

พลศาสตร์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของก๊าซผสมสำหรับ กระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ติดตั้งตัวผสมสถิต

ประยูทธ เขียมฤทธิวงศ์^{1,4} กานต์ พนาสุภมัตถุ^{1,4*} ภาวนี นรัตถรักษา^{1,4} สไบทิพย์ ตุงคะมณี^{2,4}
และ นุวงศ์ ชลคุป³

บทคัดย่อ

กระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ (Fischer-Tropsch Synthesis) เป็นแนวทางหนึ่งในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์จากชีวมวล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในช่วงเบนซิน คีโรซีน ดีเซลหรือแวกซ์ ที่ปราศจากโลหะหนักเจือปน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งาน ทั้งนี้กระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งส่งผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องมีการระบายความร้อนของปฏิกิริยาเพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบให้สม่ำเสมอและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการดำเนินปฏิกิริยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์สำคัญในอันที่จะศึกษาถึงพลศาสตร์การไหลและสนามของอุณหภูมิของระบบก๊าซภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ติดตั้งตัวผสมสถิตบางประเภท เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจากการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่า การติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งวงกลมสองแผ่นแท่งเหนี่ยวนำให้เกิดฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมและควบคุมให้อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการดำเนินปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์

คำสำคัญ : ปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์, ตัวผสมสถิต, ก๊าซสังเคราะห์, ชีวมวล

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

⁴ ศูนย์วิจัยและพัฒนาหน่วยปฏิบัติการทางวิศวกรรมเคมีและตัวเร่งปฏิกิริยา (RCC), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: karanp@kmutnb.ac.th รับเมื่อ 15 ตุลาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 29 เมษายน 2557

Flow Dynamics and Heat Transfers of Mixed-Gas in Fischer-Tropsch Process: Design of Fixed-Bed Reactor Equipped with Static-Mixers

Prayut Jiamrittivong^{1,4}, Karn Pana-Suppamassadu^{1,4*}, Phavanee Narataruksa^{1,4},
Sabaithip Tungkamani^{2,4} and Nuwong Chollacoop³

Abstract

Fischer-Tropsch (FT) synthesis is one of the major processes in a production of synthesis liquid fuel from biomass. Depending upon the catalyst used, the liquid product normally composes of hydrocarbon compounds in a range of gasoline, kerosene, diesel or wax without trace of heavy metals. Since the FT-synthesis is the exothermic reaction, the released heat affects the characteristics of the production. It requires a proper cooling in order to maintain the temperature level and induce the uniform temperature field. Therefore, the present work aims to investigate the flow dynamics and the temperature distribution of the mixed gas within the reactor bed installed with certain types of static mixers, and to apply the results as a guideline in the reactor design. From the simulation results, the installation of double-semicircle static mixers induces a proper convective flux and low temperature level suitable for the Fischer-Tropsch reaction.

Keywords : Fischer-Tropsch reaction, static mixer, syngas, biomass

¹ Department of Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Industrial Chemistry, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency Ministry of Science and Technology

⁴ Research and Development Center for Chemical Engineering Units and Catalyst Design (RCC), King Mongkut's University of Technology North Bangkok

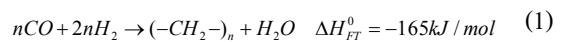
* Corresponding author, E-mail: karanp@kmutnb.ac.th Received 15 October 2013, Accepted 29 April 2014

1. บทนำ

โดยทั่วไปในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากก๊าซสังเคราะห์นั้น จะประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อย ได้แก่ 1) การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวลโดยกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน 2) การปรับปรุงคุณภาพก๊าซสังเคราะห์และ 3) การต่อสายโซ่ของโมเลกุลของก๊าซสังเคราะห์โดยกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ [1] ซึ่งกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์นับเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการกำหนดประเภทของเชื้อเพลิงเหลวที่ต้องการ โดยหลังจากขั้นตอนการผลิตก๊าซสังเคราะห์แล้ว ก๊าซดังกล่าวจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเกิดปฏิกิริยาการต่อสายโซ่ (Polymerization) ของก๊าซสังเคราะห์ เกิดเป็นเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ตามประเภทที่ต้องการได้

ในทางจลนศาสตร์เคมี กระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างก๊าซตั้งต้นคือ CO และ H₂ บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง (Heterogeneous Catalytic Process) ที่สามารถต่อสายโซ่โมเลกุลให้มีขนาดที่ยาวขึ้นตามลำดับจนกระทั่งได้สายโซ่โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ยาวและเป็นเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ที่ต้องการได้ ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์จำเป็นต้องมีค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวสามารถเกิดในหลายช่วง ได้แก่ เบนซิน (Gasoline) คีโรซีน (Kerosene) ดีเซล (Diesel) และแว็กซ์ (Wax) ที่มีความบริสุทธิ์และคุณภาพสูง นอกเหนือจากคุณสมบัติโดยเฉพาะด้านการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว ยังมีปัจจัยที่สำคัญอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเกิด

