

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ^[1-2]

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงในอัตราที่สูงขึ้นเนื่องจากสภาพเศรษฐกิจ และสังคมมีความเจริญก้าวหน้ามากขึ้น และราคาน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความต้องการใช้ที่มากขึ้นจากการที่ประเทศไทยมีความจำเป็นต้องนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศเป็นหลักทำให้ราคาน้ำมันในประเทศปรับตัวสูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาหาแหล่งพลังงานในรูปแบบอื่นเพื่อนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดิบ ซึ่งแหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจมากที่สุด คือ แหล่งพลังงานภายในประเทศ โดยจะอยู่ในลักษณะที่เป็นพลังงานหมุนเวียน มีแหล่งสำคัญ คือ ชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแฉังไม้สะดวกในการนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงแฉังให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้สะดวกขึ้น ซึ่งได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการแกสซิฟิเคชัน และกระบวนการเผาไหม้ เป็นต้น

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรม มีความอุดมสมบูรณ์สูง จึงมีชีวมวลอยู่มาก ซึ่งสามารถนำมาเปลี่ยนให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ปัจจุบันมีการปลูกอย่างกว้างขวาง แต่การนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดยังมีไม่มาก โดยเนื้อไม้ส่วนของลำต้น จะถูกนำไปทำเป็นเชื้อกระดาษ ส่วนเศษของลำต้นประมาณร้อยละ 30 จะถูกเผาเป็นถ่าน หรือเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการคาดการณ์ ถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มประโยชน์จากไม้ยูคาลิปตัส และเป็นการเอื้อประโยชน์แก่เกษตรกรที่ปลูกต้นยูคาลิปตัส ซึ่งปัจจุบันกำลังประสบปัญหาการขาดทุนเนื่องจากปริมาณการปลูกมากเกินไปแก่โรงงานที่ผลิตเชื้อในปัจจุบัน และที่สำคัญเป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้ง ที่มีปริมาณมากมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และเป็นประโยชน์แก่สังคมไทยในอนาคต ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนเป็นหลัก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาโดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิคไนต์ (Nickel loaded lignite) มาใช้ในกระบวนการแกสซิฟิเคชันของชีวมวล เนื่องจากนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างสูง และยังช่วยในเรื่องการแตกตัวของทาร์ไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้มีผู้วิจัยเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาบ้างแล้ว แต่ทั้งนี้ชนิดของชีวมวลที่แตกต่างกันพบว่า ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาโดยมุ่งเน้นใช้ชีวมวลเป็นไม้ยูคาลิปตัส และจี้เลื่อยโดยทำการแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมี ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิของการแกสซิฟาย อัตราส่วนโดยมวลของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ และอัตราการป้อนไอน้ำ ซึ่งทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลการแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัสผสมจี้เลื่อย และจี้เลื่อย เปรียบเทียบกับผลการศึกษายของยูคาลิปตัส และยังสามารถศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำอีกด้วย

1.2 พลังงาน และพลังงานทดแทน ^[3-4]

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ เป็นสิ่งจำเป็นของมนุษย์ในปัจจุบัน และทวีความสำคัญเพิ่มขึ้น เมื่อโลกพัฒนาไปมากขึ้น อีกทั้งเป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิตต่างๆ และมีความจำเป็นต่อคุณภาพชีวิต พลังงานถูกนำมาใช้เพื่อเติมเต็มให้กับชีวิตมนุษย์ การดำรงชีพต้องใช้พลังงานทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็นภายในบ้านพักอาศัย อาคาร ร้านค้า โรงงาน ซึ่งหมายถึงพลังงานจะถูกนำมาจากแหล่งต่างๆ เพื่อตอบสนองการใช้พลังงาน โดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามแหล่งที่มาได้แก่

1.2.1 พลังงานสิ้นเปลือง (Non-renewable energy)

พลังงานสิ้นเปลืองคือ พลังงานที่ใช้หมดแล้วไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ หรือหาทดแทน โดยธรรมชาติได้ทันความต้องการในเวลาอันรวดเร็ว ส่วนใหญ่มีอยู่ใต้พื้นดิน ต้องใช้เวลานานกว่าร้อยล้านปีที่จะสร้างขึ้นมามีอีกได้ และมีปริมาณจำกัด ชื่อที่ใช้แทนพลังงานกลุ่มนี้จึงมีทั้งพลังงานฟอสซิล และพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น พลังงานฟอสซิล (Fossil energy) ถ่านหิน น้ำมัน ปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติ หินน้ำมัน (Oil shale) เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear fuel) หรือแร่กัมมันตรังสี เป็นต้น

1.2.2 พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy)

พลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานที่ได้มาจากกระแสพลังงานที่ต่อเนื่องและเกิดซ้ำๆ ในสิ่งแวดล้อม เป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติรอบตัวเรา หามาใช้ได้ไม่มีวันหมด ซึ่งสามารถสร้างทดแทนได้ในช่วงเวลาสั้นๆ โดยธรรมชาติหลังจากมีการใช้ไป จึงมีหลายชื่อที่ใช้เรียกพลังงานทดแทน และพลังงานใช้ไม่หมด รวมถึงพลังงานสะอาดและพลังงานสีเขียว เนื่องจากไม่

ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมนั่นเอง พลังงานหมุนเวียนสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบเช่น พลังงานน้ำ พลังงานคลื่น (Wave energy) พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล (Bio-energy) พลังงานแก๊สชีวภาพ พลังงานขยะ และพลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen energy) เป็นต้น

ตาราง 1.1 ข้อดี – ข้อเสียของพลังงานสิ้นเปลืองและพลังงานหมุนเวียน

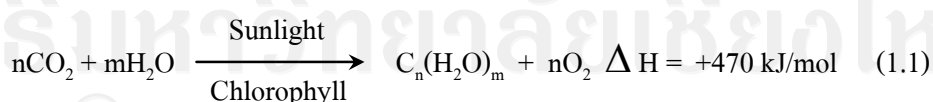
แหล่งพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
พลังงานหมุนเวียน	- สามารถหาได้ง่าย - สามารถผลิตพลังงานได้ตลอดเวลา เช่น พลังงานใต้พิภพ - ใช้ไม่มีวันหมด - นำมาผลิตไฟฟ้าได้ในราคาถูก เช่น พลังน้ำ - มีความเสถียรในเรื่องราคาพลังงาน - เป็นพลังงานสะอาด ไม่สร้างมลพิษทางน้ำ และไม่เกิดขยะของเสีย	- พบได้เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ - ไม่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง - ต้นทุนในตอนเริ่มต้นสูง - ต้องมีการเก็บสำรองวัตถุดิบไว้ ซึ่งไม่คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ - การเผาไหม้ของพลังงานชีวมวลที่ไม่ถูกวิธี อาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศได้
พลังงานสิ้นเปลือง	- สามารถผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง ไม่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของวัน สภาพอากาศ หรือฤดูกาล - นำมาผลิตไฟฟ้าได้ในราคาถูก มีความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ - นำมาผลิตไฟฟ้าจะได้พลังงานต่อหน่วยน้ำหนักราคาแพงมาก	- เป็นแหล่งพลังงานที่มีจำกัด และหาได้บางพื้นที่เท่านั้น เช่น น้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน - การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดมลพิษมากมาย เกิดภาวะโลกร้อน ปรากฏการณ์เรือนกระจก และภาวะฝนกรด - การขุดหรือระเบิดถ่านหิน หรือแร่ยูเรเนียม และน้ำมันรั่วจากการขุดเจาะ ส่งผลกระทบรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม

