.–E. & Yu. Murzin, D. (2005) Engineering HC-SCR: Improved low temperature performance through a cascade concept. **Catalysis letters, 105**, 133-138.

Bacha, J., Blondis, L., Freel, J., Hemighaus, G., Hoekman, K., Hogue, N., Horn, J., Lesnini, D., McDonald, C., Nikanjam, M., Olsen, E., Scott, B. & Sztenderowicz, M. (1998). **Diesel fuels technical review (FTR-2).** Chevron Products Company, a division of Chevron USA, Inc.

Blakeman, P.G., Andersen, P.J., Chen, H., Jonsson, J.D., Phillips, P.R. & Twigg, M.V. (2003). Performance of NOx adsorber emissions control systems for diesel engines. **SAE,** Paper No. 2003-01-0045.

Burtscher, H., Stefan, S. & Huglin, C. (1998). Characterization of particles in combustion engine exhaust. **Journal of Aerosol Science, 29**(4), 389-296.

Chatterjee, S., Walker A.P. & Blakeman, P.G. (2008). Emission control options to achieve Euro IV and Euro V on heavy duty diesel engines. **SAE,** Paper No.2008-28-0021.

Eastwood, P. (2000). **Critical topics in exhaust gas aftertreatment.** Herts: Research Studies Press. ISBN 0-86380-242-7.

Er nen, K., Linfors, L.-E., Klingstedt, F. & Murzin, D.Y. (2003). Continuous reduction of NO with octane over a silver/alumina catalyst in oxygen-rich exhaust gases: combined heterogeneous and surface-mediated homogeneous reactions. **Journal of Catalyst, 219,** 25-40.

Ferguson, C.R. (1986). **Internal combustion engines: applied thermosciences.** Newyork: John Wiley. ISBN 0-471-88129-5.

Fernando, S., Hall, C. & Jha, S. (2006). NO_x reduction from biodiesel fuels. **Energy and Fuels, 20**(1), 376-382.

Heywood, J.B. (1988). **Internal combustion engine fundamentals.** Singapore: McGraw-Hill. ISBN 0-07-100499-8.

Houel, V., Millington, P., Rajaram, R.R. & Tsolakis, A. (2007a). Fuel effects on the activity of silver hydrocarbon-SCR catalysts. **Applied Catalysis B: Environmental, 73**(1-2), 203-207.

Jiang, B., Liang, H., Huang, G. & Li, X. (2006) Study on NOx Formation in CH4/Air Jet Combustion. **Chinese Journal of Chemical Engineering, 14**(6), 723-728.

Johnson, T.V. (2004). Diesel emission control technology 2003 in review. **SAE,** Paper No. 2004-01-0070.

Kittelson, D.B. (1998) Engines and nanoparticles: a review. **Journal of Aerosol Science, 29**, 575 – 588.

Koebel, M., Elseber, M. & Kleemann, M. (2000). Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines. **Catalysis Today, 59**(3-4), 335-345.

Kusaka, J., Sueoka, M., Takada, K., Ohga, Y., Nagasaki, T. & Daisho, Y. (2005). A basic study on a urea–selective catalytic reduction system for a medium-duty diesel engine. **International Journal of Engine Research, 6**(1), 11-19.

Lakkireddy, R.V., Mohammed, H. & Johnson, J.H. (2006). The Effect of a diesel oxidation catalyst and a catalyzed particulate filter on particle size distribution from a heavy duty diesel engine. **SAE,** Paper No. 2006-01-0877.

Lambert, C., Hammerle, R., McGill, R., Khair, M. & Sharp, C. (2004). Technical advantages of urea SCR for light-duty and heavy-duty diesel vehicle applications. **SAE,** Paper No. 2004-01-1292.

Lapuerta, M., Ballesteros, R. and Rodriguez- Fernandez, J. (2007). Thermogravimetric analysis of diesel particulate matter. **Measurement Science and Technology, 18**, 650-658.

Larrubia, M.A., Ramis, G. & Busca, G. (2000) An FT-IR study of the adsorption of urea and ammonia over V2O5–MoO3–TiO2 SCR catalysts. **Applied Catalysis B: Environmental, 27**(3), L145-L151.

Luders, H., Backes, R., Huthwohl, G., Ketcher, D., Horrocks, R.W., Hurley, R.G. & Hammerle, R.H. (1995). An urea lean NO_x catalyst system for light duty diesel vehicles. **SAE,** Paper No.952493.