ผลิตภัณฑ์ อาทิ อุณหภูมิ ความดัน อัตราเร็วการป้อนสารตั้งต้น อัตราส่วนของ H₂:CO และ โครงสร้างภายในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น ปฏิกิริยาการต่อสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนหรือปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์นั้น แสดงได้ดังสมการทางเคมี



โดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ยังส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ดังนั้นได้เกิดแนวคิดเพื่อนำตัวผสมสติดมาติดตั้งภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งตัวผสมสติดจะมีผลต่อพลศาสตร์การไหลและการถ่ายเทความร้อน สนามอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอและอยู่ในช่วงที่เหมาะสม [2]

นอกจากนั้นการติดตั้งตัวผสมสติดสามารถเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลภายในท่อของเครื่องปฏิกรณ์แบบเคลือบผนังด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Wall-Coated Reactor) ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่พัฒนาขึ้น จากงานวิจัย Khinast และคณะ ได้ศึกษาการลดลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบที่ติดตั้งตัวผสมสติดและไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสติดที่มีการเคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา PtCl₄ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสติดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสติด โดยตัวผสมสติดส่งผลให้การกระจายของก๊าซสารตั้งต้น เป็นไปได้ดีขึ้นในแนวรัศมี ทำให้โมเลกุลของก๊าซถูกส่งผ่านถึงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผนังท่อได้ทั่วถึงมากขึ้น เป็นการลดข้อจำกัดด้านการกระจายมวลสารและพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งได้อีกทางหนึ่ง [3]

Couvert และคณะ ได้ศึกษาปัจจัยของการจัดเรียงตัวผสมสถิตแบบต่างๆ ในระบบก๊าซ ได้แก่ แบบ Statiflo Lightnin และ Sulzer ที่มีต่อพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ การไหลและการถ่ายเทมวลสาร อาทิ Δp และ $k_L a$ สัดส่วนและการวางตัวของแต่ละเอลลิเมนต์ของตัวผสมสถิตเป็นปัจจัยควบคุมที่กำหนดระดับความปั่นป่วนในสนามการไหล ซึ่งในขณะเดียวกัน ระดับความปั่นป่วนและทิศทางของการไหลก็มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและเบ็ดตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

เพราะว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยบ่งบอกถึงสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ โดยวิเคราะห์ได้จากสนามอุณหภูมิของก๊าซผสม ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่วิเคราะห์จากผลการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เช่น [5] จำลองการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติ ที่มีค่าการนำความร้อนในแนวรัศมี (k_r) เป็นค่าตัวแทนของการนำความร้อน เมื่อพิจารณา ร่วมกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนัง (Apparent Wall Heat Transfer Coefficient, h_w) สามารถประเมินหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบ (Overall Heat Transfer Coefficient, U) ได้ [6] และนำเสนอตัวเลขนัสเซล (Wall Nusselt Number, Nu_w) ที่แสดงในพจน์ของสหสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) และเลขสัดส่วนขนาดท่อต่อขนาดอนุภาค (ตัวเร่งปฏิกิริยา) (Tube-to-Particle Ratio, N) [7-10] อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวยังมีข้อจำกัดหลายประการในการอธิบายการถ่ายเทความร้อนในช่วงกว้าง [11, 12] ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยนำเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์การไหล หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) เพื่อจำลอง

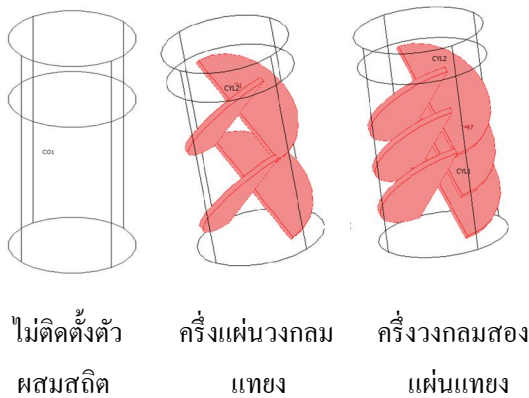
การไหลและการถ่ายเทพลังงานความร้อนทั้งใน 2 และ 3 มิติ ของระบบก๊าซในเบ็ดของอนุภาคทรงกลม ซึ่งในการหาคำตอบเชิงตัวเลขต้องแก้สมการ นาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) (สมการโมเมนตัม) และสมการพลังงาน ปรากฏผลว่าการใช้เทคนิค CFD สามารถทำนายค่าตัวเลขนัสเซลท์และค่าการนำความร้อนในแนวรัศมีได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ $Re = 9$ ถึง 1450 [12-15]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์สำคัญในอันที่จะศึกษาวิเคราะห์ถึงพลศาสตร์การไหลและสนามอุณหภูมิของก๊าซผสมที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปซ์และการควบคุมอุณหภูมิโดยระบบระบายความร้อนที่เกิดขึ้น ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบ็ดหนึ่งที่บรรจุด้วยอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา และติดตั้งตัวผสมสถิต (Modified Packed-Bed with Static Mixers) โดยอาศัยวิธีทางไฟไนต์เอลลิเมนต์ (COMSOL MULTIPHYSICS™) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปซ์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากก๊าซชีวมวลต่อไป