จากข้อดี – ข้อเสีย ของพลังงานสิ้นเปลืองและพลังงานหมุนเวียนในตาราง 1.1 งานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะนำชีวมวล ซึ่งมีราคาถูกและหาได้ง่ายในประเทศมาผ่านกระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตเป็นพลังงานทดแทนในอนาคตต่อไป ซึ่งประเทศไทยมีชีวมวลหลากหลายชนิด สามารถหาได้ง่าย ราคาไม่แพง คือ ชีวมวลประเภทไม้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของชีวมวลจะกล่าวในหัวข้อ 1.3

1.3 ชีวมวล (Biomass) ^[5-7]

ชีวมวล คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น การที่ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้เนื่องจากในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชได้ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสง เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ออกมาเป็นแป้ง และน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง จะได้พลังงานออกมาจากการเผาไหม้ องค์ประกอบของคาร์บอนที่พืชสะสมไว้

แหล่งพลังงานในชีวมวลประเภทจัดเป็นพลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้สะสมอยู่ภายใน แหล่งกำเนิดของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืชจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่างๆ ที่สามารถเผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้คือ คลอโรฟิลล์ และแสงอาทิตย์ โดยคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในพืชสีเขียวจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงขึ้นปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังสมการ



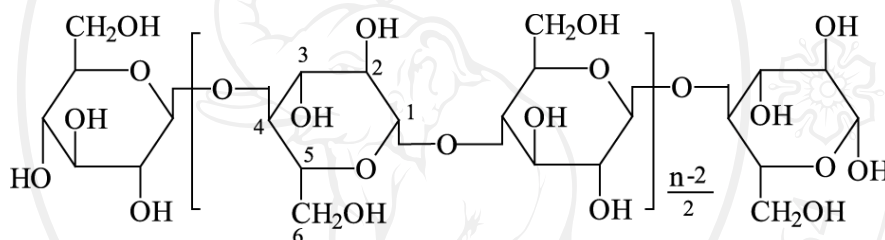
$\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ แสดงถึงสารประกอบอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอื่น ๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาการโบไฮเดรตประมาณ 1 ใน 4 จากการสังเคราะห์แสงจะถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยกระบวนการผ่นกลับได้ของการหายใจในพืชเพื่อให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต โดยส่วนที่เหลือจะถูกสะสมเอาไว้ในเนื้อไม้ ใบ ลำต้น และส่วนอื่นๆ ของพืช

1.3.1 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides)

1.3.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

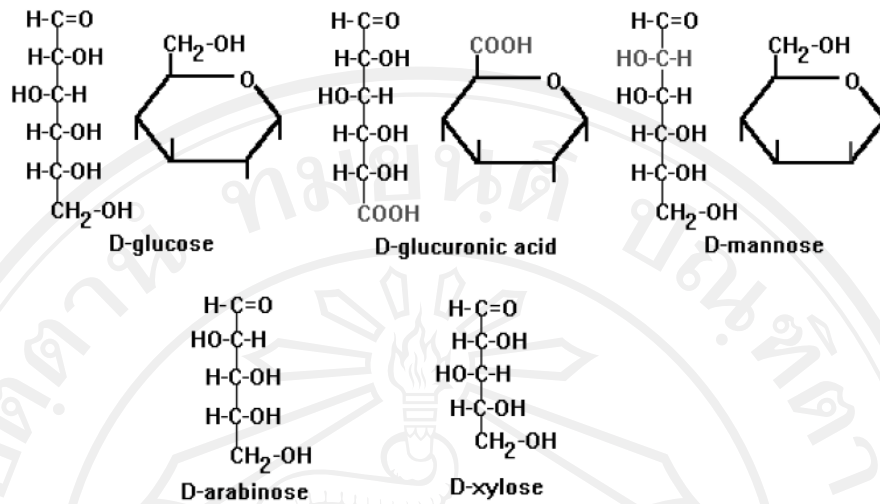
เซลลูโลสคือ เส้นใยของพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช และเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุด เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในไม้ ปอ และ ฟางข้าว มีคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของเซลลูโลสคือเป็นวัตถุที่ไม่ละลาย และไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังรูป 1.1



รูป 1.1 โครงสร้างของเซลลูโลส

1.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

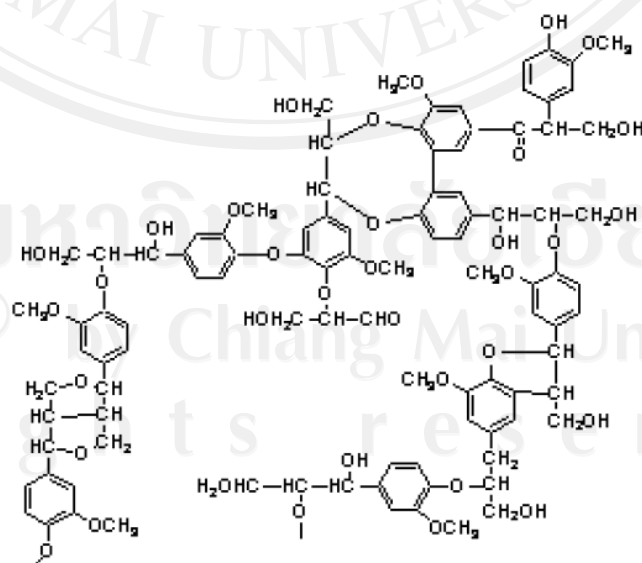
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอิสระที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส และมีมวลต่ำกว่ามาก เซลลูโลสส่วนใหญ่จะเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวพวกดี-กลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลายๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่มดังรูป 1.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างส่วนใหญ่จะคล้ายกับพวกเซลลูโลส ยกเว้นพวกพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย 50 - 200 หน่วย และต่อกันแบบกิ่งก้านสาขามากกว่าแบบเส้นตรง



รูป 1.2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

1.3.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในพืช ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรแมติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรง (Aliphatic chain) ดังแสดงในรูป 1.3 ซึ่งเห็นว่าลิกนินมีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการเป็นผนังเซลล์ของพืชที่เป็นเสมือนกาวยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช นอกจากนี้ลิกนินยังอยู่ในรูปอสัณฐานเช่นเดียวกับพวกเฮมิเซลลูโลส



รูป 1.3 โครงสร้างของลิกนิน

1.3.2 ยูคาลิปตัส

1.3.2.1 ประวัติความเป็นมาของไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัส คามัลดูเลนซิส เป็นไม้ชนิดหนึ่งในจำนวนมากกว่า 500 ชนิด ของสกุลยูคาลิปตัส เป็นไม้ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แพร่กระจายอย่างกว้างขวางทั่วประเทศออสเตรเลีย สามารถขึ้นได้ในที่ริมน้ำและที่ราบน้ำท่วมถึง ตลอดจนในบริเวณที่มีดินเหลว ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 650 มิลลิเมตรต่อปี รวมทั้งในพื้นที่ที่มีดินเค็มด้วย แต่จะไม่อดทนต่อสภาพดินที่มีกำมะถันจากหินปูน ในประเทศออสเตรเลียไม่นิยมปลูกไม้ยูคาลิปตัสชนิดนี้เท่าใดนัก เนื่องจากไม้ชนิดนี้ในถิ่นกำเนิดซึ่งเป็นป่าธรรมชาตินั้นรูปทรงลำต้นไม่ดี มีลักษณะคดงอและแตกกิ่งก้านมาก ประกอบกับมีไม้ยูคาลิปตัสชนิดอื่นให้เลือกมากกว่า 500 ชนิด และมีเป็นป่าธรรมชาติมากอยู่แล้ว