Majewski W.A. (2007). **SCR Systems for Mobile Engines.** Retrieved March 01, 2012, from http://www.dieselnet.com/login.php?/tech/cat_scr_mobile.php/

Majewski W.A., & Jaaskelainen H. (2009). **Engine Design for Low Emissions.** Retrieved March 01, 2012, from http://www.dieselnet.com/login.php?/tech/engine_design.php

Majewski, W.A. & Khair, M.K. (2006). **Diesel Emissions and Their Control.** Warrendale: SAE International. ISBN-10 0-7680-0674-0.

Meunier F.C., Breen, J.P., Zuzaniuk, V., Olsson, M. & Ross, J.R.H. (1999) Mechanistic aspects of the selective reduction of NO by propene over alumina and silver-alumina catalysts. **Journal of Catalysis, 187**(2), 493-505.

Mueller, C.J., Pitz, W.J., Picket, L.M., Martin, G.C., Siebers, D.L. & Westbrook, C.K. (2003). Effects of oxygenates on soot processes in DI diesel engines: experimental and numerical simulations. **SAE,** Paper No. 2003-01-1791.

Nichols, K.M., Thompson, L.M. & Empie, H.J. (1993). A Review of NO_x formation mechanisms in recovery furnaces. **Tappi Journal, 76**(1), 119-139.

Satokawa, S., Shibata, J., Shimizu, K., Satsuma, A., Hattori, T. & Kojima, T. (2007) Promotion effect of hydrogen on lean NOx reduction by hydrocarbons over Ag/Al2O3 catalyst. **Chemical Engineering Science, 62**(18-20), 5335-5337.

Schmieg S.J. & Lee, J.H. (2005). Evaluation of supplier catalyst formulations for the selective catalytic reduction of NOx with ammonia. **SAE**, Paper No.2005-01-3881.

Shibata, J., Shimizu, K., Takada, Y., Shichi, A., Yoshida, H., Satokawa, S., Satsuma, A. & Hattori, T. (2004) Structure of active Ag clusters in Ag zeolites for SCR of NO by propane in the presence of hydrogen. **Journal of Catalysis, 227**(2), 367-374.

Shimizu, K., Shibata, J. & Satsuma, A. (2006). Kinetic and in situ infrared studies on SCR of NO with propane by silver–alumina catalyst: Role of H2 on O2 activation and retardation of nitrate poisoning. **Journal of Catalysis, 239**(2), 402-409.

Strauss, S., Wasil, J.R. & Earnest G.S. (2004) Carbon monoxide emissions from marine outboard engines. **SAE,** Paper No. 2004-32-0011.

Tennison, P., Lambert, C. & Levin, M. (2004) NOx control development with urea SCR on a diesel passenger car. **SAE,** Paper No. 2004-01-1291.

Theinnoi, K. (2008). **The impact of diesel fuel properties and diesel engine operating conditions on silver/alumina catalyst HC-SCR activity for reduced NO_x emissions.** Doctor of philosophy thesis, Mechanical engineering, The University of Birmingham.

Theinnoi, K., Tsolakis, A., Houel, V. &Rajaram, R.R. (2007). Passive NO_x reduction activity of a silver catalyst under real diesel-engine exhaust conditions. **SAE**, Paper No. 2007-01-1917.

Theinnoi K., York A.P.E., Tsolakis A., Chuepeng S., Wyszynski M.L., Xu H.M., Clark R.H., and Cracknell R.F. (2008). Diesel engine performance and emissions for Fischer-Tropsch diesel blends and diesel fuel: environmental perspectives. **3rd International Symposium on Environment**, Athens, Greece, 22-25 May 2008.

Turns, S.R. (2000). **An Introduction to Combustion : Concepts and Applications Second edition.** Boston: McGraw-Hill. ISBN: 0071169105.

Walker, A.P., Allansson, R., Blakeman, P.G., Lavenius, M., Erkfeldt, S., Landalv, H., Ball, W.F., Harrod, P., Manning, D. & Bernegger, L. (2003). The development and performance of the compact SCR-Trap system:a 4-Way diesel emission control system. **SAE**, Paper No. 2003-01-0778.

Willand, J. (1998). Selective non-catalytic NO_x-reduction in diesel engine using aqueous urea. **SAE**, Paper No.982651.