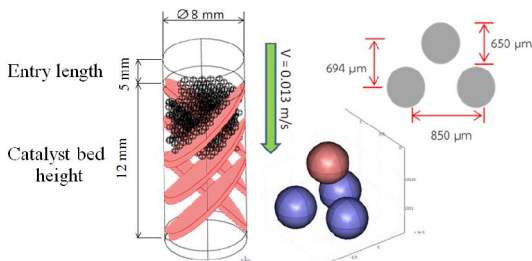
2. วิธีการจำลอง

แบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบ 3 มิติ เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมกรการไหลของก๊าซผสมในปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปซ์ เช่น สนามการไหลและสนามความดัน ตลอดจนการกระจายอุณหภูมิของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งตัวผสมสถิตชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิงที่ไม่ติดตั้งตัวผสมสถิตตั้งรูปที่ 1 โดยตัวผสมสถิตจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร สูง 1.2 เซนติเมตร และหนา 0.1 เซนติเมตร ติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์ที่มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร สูงประมาณ 1.7 เซนติเมตร (ครอบคลุมช่วงแรกเข้าของการไหล) ทั้งเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสเถิตจะบรรจุด้วยอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 650 μm จัดเรียงตัวแบบสามเหลี่ยมพีระมิด (Tetrahedral) เพื่อกำหนดสัดส่วนช่องว่างของชั้นเบคของตัวเร่งปฏิกิริยาให้สอดคล้องกันในแต่ละแบบจำลอง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งตัวผสมสเถิตและติดตั้งตัวผสมสเถิต



รูปที่ 2 การจัดเรียงตัวอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสามเหลี่ยมพีระมิด

สมการบังคับ สมการบังคับที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการนาเวียร์-สโตกส์ (ดังสมการที่ 2) และสมการพลังงาน (การพาความร้อนและการนำความร้อน)(ดังสมการที่ 3)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho u \cdot \nabla u + \nabla p = 0 \quad (2)$$

เมื่อ η คือ ความหนืดพลศาสตร์ของก๊าซ [kg/m·s]

u คือ ความเร็วของก๊าซ [m/s]

ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ [kg/m³]

p คือ ความดันของก๊าซ [Pa]

$$\nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T u) = 0 \quad (3)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อนของก๊าซ [W/m²·K]

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ

[J/kg·K]

T คือ อุณหภูมิของก๊าซ [K]

คุณสมบัติและเงื่อนไขขอบเขต คุณสมบัติของของไหลในแบบจำลองเป็นคุณสมบัติของก๊าซผสมระหว่าง CO กับ H₂ ที่เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ที่สภาวะทางอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 180 °C ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ กล่าวคือ ความหนาแน่น 0.4329 kg/m³ ความหนืด 1.5×10⁻⁵ kg/m·s ค่าการนำความร้อน 0.048 W/m·K และค่าความจุความร้อนจำเพาะ 1,186 J/kg·K ส่วนการกำหนดเงื่อนไขทางการไหลจะระบุเป็นความเร็วเริ่มต้นของก๊าซผสม 0.013 m/s และสำหรับเงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนจะระบุเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ระบายออกที่ผนังเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 17,000 W/m² ทั้งนี้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์เป็นไปดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 1

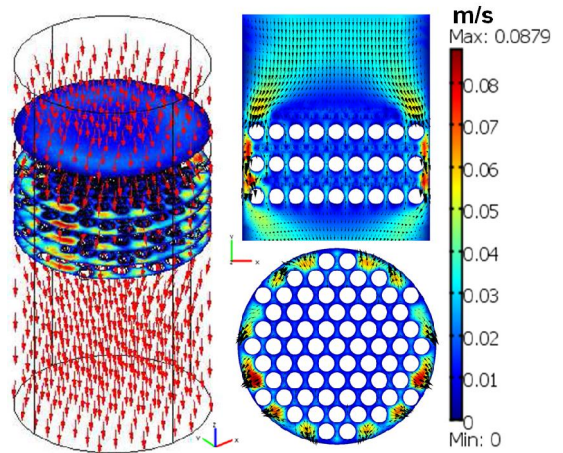
3. ผลการจำลอง

3.1 สนามการไหลของก๊าซผสมในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสถิต

รูปที่ 3 แสดงถึงสนามการไหลของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสถิต โดยแถบสีแสดงถึงขนาดของความเร็วและลูกศรแสดงทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของก๊าซผสม ความเร็วของก๊าซผสมบริเวณแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์จะมีความเร็วที่ต่ำกว่าบริเวณขอบ การหน่วงตัวของสนามความเร็วนี้มีสาเหตุจากการเรียงตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่หนาแน่นและขัดขวางการไหลของก๊าซผสม ในขณะที่บริเวณโดยรอบเส้นรอบวงของเครื่องปฏิกรณ์จะมีช่องว่างเฉลี่ยระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่มากกว่า ความต้านทานการไหลจึงต่ำกว่าและส่งผลให้การไหลเร่งตัวในบริเวณดังกล่าว ผลการทดลองโดยเครื่อง MRI (Magnetic Resonance Imaging) ได้ยืนยันค่าความเร็วของก๊าซที่บริเวณผนังซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับการไหลบริเวณแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง [16] และสอดคล้องเช่นเดียวกับผลการจำลองการไหลในเบดนิ่งของอนุภาคทรงกลมที่มีสัดส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อต่ออนุภาค (Tube-to-Particle Ratio) เท่ากับ $N = 2$ ในช่วงการไหลที่มีค่า $Re_p = 1922$ [17]

เมื่อพิจารณาสนามการไหลในระนาบตามแนวแกน (x-y) จะสังเกตได้อย่างชัดเจนถึงความเร็วที่ต่ำโดยรอบเบดของตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่กระแสการไหลของก๊าซผสมส่วนมากไหลออกทางด้านข้างสู่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ แสดงว่าก๊าซผสมจำนวนมากไม่สามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างเหมาะสม และเวลาในการสัมผัสเพื่อดำเนินปฏิกิริยาระหว่างก๊าซผสมบนพื้นผิว

ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจสั้นกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งอาจเป็นเหตุให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่สูงเท่าที่ควร นอกจากนี้จากลักษณะการกระจายความเร็วของก๊าซผสมที่ไม่สม่ำเสมอในเบดตัวเร่งปฏิกิริยา มักเป็นสาเหตุให้ตัวเร่งปฏิกิริยาในบริเวณต่างๆ เสื่อมสภาพไม่เท่ากัน เป็นการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างไม่มีประสิทธิภาพนัก



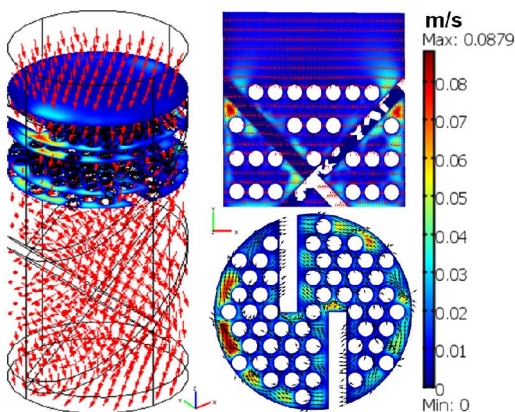
รูปที่ 3 สนามการไหลของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสถิต

3.2 สนามการไหลของก๊าซผสมในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสถิต

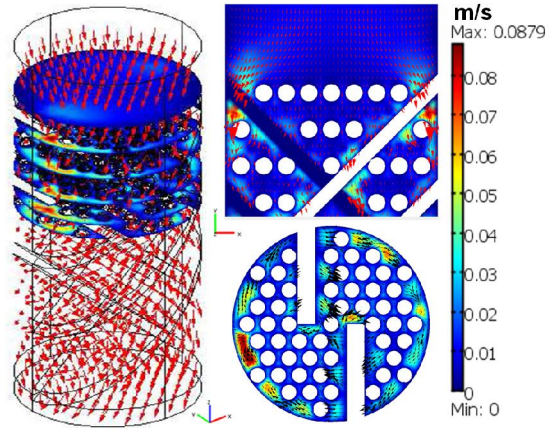
เมื่อทำการติดตั้งตัวผสมสถิตประเภทต่างๆ ภายในเครื่องปฏิกรณ์พบว่า สนามการไหลของก๊าซผสมไหลจะมีรูปแบบและทิศทางที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับลักษณะหรือรูปทรงของตัวผสมสถิตที่ใช้งานอย่างมาก

จากสนามการไหลของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งแผ่นวงกลมทแยงและแบบครึ่งวงกลมสองแผ่นทแยง (ในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ) ที่ระนาบตัดขวางกับแกนการไหลของก๊าซผสม หรือ ระนาบ $z = c(x-y)$ พบว่าลักษณะการไหล