ไม้ยูคาลิปตัสที่นิยมปลูกนอกถิ่นกำเนิดของประเทศออสเตรเลียที่สำคัญๆ ได้แก่ ยูคาลิปตัส โรบัสต้า (*E. robusta*) ยูคาลิปตัส โกลบูลัส (*E. globules*) ยูคาลิปตัส เทอเร็ทคอร์นิส (*E. tereticornis*) ยูคาลิปตัส ยูโรฟิลล่า (*E. urophylla*) และยูคาลิปตัส คามัลดูเลนซิส (*E. camaldulensis*) ซึ่งล้วนแล้วแต่ได้เคยนำมาปลูกทดลองในประเทศไทยแล้วทั้งสิ้น สาเหตุที่ไม้ยูคาลิปตัส คามัลดูเลนซิส ได้รับความนิยมปลูกในท้องที่อื่นนอกประเทศออสเตรเลีย เช่น ประเทศสเปน โมร็อกโก บราซิล อาร์เจนตินา อูรุกวัย เคนยา ไนจีเรีย แทนซาเนีย ตุรกี อิสราเอล บังกลาเทศ ปากีสถาน อินเดีย และไทย เป็นต้น เนื่องจากไม้ชนิดนี้เมื่อนำไปปลูกนอกถิ่นกำเนิดแล้ว สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดี ในสภาพของดินแทบทุกประเภท แม้แต่ดินที่เป็นทราย และมีความแห้งแล้งติดต่อกันเป็นเวลานาน ตลอดจนรูปทรงของลำต้นสามารถปรับตัวให้สูงตรง และมีกิ่งก้านน้อย แตกต่างจากถิ่นกำเนิดเดิม ในประเทศออสเตรเลียนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ชนิดอื่นๆ ซึ่งปลูกในที่เดียวกัน

การปลูกไม้ยูคาลิปตัส ในประเทศไทย เริ่มปลูกครั้งแรก เมื่อปีพ.ศ. 2508 ซึ่งสามารถปรากฏเป็นหลักฐานได้ ภายใต้โครงการสำรวจวัตถุดิบเพื่อผลิตเยื่อกระดาษ โดยนำเมล็ดมาจากประเทศออสเตรเลีย และปลูกทดลองเพื่อคัดเลือกรุ่น และถิ่นกำเนิดในท้องที่จังหวัด เชียงใหม่ ศรีสะเกษ และกาญจนบุรี ปรากฏว่ายูคาลิปตัส คามัลดูเลนซิส สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด

1.3.2.2 ลักษณะทั่วไปของยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัส คามัลดูเลนซิส สามารถเจริญเติบโตได้ในทุกสภาพของดินแทบทุกประเภท ตั้งแต่ในที่ริมน้ำ ที่ราบน้ำท่วมบางระยะในรอบปี แม้แต่ที่เป็นดินทราย และมีความแห้งแล้งติดต่อกันเป็นเวลานาน พื้นที่ดินเลวที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 650 มิลลิเมตรต่อปี รวมทั้งพื้นที่ที่มีดินเค็ม ดินเปรี้ยว แต่จะไม่ทนทานต่อดินที่มีหินปูนสูง

1.3.2.3 ประโยชน์ของไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัสสามารถนำมาปลูกเป็นสวนป่า เจริญเติบโตดี ให้ผลผลิตสูงเมื่อเทียบกับไม้โตเร็วชนิดอื่น ในช่วง 1-2 ปีแรก สามารถปลูกพืชควบในพื้นที่สวนป่าแบบไร่สวนผสม หรือวนเกษตรได้ เช่น ปลูกตะขุง เพือก ถั่วลิสง สับปะรด ข้าวโพด ข้าว หนุ่ยากินี ฯลฯ ในระหว่างแถวของยูคาลิปตัส ซึ่งจากการวิจัยของนักวิชาการพบว่า พืชควบที่ปลูกให้ผลผลิตอยู่ในเกณฑ์ดี และยูคาลิปตัสไม่เป็นพิษเป็นภัยต่อพืชเกษตรที่ปลูกแต่อย่างใด

ไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการเหมือนกับพรรณไม้ชนิดอื่นๆ และสามารถจำแนกการใช้ประโยชน์ตามลักษณะต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การใช้ประโยชน์ก่อสร้างทั่วไป ไม้ยูคาลิปตัสแม้ว่าจะมีข้อตำหนิ เนื้อไม้บดงอ แต่ก็มีผู้นำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในประเทศออสเตรเลีย ไม้ยูคาลิปตัสคัมมัลเลนซิสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างสำหรับเป็นโครงสร้างบ้านเรือน และเป็นไม้หมอนรองรางรถไฟได้เป็นอย่างดี ไม้ชนิดนี้มีความแข็งแรงทนทานปานกลาง ความหนาแน่นของเนื้อไม้ประมาณ 0.6 นอกจากนี้ยังนำมาใช้ภายในโดยทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

2. การใช้ประโยชน์ด้านพลังงานเชื้อเพลิงในรูปฟืนและถ่าน ไม้ฟืนยูคาลิปตัสคัมมัลเลนซิส ขนาด 5 x 4 x 3 เซนติเมตร จำนวน 500 กรัม เมื่อนำไปเผาไฟในเตาอั้งโล่ขนาดกลาง ให้ปริมาณความร้อน 4,600 แคลอรีต่อกรัม สามารถทำให้น้ำในภาชนะ 3 ลิตรเดือดในเวลา 6.6 นาที ในขณะที่ฟืนลูกดินนาน 33 นาที และปริมาณเถ้าเหลืออยู่เพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนับว่าเป็นไม้ฟืนที่มีคุณภาพดีกว่าไม้ฟืนของพรรณไม้หลายชนิด เช่น ไม้กระถินยักษ์ ไม้กระถินณรงค์ ไม้สน ประติพัทธ์ ไม้เหล่านี้นำมาทำให้น้ำในภาชนะเดือดได้ 7-7.3 นาที ในขณะที่ฟืนลูกดินนาน 28-30 นาที และมีปริมาณเถ้าเหลืออยู่ 0.24-0.90 เปอร์เซ็นต์

3. การใช้ประโยชน์ด้านน้ำมันจากยูคาลิปตัส สามารถใช้ประโยชน์ทั้งด้านการแพทย์ การอุตสาหกรรม และน้ำมันหอมระเหย ในด้านการแพทย์น้ำมันยูคาลิปตัสสามารถใช้เป็นวัตถุขับและเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผลิตยาอมแก้ไอ ยาคุมแก้หวัด น้ำยาบ้วนปาก ยาสีฟัน น้ำมันทาถู และสบู่ นอกจากนี้ยังใช้ในน้ำยาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย น้ำมันยูคาลิปตัสสามารถสกัดจากรอยเปื้อน และใช้เป็นตัวทำละลายได้ดี ยูคาลิปตัสที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสไคเวส ยูคาลิปตัสโกโลบูลัส ยูคาลิปตัสโครวินก้า และยูคาลิปตัสยูมานิไอ

ในด้านอุตสาหกรรม การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการผลิตเมทอล ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อและเป็นตัวทำละลายอื่นๆ ยูคาลิปตัสที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสโกโลบูลัส ยูคาลิปตัสโพลีแบกเทีย ยูคาลิปตัสราดิอาต้า ยูคาลิปตัสสมิททิโอ เป็นต้น

ด้านน้ำหอม การใช้ประโยชน์ในด้านนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมน้ำม้นหอมระเหย เพราะยูคาลิปตัสเหล่านี้มีกลิ่นหอม โดยทั่วไปจะใช้ผสมลงไปในยาฆ่าเชื้ออื่นเพื่อปรับปรุงให้มีกลิ่นดีขึ้น ยูคาลิปตัสที่ใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสชิริโอโคร่า และยูคาลิปตัส สตายเจอร์นา เป็นต้น

4. การใช้ประโยชน์ในการย้อมสี สารที่อยู่ในเปลือก ใบ ดอก หรือตาดอกของยูคาลิปตัสสามารถให้สีต่างๆกันตั้งแต่ สีแดง สีส้ม สีเหลือง เป็นต้น การที่ทำให้เกิดสีต่างๆ กันนี้นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของยูคาลิปตัสเองแล้วยังขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ทำให้สีติดด้วย

จากประโยชน์ของยูคาลิปตัสที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่นำไม้ยูคาลิปตัสสายพันธุ์ ความัลดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) ซึ่งใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการแกสซิฟิเคชันเพื่อผลิตไฮโดรเจนซึ่งเป็นแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงจากฟอสซิล โดยใช้ส่วนที่เป็นกิ่งที่ถูกริดทิ้งออกจากลำต้นเพื่อให้ลำต้นตรง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละกิ่งประมาณ 1-2 นิ้วเป็นวัตถุดิบ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับไฮโดรเจนจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 1.4

1.4 ไฮโดรเจน^[8]

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพสิ่งแวดล้อม ไฮโดรเจนจัดเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดที่สุด เพราะเมื่อเผาไหม้แล้วให้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำ และออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งเกิดเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ซึ่งในผลิตภัณฑ์ไม่มีไฮโดรคาร์บอนหรือ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) และมีผลกระทบที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming)

แก๊สไฮโดรเจนมีลักษณะพิเศษหลายประการ เนื่องจากเป็นแก๊สโมเลกุลเล็กที่สุด ทำให้มีมวลที่เบาจึงต้องการปริมาตรในการกักเก็บสูงมาก การจุดติดง่าย มีช่วงความเข้มข้นที่ติดไฟได้กว้าง ในขณะที่เดียวกันมีค่าความร้อนต่อปริมาตรต่ำ แต่ต่อมวลสูง และสูงกว่าไฮโดรคาร์บอน 2.75 เท่า ไฮโดรเจนสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะได้ และต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำมากเพื่อกลายเป็นของเหลว (-253 องศาเซลเซียส) จึงไม่สามารถเก็บไฮโดรเจนในสถานะของเหลวได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงอนาคตในระยะยาว ไฮโดรเจนมีศักยภาพที่จะเป็นเชื้อเพลิงได้โดยเฉพาะเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหมุนเวียนได้ (Renewable energy) เพราะสามารถผลิตได้จากการแตกตัวของน้ำแล้วเก็บไว้ในรูปของพลังงานไฟฟ้า หรือในสารดูดซับบางชนิด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ

เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถผลิตไฮโดรเจนได้จากแหล่งเชื้อเพลิงหลายชนิด เช่น จากกระบวนการ แกสซิฟิเคชันของ ถ่านหิน ชีวมวล หรือสังเคราะห์จากแก๊สธรรมชาติ แต่การนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมยังต้องมีการพัฒนาและวิจัยอีกมาก โดยเฉพาะในการเก็บ และความปลอดภัยในการใช้

วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ต้องการผลิตไฮโดรเจนเป็นหลัก แต่เนื่องจากในกระบวนการแกสซิฟิเคชันจะมีผลิตภัณฑ์แก๊สหลักๆ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนเบา ซึ่งเมื่อนำแก๊สเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้ว ก็จะทำให้ค่าความร้อนค่อนข้างสูง นอกจากนี้ สามารถนำแก๊สที่ผลิตได้จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันไปผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ได้อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดของแก๊สสังเคราะห์จะกล่าวไว้ในหัวข้อ 1.5

1.5 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ^[9-10]

แก๊สสังเคราะห์ หรือ Synthesis gas เป็นชื่อที่ใช้เรียกแก๊สผสม ที่องค์ประกอบของ CO และ H_2 เป็นส่วนใหญ่ ในประเทศที่มีแก๊สธรรมชาติ เช่น สหรัฐอเมริกา และประเทศส่วนใหญ่ในยุโรป ใช้มีเทนในแก๊สธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ สำหรับประเทศญี่ปุ่น อิสราเอล และประเทศอื่นๆ ที่ไม่สามารถจัดหาแก๊สธรรมชาติได้ จะผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเนฟทา อย่างไรก็ตามโดยหลักการแล้ว สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้จากสารไฮโดรคาร์บอนทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันดิเซล น้ำมันเตา หรือยางมะตอย (Asphalt) นอกจากนั้น ยังสามารถใช้ถ่านหิน พีท ไม้ ของเหลือทางการเกษตร ของเสียจากชุมชน และวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเกือบทุกชนิดเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้

ถ่านหิน เป็นสารป้อนที่สำคัญในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1960 ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ใช้ถ่านหินผลิตแก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเชื้อเพลิง และสารเคมีในประเทศเยอรมนี โดยผ่านกระบวนการฟิสเชอร์-ทรอปส์ (Fischer-Tropsch) ซึ่งในปัจจุบันก็ยังใช้เทคโนโลยีในลักษณะเดียวกันนี้ นอกจากนี้ประเทศจีน ก็ผลิตแก๊สสังเคราะห์จากถ่านหินเช่นกัน โดยผ่านกระบวนการแกสซิฟิเคชัน การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้งานใดๆ ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนขององค์ประกอบในแก๊สนั้น เช่น ในปฏิกิริยาฟิสเชอร์-ทรอปส์ และการสังเคราะห์เมทานอล ใช้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมล CO/H_2 เท่ากับ 1/2 สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอรมิเลชัน (Hydroformylation) ผ่านกระบวนการออกโซ (Oxo process) ซึ่งผลิตแอลดีไฮด์จากโอเลฟิน ใช้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมล CO/H_2 เท่ากับ 1 และในกระบวนการผลิตแอมโมเนีย จากกระบวนการฮาเบอร์ (Haber process) ใช้แก๊สสังเคราะห์ ที่มี N_2/H_2 เท่ากับ 1/3 โดยไม่ใช่ CO เป็นต้น

แก๊สสังเคราะห์ที่เป็นแก๊สผสมของ H_2 และ CO สังเคราะห์ได้จากการนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือวัสดุที่มีไฮโดรเจน และคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มีเทน ถ่านหิน และชีวมวล เป็นต้น มาผ่านกระบวนการอุณหเคมี (Thermochemical process) แก๊สสังเคราะห์เป็นสารเคมีขั้นกลาง (Chemical intermediate) ที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ทางอ้อม ในกรณีที่ใช้มีเทน หรือไฮโดรคาร์บอนมาเป็นสารตั้งต้น แก๊สสังเคราะห์ผลิตผ่านกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ คือ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ (Steam reforming) และการออกซิไดส์บางส่วน (Partial oxidation)

1.5.1 การปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ (Steam reforming)

แก๊สสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตโดยใช้กระบวนการ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ โดยก่อนเข้ากระบวนการจะมีขั้นตอนการกำจัดกำมะถัน (Desulfurization) ในมีเทนตั้งต้น ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide) และทำที่อุณหภูมิ 360 ถึง 400 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว ระดับกำมะถันต้องน้อยกว่า 2 ppm เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ใช้ในกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ เสื่อมสภาพ หลังจากนั้นผสมมีเทนกับไอน้ำด้วยอัตราส่วนโดยโมล ไอน้ำต่อมีเทนในช่วง 2.5-3.5 แล้วผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์การปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (Reformer) ซึ่งบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni/Al_2O_3) ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ปฏิกิริยาการปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เกิดได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 35 บาร์ จึงต้องให้ความร้อนออกจากภายนอก ผลิตผลแก๊สที่ได้จากกระบวนการนอกจาก CO และ H_2 แล้วยังมี มีเทนที่ไม่ทำปฏิกิริยาอีกประมาณร้อยละ 7 CO_2 บางส่วน และ N_2 เล็กน้อย ไอน้ำที่ใส่เข้าไปมากเกินไปจะช่วยลดการเกิดถ่านโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากออกจากเครื่องปฏิกรณ์การปรับเปลี่ยนโครงสร้าง ผลิตผลแก๊สจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตัวที่ 2 ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และอาจผสมกับไอน้ำเพิ่มเติม โดยมีเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4/Cr_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มไฮโดรเจน และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของ CO/H_2 ให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอวเตอร์-แก๊สชิฟต์ (Water-gas shift reaction) หรือปฏิกิริยา (Shift reaction)