ในแต่ละระนาบจะมีรูปแบบที่แน่นอนตามคาบของตัวผสมสถิต เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งปกติ ตัวผสมสถิตทั้งสองแบบที่ติดตั้ง จะเหนี่ยวนำให้มีองค์ประกอบของความเร็วของก๊าซผสมในแนวเส้นรอบวง (Tangential Flow) และแนวรัศมี (Radial Flow) ที่เด่นชัดขึ้น โดยเฉพาะช่องทางการไหลระหว่างพื้นผิวของตัวผสมสถิตกับอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุอยู่โดยรอบ สำหรับกรณีของตัวผสมสถิตแบบครึ่งวงกลมสองแผ่นทแยง จะมีการไหลบางส่วนที่ช่องว่างการไหลค่อนข้างแคบ ก่อให้เกิดบริเวณการไหลความเร็วต่ำบ้างในบางบริเวณ อย่างไรก็ตามก็ก๊าซผสมภายในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการติดตั้งตัวผสมสถิตทั้งสองแบบนี้ จะมีความเร็วเฉลี่ยที่ต่ำกว่าและสม่ำเสมอกว่า ซึ่งเมื่อสามารถกำหนดให้เป็นช่วงอัตราการไหลที่เหมาะสมกับช่วงเวลาของการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซผสมบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ย่อมคาดหมายได้ถึงสมรรถนะหรืออัตราของการเกิดปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์ที่สูงขึ้น

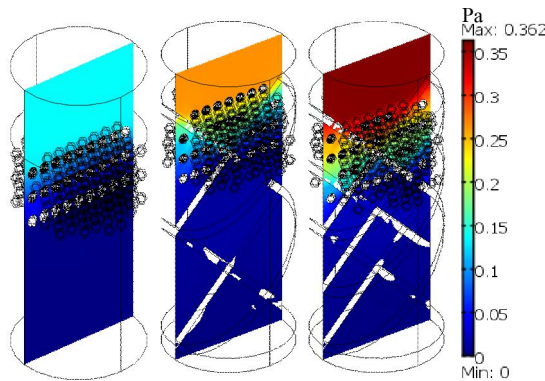


รูปที่ 4 สนามการไหลของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งแผ่นวงกลมทแยง



รูปที่ 5 สนามการไหลของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งวงกลมสองแผ่นทแยง

ผลต่อความดันตกจากตัวผสมสถิตที่ติดตั้งนั้น ไม่มีนัยสำคัญนัก ดังที่สังเกตได้จากรูปที่ 6 ซึ่งแสดงถึงสนามความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ ค่าความดันตกภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.13 Pa ส่วนในกรณีที่ติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งวงกลมสองแผ่น ทแยงความดันตกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุดเป็น 0.35 Pa แม้ความดันตกมีค่าสูงขึ้นจากตัวผสมสถิตแต่เมื่อเทียบกับความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ดำเนินปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์ซึ่งอาจสูงถึงช่วง 10 บาร์ (10^6 Pa)[18] แล้ว นับได้ว่าความดันตกอันเกิดจากการติดตั้งตัวผสมสถิตในที่นี้นั้น ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความดันในระบบ หากทว่าประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาในลำดับถัดไป ได้แก่ ผลของการกระจายอุณหภูมิของก๊าซผสม อันเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสนามการไหลของก๊าซที่คายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์และตัวผสมสถิต



ไม่ติดตั้งตัว ค้างแผ่นวงกลม ค้างวงกลมสอง
ผสมสติด แทง แผ่นแทง

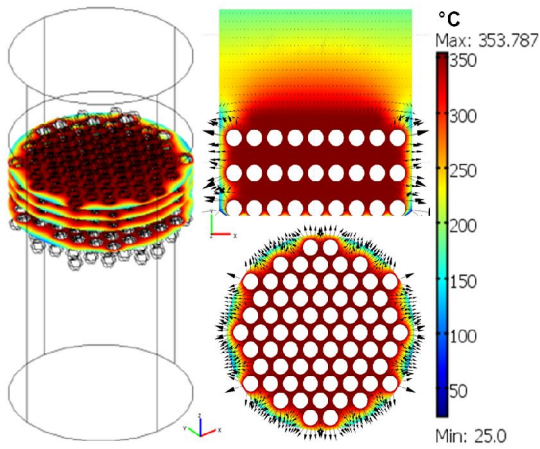
รูปที่ 6 สนามความดันของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์