ในกรณีที่ต้องการแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโดยโมล CO/H_2 สูงอาจทำได้โดยป้อน CO_2 ในปฏิกิริยาซิฟท์ ในขณะที่สมดุลของปฏิกิริยาดำเนินไปด้านซ้ายของสมการ 1.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเป็นปฏิกิริยาผันกลับ ดังนี้



นอกจากนี้อัตราส่วนโดยโมล CO/H_2 ยังขึ้นอยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตั้งต้นอีกด้วย

1.5.2 การออกซิไดส์บางส่วน (Partial oxidation)

การออกซิไดส์บางส่วนเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ผลิตแก๊สสังเคราะห์ วัตถุดิบตั้งต้นอาจเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน หรือของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ในกรณีที่ใช้มีเทน โพรเพน หรือแนฟทา เป็นวัตถุดิบ จะถูกเผาด้วยเปลวไฟมีเทนในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่ประมาณร้อยละ 35 ของปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ตามทฤษฎี



น้ำที่เกิดขึ้นเล็กน้อยจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปกับวัตถุดิบที่มีในปริมาณมากเกินไป ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิไดส์บางส่วน คือ



อุณหภูมิของเปลวไฟอยู่ในช่วง 1,300-1,400 องศาเซลเซียส ความดัน 60-80 บาร์และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Residence time) 2-5 วินาที ปฏิกิริยาแรก (สมการ 1.6) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและให้ความร้อนออกมา ซึ่งสามารถใช้ขับเคลื่อนปฏิกิริยาดูดความร้อนในลำดับต่อมา (สมการ 1.7 และ

1.8) อย่างไรก็ดี เนื่องจากระบบมีลักษณะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีปัญหาก็เกิดเขม่าคาร์บอนขึ้น และปะปนกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกด้วยการล้างก่อนนำไปใช้

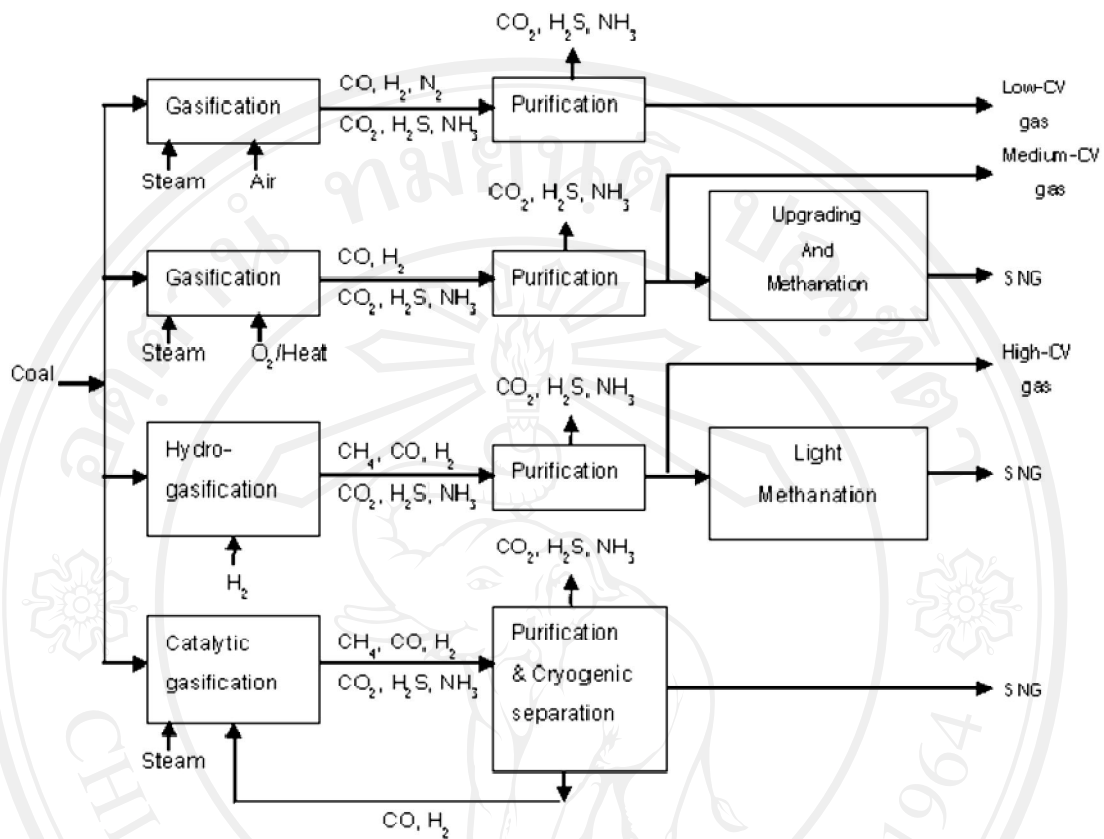
ข้อดีสำหรับการปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยการออกซิไดส์บางส่วน คือไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการกำจัดกำมะถัน เพราะกำมะถันในวัตถุดิบตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็น H_2S และ COS ส่วนสารประกอบไนโตรเจนที่เข้ามาในระบบ จะออกมาในรูป N_2 หรือแอมโมเนีย อย่างไรก็ดี ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยการออกซิไดส์บางส่วน จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพื่อลดความยุ่งยากในการแยก N_2 ออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ท้ายหลัง ดังนั้น โดยทั่วไปต้องสร้างโรงผลิตออกซิเจนสำหรับหน่วยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยการออกซิไดส์บางส่วนโดยเฉพาะด้วย ซึ่งทำให้กระบวนการนี้มีต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

1.6 แกสซิฟิเคชัน (Gasification) ^{[1],[10-11]}

กระบวนการแกสซิฟิเคชันเป็นการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการสลายโครงสร้าง และพันธะของเชื้อเพลิงแข็งต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.6.1 ทฤษฎีแกสซิฟิเคชัน

แกสซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยเป็นกระบวนการที่ใช้แปรรูปเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ไม้ หรือชีวมวลอื่นๆ ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ในแง่ของกระบวนการ หมายถึงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมถึงกระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแกสซิฟิเคชัน แสดงดังรูป 1.4



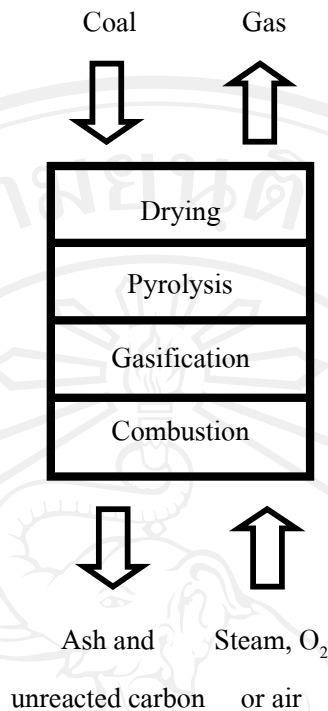
รูป 1.4 กระบวนการแกสซิฟิเคชันของถ่านหิน

กระบวนการแกสซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางความร้อน (Thermochemical conversion process) ได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอน กับออกซิเจน และ/หรือ ไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูง ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอน ทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) และปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) แก๊สเชื้อเพลิง ประกอบด้วย แก๊สผสมระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน เรียกว่าโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas)

โปรดิวเซอร์แก๊ส เกิดจากปฏิกิริยา การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) ของคาร์บอน (C) ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำไปเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H_2)

ลำดับการเปลี่ยนแปลง อาจแสดงได้โดยตัวอย่างของ Moving bed gasifier ดังแสดงใน

รูป 1.5



รูป 1.5 Moving bed gasifier

ถ่านหินเคลื่อนที่ลงมา ถูกทำให้แห้งด้วยแก๊สร้อนที่สวนทางขึ้นมาเมื่อเคลื่อนที่ต่อมา จะร้อนขึ้นจนเกิดการไต่สารระเหย และเข้าสู่ขั้นตอนไพโรไลซิส จากนั้นเมื่อเคลื่อนที่ต่อมาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเข้าสู่กระบวนการแกสซิฟิเคชัน ถือได้ว่าเป็นการแกสซิฟายชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สูง แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้

1.6.2 ปฏิริยาเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental Combustion Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศ หรือไอน้ำ ดังแสดงในตาราง 1.2 ปฏิริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ ได้

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 1.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน

ปฏิกิริยา	ลักษณะของ ปฏิกิริยา	ΔH		
		Cal/gmole	kJ/kgmole	Btu/lbmole
1. $C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-	94,410	408,632	169,938
2. $C + 1/2O_2 \longrightarrow CO$	-	27,056	123,092	48,701
3. $C + CO_2 \longrightarrow 2CO$	+	40,298	162,448	72,536
4. $CO + 1/2O_2 \longrightarrow CO_2$	-	67,355	285,540	121,239
5. $C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	+	32,454	118,905	58,917
6. $C + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2$	+	24,610	75,362	44,298
7. $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	-	7,844	43,543	14,119

หมายเหตุ

1. ปฏิกิริยาทดลองที่สภาวะ 1,200 เคลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮต์ 927 องศาเซลเซียส)
ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์
2. เครื่องหมายลบ (-) หมายถึงปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)
3. เครื่องหมายบวก (+) หมายถึงปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)

ปฏิกิริยาที่ 1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีออกซิเจนมากเกินไป เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 3 เรียกว่า Boudouard Reaction เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess carbon) ในอุณหภูมิของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยา (Reactivity) ของเชื้อเพลิงต่างๆ พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิง และลักษณะเฉพาะของผิว (Surface characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

ปฏิกิริยาที่ 4 จะเกิดขึ้นเมื่อออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์ จะรวมตัวกับออกซิเจนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 5 และ 6 เป็นกรณีที่ป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่ 5 เรียกว่า Water gasification

ปฏิกิริยาที่ 7 เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water gas shift reaction ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (Reversible)

1.6.3 ประเภทของกระบวนการแกสซิฟิเคชัน

1.6.3.1 สตีมแกสซิฟิเคชัน (Steam Gasification) ใช้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง ปกติอุณหภูมิของเตาจะสูงมาก และใช้ความดันในเตาสูง และต้องใช้ความร้อนจากภายนอกระบบมาช่วยให้อุณหภูมิของเตาสูงเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแกสซิฟิเคชัน แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-3.5 MJ/m³ หรือเรียกว่าการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนต่ำ เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ เกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



องค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustion component) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเจือจางอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน แก๊สจะมีอุณหภูมิเปลวไฟต่ำ ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าสำหรับความต้องการของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

1.6.3.2 ออกซิเดทีฟแกสซิฟิเคชัน (Oxidative Gasification) ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจนมาจากการใช้อากาศผ่านเข้าสู่เตา หรืออาจใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ได้ แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดจากการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีค่าความร้อน (Heating value) สูงกว่าแก๊สที่เกิดจากการใช้อากาศ เนื่องจากไม่มีไนโตรเจน จึงให้ค่าความร้อนสูงขึ้น องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

การผลิตแก๊สสังเคราะห์ระบบนี้จะได้ค่าความร้อนประมาณ $9.3-20.5 \text{ MJ/m}^3$ (250-550 Btu/SCF) หรือเรียกว่าการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนปานกลาง

1.6.3.3 ไฮโดรแกสิฟิเคชัน (Hydrogasification) ใช้ไฮโดรเจน ทำปฏิกิริยากับ เชื้อเพลิงแข็ง ความร้อนภายในเตาสูงมาก และใช้ความดันในเตาสูงถึง 20 เมกะปาสกาล แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นมีเทน ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ เทียบเท่ากับ Synthesis gas (SNG) ซึ่งจากแก๊สสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการ Methanation ที่อุณหภูมิต่ำ Catalytic process เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ ซึ่งเมื่อผ่านการทำให้แห้งก็จะได้แก๊ส ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สบริสุทธิ์

สิ่งที่สำคัญในกระบวนการแกสิฟิเคชันอีกอย่างหนึ่งก็คือ ชนิดของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 1.7

1.7 ชนิดของเตาปฏิกรณ์ ^{[1],[10]}

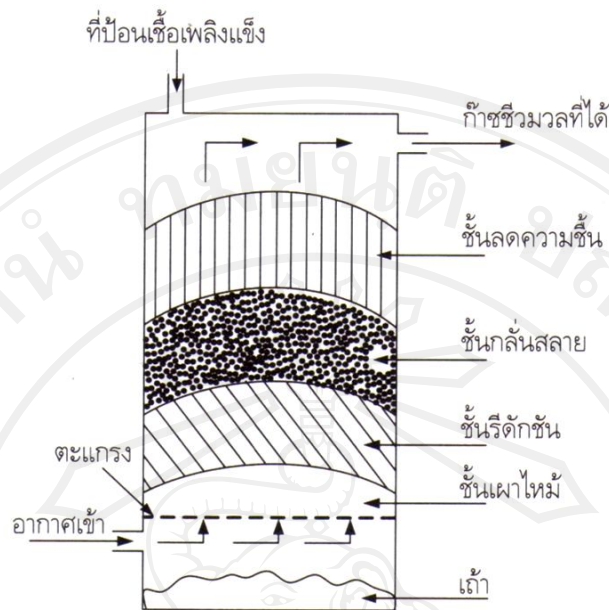
1.7.1 เตาแบบแก๊สไหลขึ้น (Up-draft gasifier)

เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรก และเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงจะเป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ แก๊สร้อนที่ผ่านจากบริเวณการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูง และถูกส่งไปยังบริเวณปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ได้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้นของชีวมวล และแตกตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลใหม่ที่เพิ่งป้อน แก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้นออกมา ทำให้แก๊สที่ออกจากเตาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูป 1.6

เตาประเภทนี้มีรูปแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมาก และแก๊สชีวมวลที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัดคือ แก๊สที่ผลิตได้จะมีผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมัน และทาร์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากบริเวณที่เกิดไฟโรไลซิส และกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นแก๊สที่ได้จากเตาประเภทนี้จึงเหมาะกับการเอาไปใช้กับหม้อไอน้ำ หรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร ซึ่งแก๊สที่ได้จะผสมกับอากาศและทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป เตาปฏิกรณ์ประเภทนี้เหมาะกับชีวมวลหลากหลายชนิด ง่ายต่อการเตรียมเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพสูง เพราะได้อุณหภูมิแก๊สออกต่ำ ติดตั้งง่ายและ