3.3 การกระจายอุณหภูมิและฟลักซ์การพาความร้อนของก๊าซผสม

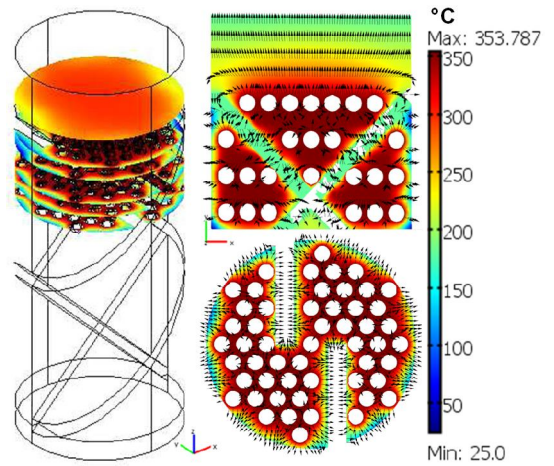
รูปที่ 7 ถึง 12 แสดงการกระจายอุณหภูมิและฟลักซ์การพาความร้อนของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสติดทั้ง 2 แบบ จากรูปที่ 9 และ 11 สนามอุณหภูมิของก๊าซผสมในระนาบต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสติดแสดงให้เห็นว่า บริเวณโดยรอบของผนังเครื่องปฏิกรณ์จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าบริเวณผนังท่อที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสติด รูปที่ 7 แสดงถึงสนามของอุณหภูมิของก๊าซที่จำลองได้สำหรับเบคหนึ่ง สังเกตพบว่า อุณหภูมิของก๊าซบริเวณผนังท่อจะต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางของเบคจากการระบายความร้อนที่บริเวณผนังท่อ ซึ่งเกรเดียนท์ของอุณหภูมิดังกล่าวเป็นผลอันเนื่องมาจากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการนำความร้อน สอดคล้องกับเกรเดียนท์ที่

เป็นผลการจำลองแบบในระบบที่ให้ความร้อนแก่ก๊าซในเครื่องปฏิกรณ์ หากแต่เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม [15] การแทรกตัวของตัวผสมสติดส่งเสริมให้การพาความร้อนภายในเบคตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากขึ้น จากองค์ประกอบความเร็วในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมีดังที่สังเกตพบแล้วดังรูปที่ 4 และ 5 เป็นกลไกให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นด้วยระดับความปั่นป่วนของการไหลที่เพิ่มขึ้น

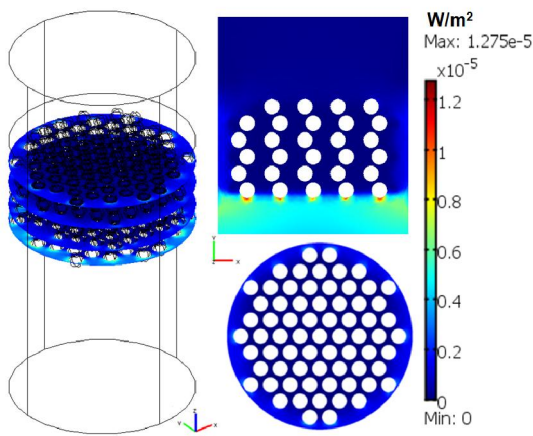
จากฟลักซ์การพาความร้อนของก๊าซผสมในระนาบต่างๆ ในเบคตัวเร่งปฏิกิริยาที่ติดตั้งตัวผสมสติดดังที่แสดงในรูปที่ 10 และ 12 พบว่า ตัวผสมสติดทั้ง 2 แบบส่งผลให้ฟลักซ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้นและสม่ำเสมอ โดยมีปัจจัยมาจากองค์ประกอบของความเร็วที่สูงขึ้นในลักษณะเดียวกันกับที่อธิบายแล้วเกี่ยวกับสนามอุณหภูมิ นอกจากค่าเฉลี่ยของฟลักซ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นแล้ว ฟลักซ์ในบริเวณผนังของเครื่องปฏิกรณ์ก็มีแนวโน้มสูงขึ้น ข้อมเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากความร้อนของปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์ได้ดียิ่งขึ้น ตรงกันข้าม เมื่อเทียบกับฟลักซ์การพาความร้อนในรูปที่ 8 ในกรณีซึ่งไม่มีการติดตั้งตัวผสมสติดนั้นพบว่า ฟลักซ์ในบริเวณผนังแม้จะสูงกว่าในเบคตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากความเร็วในแนวแกนที่สูงกว่าก็ตาม แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ไม่สูงนัก ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสู่ภายนอกย่อมดีน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสติด



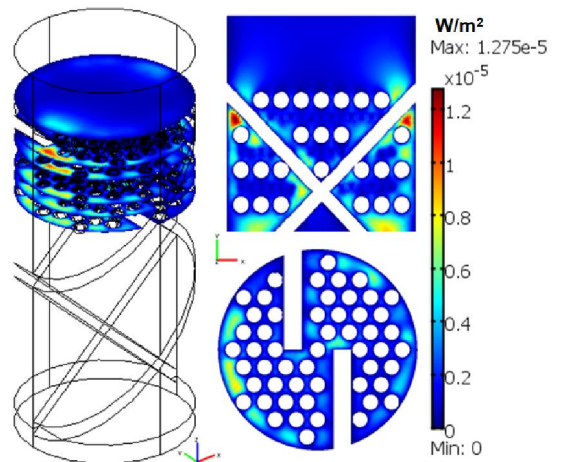
รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของก๊าซผสมในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสถิต



รูปที่ 9 การกระจายอุณหภูมิของก๊าซผสมในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งแผ่นวงกลมทแยง

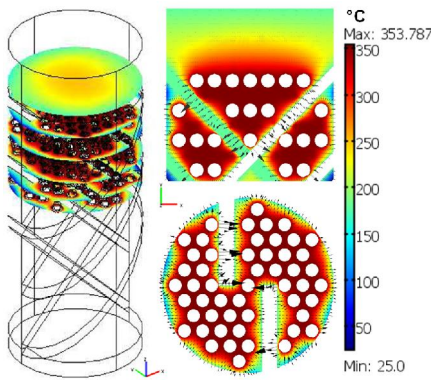


รูปที่ 8 ฟลักซ์การพาความร้อนของก๊าซผสมในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งตัวผสมสถิต

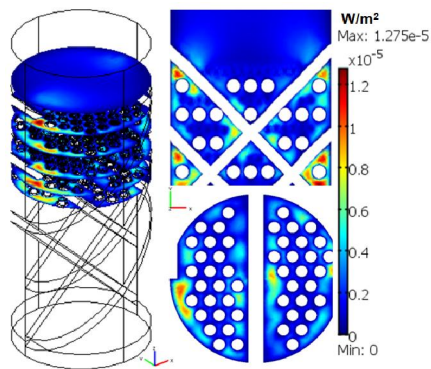


รูปที่ 10 ฟลักซ์การพาความร้อนของก๊าซผสมในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสถิตแบบครึ่งแผ่นวงกลมทแยง

จากการพิจารณาผลของสนามอุณหภูมิและฟลักซ์การพาความร้อนกล่าวได้ว่า การติดตั้งตัวผสมสติดีเอื้อประโยชน์ทั้งในด้านการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและส่งเสริมให้ประสิทธิภาพและการควบคุมอุณหภูมิของก๊าซผสมดีขึ้น ในแง่ของปฏิกิริยาเคมีย่อมเป็นผลดีต่อการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วถึงมากยิ่งขึ้น เป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาอีกทางหนึ่ง



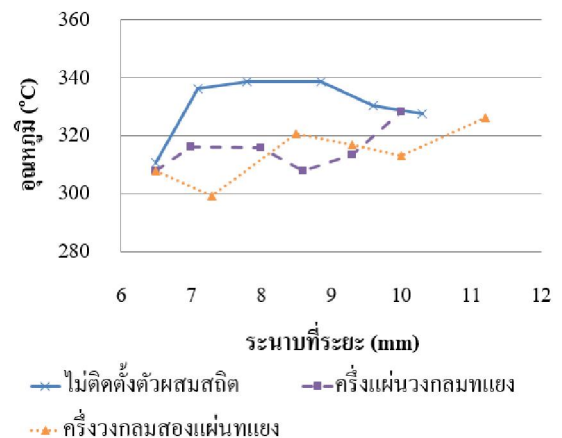
รูปที่ 11 การกระจายอุณหภูมิของก๊าซผสมในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่อง ปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสติดีแบบครึ่งวงกลมสองแผ่นทแยง



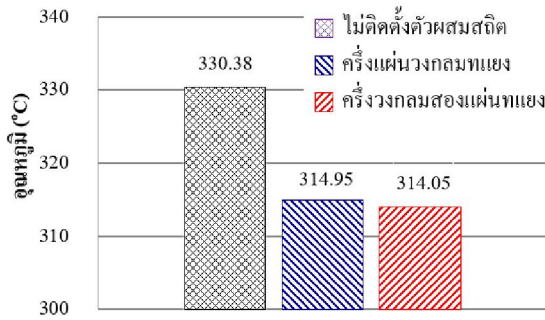
รูปที่ 12 ฟลักซ์การพาความร้อนของก๊าซผสมในเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวผสมสติดีแบบครึ่งวงกลมสองแผ่นทแยง

3.5 อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์

รูปที่ 13 แสดงถึงอุณหภูมิเฉลี่ยบนระนาบของก๊าซผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสติดี ที่ระนาบตัดขวาง $z = c(x-y)$ ต่างๆ ตามแนวการไหล ซึ่งสังเกตพบว่าในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสติดี อุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละระนาบมีค่าสูงกว่ากรณีที่ติดตั้งตัวผสมสติดีในทุกระนาบ และมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดอย่างชัดเจน ต่างกับเมื่อติดตั้งตัวผสมสติดีซึ่งแม้ว่าจะมีการกวัดแกว่งของอุณหภูมิเฉลี่ยตามลักษณะสนามการไหลที่เหนี่ยวนำจากลักษณะของตัวผสมสติดีก็ตาม แต่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่แคบ นั้นหมายถึงการดำเนินการของกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์สามารถเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยโดยตลอดในเครื่องปฏิกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 14 ซึ่งยังคงเห็นได้ชัดเจนว่ามีค่าต่ำลงเมื่อติดตั้งตัวผสมสติดีทั้ง 2 แบบ