สะดวก แต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณทาร์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เพราะทาร์ที่ผลิตได้ในบริเวณไพโรไลซิสไม่ได้ผ่านปฏิกิริยาเผาไหม้ก่อนออก จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนของทาร์น้อย การกำจัดทาร์ที่ควบแน่นออกมาเป็นปัญหาใหญ่ของแก๊สฟายเออร์ประเภทนี้ การปรับการออกแบบบางอย่างสามารถลดปริมาณทาร์ได้ เช่น การดึงแก๊สที่ผลิตได้ออกที่เหนือบริเวณรีดักชัน อีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้คือ การเติมไอน้ำร้อนผสมเข้ากับอากาศเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา Water gas และจะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งการออกแบบมักจะรวมการสร้างไอน้ำไว้ในตัวเตาด้วย เพื่อใช้ในการแก้ปัญหานี้โดยเฉพาะ

เตาแบบแก๊สไหลขึ้นอาจจะออกแบบให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เศษเถ้ากลายเป็นของเหลว (Slagging) หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเศษเถ้า วิธีทั้ง 2 แบบต้องการตะแกรงที่แตกต่างกันออกไป สำหรับกรณีที่ต้องการให้เถ้าเหลว บริเวณการเผาไหม้ต้องทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเศษเถ้า เถ้าหลอมจะถูกปล่อยระบายออกตามช่องได้ บางครั้งหินปูน (Limestone) จะช่วยในการลดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า และค่าความหนืดลดลงซึ่งจะช่วยให้เกิดเถ้าหลอมได้ง่ายขึ้น ข้อดีของแบบเถ้าหลอม คือ อัตราการเกิดแก๊สสูงมากเพราะต้องใช้อากาศเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้สูงเพียงพอต่อการหลอมเหลวของเศษเถ้า การกำจัดเศษเถ้าทำได้ง่าย เถ้าหลอมที่ได้มีปริมาณคาร์บอนค้างอยู่น้อยมาก ซึ่งสามารถนำไปขายได้ แต่มีข้อเสีย เช่น อัตราการเกิดแก๊สที่สูงมากจะจำกัดขนาดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ได้ เนื่องจากปริมาณฝุ่นผงที่ออกไปกับการไหลของแก๊ส การกำจัดเถ้าหลอมทำให้ค่าบำรุงรักษาเตาสูงขึ้นจากความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนวัสดุผนังบ่อย การะการทำงานในระบบจำเป็นจะต้องต่อเนื่องและสม่ำเสมอ จึงจะได้สมรรถนะการทำงานที่ดี สำหรับกรณีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเศษเถ้า เตาจะมีตะแกรงไว้รองรับกองเชื้อเพลิงเหนือกองเก็บเศษเถ้า ซึ่งจะออกแบบมาให้เศษเถ้า ซึ่งจะออกแบบมาให้เศษเถ้าเคลื่อนตัวลงสู่กองเก็บเถ้าด้านล่างได้ดี และในขณะเดียวกันจะป้องกันไม่ให้ถ่านชาร์ตออกไป ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในเตาจะถูกออกแบบให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมตัวของเถ้าทุกจุด แต่ในทางปฏิบัติก็อาจมีการเกาะตัวเป็นก้อนได้ ซึ่งจะเกิดปัญหากับชีวมวลที่มีส่วนประกอบของเศษเถ้ามาก ฉะนั้นในการออกแบบตะแกรงอาจมีกลไกไว้สำหรับทุบบีบก้อนเศษเถ้าที่เกาะตัวกันให้แตกออก อีกประการหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การมีชั้นเศษเถ้าเหนือตะแกรงตลอดเวลาเพื่อป้องกันตะแกรงซึ่งหากชั้นถ่านหนาเกินไปจะทำให้ความดันตกคร่อมสูง และอัตราการสร้างแก๊สต่ำ หากชั้นเถ้าบางเกินไปอาจจะทำให้เกิดความร้อนสูงเกินในตะแกรงจนเกิดการหลอมละลายได้

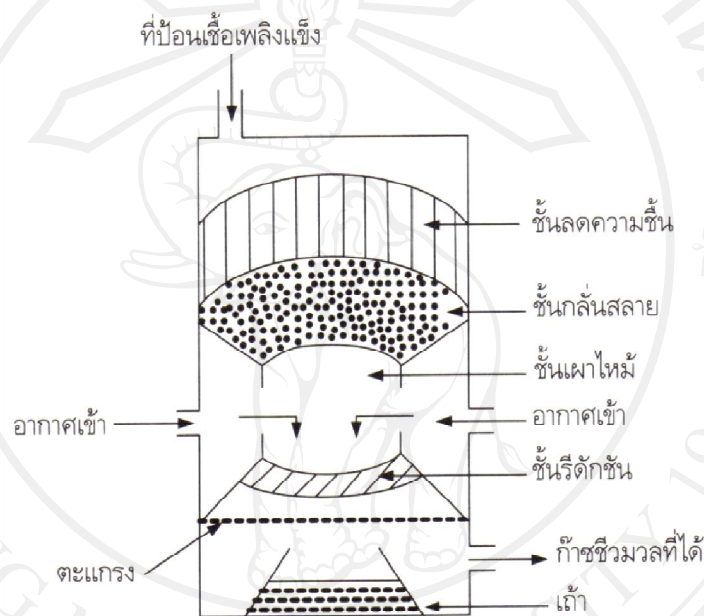


รูป 1.6 ลักษณะของเตาแบบแก๊สไหลขึ้น

1.7.2 เตาแบบแก๊สไหลลง (Downdraft gasifier)

เตาประเภทนี้ดังแสดงในรูป 1.7 ออกแบบขึ้นมาเพื่อกำจัดทาร์ที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง โดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตาผ่านกลุ่มของหัวฉีดที่เรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่าง และผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนที่อยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้ จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และไอของทาร์ที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้ทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิช่วงระหว่าง 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิริยาควบคุมความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของทาร์ และน้ำมันที่มีปริมาตรลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของทาร์ และน้ำมันเตาที่ได้จากเตาแบบแก๊สไหลขึ้น และแก๊สที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลงเตาแบบแก๊สไหลขึ้น และไหลลงจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และถ่านจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณถ่านถ่านติดออกมากับแก๊สเชื้อเพลิงน้อยมาก เตาปฏิกรณ์แบบแก๊สไหลลง ไอของทาร์จากไพโรไลซิสจะต้องผ่านบริเวณการเผาไหม้จึงถูกทำให้สลายตัวทางความร้อน เตาประเภทนี้ออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดลดแคบลงโดยมีการป้อนอากาศเข้าเหนือจุดพื้นที่หน้าตัดที่

แคบที่สุดที่เรียกว่าคอคอด (Throat) เพื่อกำหนดให้เกิดบริเวณผ่านร้อนแดงแคบๆ ที่บังคับให้แก๊สจากไฟโรไลซิสผ่าน ยิ่งบริเวณคอคอดลดลงมากจะยิ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้เพิ่มสูงขึ้นภายในขอบเขตจำกัดระดับหนึ่งแต่หากคอคอดเล็กเกินไป จะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมาก ซึ่งจะกีดขวางการไหลของก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลหากมีขนาดไม่เหมาะสม ฉะนั้นการออกแบบจึงต้องพยายามให้มีช่องคอคอดที่ขนาดพอเหมาะ เพื่อไม่ให้มีปัญหาของการไหลหรือความดันตกคร่อม โดยอุณหภูมิที่บริเวณเผาไหม้ต้องรักษาระดับให้สูง