รูปที่ 13 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ระนาบตัดขวาง $z = c(x-y)$ ต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 14 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์

4. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขถึงผลของการติดตั้งตัวผสมสถิตต่อพลศาสตร์การไหลและสนามอุณหภูมิของก๊าซผสม ในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ รวมถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ว่าตัวผสมสถิตเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมี เป็นผลให้การปลุกซ์พาความร้อนเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของก๊าซผสมเฉลี่ยที่ระนาบต่างๆ และตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงว่าตัวผสมสถิตเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซผสมในกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์ให้เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งเดิมที่ไม่ได้ติดตั้งตัวผสมสถิต ดังนั้นผลการศึกษาที่ได้รับจากงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางสำคัญในการออกแบบและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวลด้วยปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปซ์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในโครงการเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลโดยกระบวนการฟิชเชอร์ทรอปซ์และทุนอุดหนุนจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้การสนับสนุนส่วนหนึ่งในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.J.A. Tijjensen, A.P.C. Faaij, C.N. Hamelinck and M.R.M. van Hardeveld, "Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification", "Biomass and Bioenergy" 23, 2002, pp. 129-152.
- [2] R. K. Thskur, Ch. Vial, K. D. P. Nigam, E. B. Nauman and G. Djelveh, "Static Mixer in the Process Industries-a Review", Institution of Chemical Engineers Transactions 81, 2003, pp. 787-826.
- [3] J. G. Khinast, A. Bauer, D. Bloz and A. Panarello, "Mass-transfer enhancement by static mixers in a wall-coated catalytic reactor", Chemical Engineering Science 58, 2003, pp. 1063-1070.
- [4] A. Couvert, C. Sanchez, I. Charron, A. Laplanche and C. Renner, "Static mixers with a gas continuous phase", Chemical Engineering Science 61, 2006, pp. 3429-3434.

- [5] C. A. Coberly, and W. R. Marshall, "Temperature gradients in gas streams flowing through fixed granular bed", *Chemical Engineering Progress* 47, 1951, pp. 141-150.
- [6] A.G. Dixon, "An improved equation for the overall heat transfer coefficient in packed beds", *Chemical Engineering and Processing* 35, 1996, pp. 323-331.
- [7] C.H. Li, and B.A. Finlayson, "Heat transfer in Packed beds: a reevaluation", *Chemical Engineering Science* 32, 1977, pp. 1055-1066.
- [8] D. Vortmeyer, and E. Haidegger, "Discrimination of three approaches to evaluate heat fluxes for wall-cooled fixed bed chemical reactors", *Chemical Engineering Science* 46, 1991, pp. 2651-2660.
- [9] A.G. Dixon, and D.L. Cresswell, "Theoretical prediction of effective heat transfer parameters in packed beds", *American Institute of Chemical Engineers Journal* 25, 1979, pp. 663-676.
- [10] H. Martin, and M. Nilles, "Radiale warmeleitung in durchstromten schuttungsrohren", *Chemie Ingenieur Technik* 65, 1993, pp. 1468.
- [11] M.G. Freiwald and W.R. Paterson, "Accuracy of model predictions and reliability of experimental data for heat transfer in packed beds", *Chemical Engineering Science* 47, 1992, pp. 1545-1560.
- [12] O.R. Derkx and A.G. "Dixon, Determination of the fixed bed wall heat transfer coefficient using computational fluid dynamics", *Heat Transfer Part A* 29, 1996, pp. 777-794.
- [13] B. Lloyd and R. Boehm, "Flow and heat transfer around a linear array of spheres", *Heat Transfer Part A* 26, 1994, pp. 237-252.
- [14] S.A. Logtenberg and A.G. Dixon, "Computational fluid dynamics studies of fixed bed heat transfer", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 37, 1998, pp. 7-21.
- [15] M. Nijemeisland and A.G. Dixon, "Comparison of CFD simulations to experiment for convective heat transfer in a gas–solid fixed bed", *Chemical Engineering Journal* 82, 2001, pp. 231–246.
- [16] Y.E. Kutsovsky, L.E. Scriven, H.T. Davis, "NMR imaging of velocity profiles and velocity distribution in bead packs", *Physics of Fluids* 8, 1996, pp. 863–871.
- [17] A. G. Dixon and M. Nijemeisland, "CFD as a Design Tool for Fixed-Bed Reactors", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40, 2001, pp. 5246-5254.
- [18] M. Arsalanfar, A.A. Mirzaei, H. Atashi, H.R. Bozorgzadeh, S. Vahid and A. Zare, "An investigation of the kinetics and mechanism of Fischer–Tropsch synthesis on Fe–Co–Mn supported catalyst", *Fuel Processing Technology* 96, 2012, pp. 150–159