รูป 1.7 ลักษณะของเตาแบบแก๊สไหลลง

รูป 1.7 แสดงแผนภาพของบริเวณออกซิเดชันด้านหน้าของท่อป้อนอากาศรอบผนัง บริเวณระหว่างท่อติดกับผนัง และบริเวณตรงกลางเตาจะเป็นจุดที่ออกซิเจนไปไม่ถึง ทำให้มีอุณหภูมิต่ำ ฉะนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์จากไฟโรไลซิสที่ผ่านบริเวณนี้จะไม่เกิดการเผาไหม้ แต่อาจจะมีการสลายตัวทางความร้อนได้สมบูรณ์ (Complete reforming) ระบบที่ใช้ท่อป้อนอากาศรอบผนังจึงมีโอกาที่จะปล่อยไอของทาร์ออกมาได้มากกว่าระบบที่ใช้ท่อป้อนอากาศตรงกลางซึ่งมีโซนออกซิเดชันตรงคอคอดดี และครอบคลุมกว่า อย่างไรก็ตามระบบที่มีท่อป้อนอากาศตรงกลางจะขวางการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวล และอาจจะเพิ่มการเกิดปัญหาการกีดขวาง (Bridging) ในคอคอดได้ส่งผลให้ชั้นเชื้อเพลิงหลวม มีช่องให้แก๊ส และไอของทาร์เล็ดลอดไปได้ โดยไม่เกิดปฏิกิริยาแตกตัว การเปลี่ยนแปลงขนาดคอคอดและตำแหน่งของท่อป้อนอากาศจะส่งผลอย่างมากต่อองค์ประกอบของ

แก๊สที่ได้ และปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้น รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพ ของเชื้อเพลิงชีวมวล และภาระโหลด ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์ลองผิดลองถูก เตาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกว้างจะต้องการการป้อนอากาศที่ความเร็วสูง หรือใช้วิธีการอื่นที่ช่วยจ่ายอากาศไปให้ลึกถึงกลางชั้นเชื้อเพลิง ซึ่งอาจทำให้เกิดความดันตกคร่อมสูงด้วย จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถใช้เตาขนาดใหญ่เกินไปได้

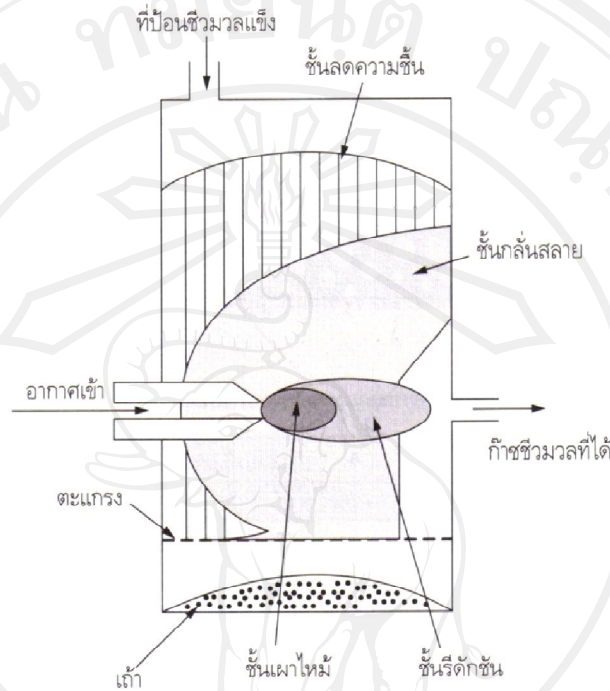
ส่วนของเตาที่เป็นโลหะที่อยู่ใกล้บริเวณคอกอด จะต้องมีการป้องกันความเค้นเชิงความร้อน (Thermal stress) เพราะอุณหภูมิสูงสุดในส่วนนี้อาจมีค่าถึง 1,300 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ควรเป็นโลหะผสมของโครเมียมและนิกเกิลสูง หากเกิดการเสียหาย (Defect) กับเตาก็ต้องเปลี่ยนทั้งหมด การออกแบบเตาควรแบ่งเป็นส่วนๆที่สามารถแยกออกเปลี่ยนเฉพาะส่วนได้ ตัวอย่างเช่น เตารูปวี (V-hearth) ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเตาที่เชื่อมต่อกันเป็นรูปทรงกรวยตัดสองอัน ปลายชี้เข้าหากัน โดยบริเวณยอดกรวยเชื่อมกันจะเป็นวงคอกอด ซึ่งปกติจะมีวงแหวนเหล็กสวมไว้ เมื่อเริ่มทำงานสร้างแก๊สเชื้อเพลิง ชั้นเศษถ่านจะก่อตัวรอบๆพื้นผิววงคอกอดเตา ป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนเกินต่อวัสดุ ในส่วนล่างของเตาบริเวณรีดักชัน ปกติจะต้องการให้แก๊สมีเวลาอยู่ในบริเวณนี้มากๆ ซึ่งทำได้โดยการลดความเร็วของแก๊ส โดยการค่อยๆขยายพื้นที่หน้าตัดให้ใหญ่ขึ้น การไหลของอากาศผ่านท่อป้อนอากาศจะไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัด หากต้องการความสม่ำเสมอ สามารถทำได้โดยปล่อยอากาศเข้าทางด้านบนเหนือชั้นเชื้อเพลิงไหลลงมาสู่บริเวณด้านล่างเพื่อทำปฏิกิริยา เตาลักษณะแบบนี้เรียกว่าเตาแกนเปิด (Open core) ไม่มีคอกอด จึงไม่มีปัญหาการไหลของเชื้อเพลิง

เตาแก๊สไฟเบอร์แบบแก๊สไหลลงจะไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีเศษถ่านมาก เพราะสแลก (Slag) หรือเศษถ่านหลอมที่เกิดขึ้นจากบริเวณออกซิเดชันจะไหลลงด้านล่าง เย็นตัวลง และแข็งเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว และจะกีดขวางทางการไหลของแก๊ส และเชื้อเพลิง หากจำเป็นต้องใช้กับเชื้อเพลิงที่มีเศษถ่านมากจะต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของเศษถ่าน และใช้ตะแกรงที่ทนหรือขยับได้ ในเตาปฏิกรณ์แบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการฉีดไอน้ำเข้าไป เพราะปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงมีเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอยู่แล้ว

1.7.3 เตาแบบแก๊สไหลขวาง (Cross-draft gasifier)

เตาประเภทนี้แสดงดังรูป 1.10 อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ บริเวณการเผาไหม้จะอยู่ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณการเกิดรีดักชัน แล้วแก๊สชีวมวลจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงรอบเตาซึ่งอยู่ในแนวตั้งโดยรอบ ไอสารระเหย และทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสจะผ่านบริเวณรีดักชันอุณหภูมิสูงก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งทำให้น้ำมันและทาร์เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อน ทำให้แก๊สชีวมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันและทาร์ต่ำ เตาแบบนี้

ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้กับยานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีผลตอบสนองเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับเตาเผาแบบนี้ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง



รูป 1.8 ลักษณะของเตาแบบแก๊สไหลขวาง

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลลง 2 ขั้นตอน (Downdraft two - stage fixed bed gasifier) โดยในขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการไล่สารระเหยที่อยู่ในชีวมวลออกมา เพื่อไปทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนที่ 2 ในขั้นตอนนี้จะใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ ซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปางเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Supporter) เนื่องจากมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี หาได้ง่าย และราคาถูก ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยสังเขปมีดังหัวข้อ 1.8

1.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี^[12-13]

1.8.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. **ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst)** เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น โดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว

2. **ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst)** เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ จะอยู่ในรูปแก๊ส และของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม

การเกิดปฏิกิริยา โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบ เนื้อผสมนี้ เนื่องจากความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุ (Supporter) ที่มีรูพรุนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเสื่อมสภาพลง จะต้องมีการกระบวนการปรับสู่สภาพเดิมอีกเป็นระยะๆ เรียกว่า Regeneration

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เคลือบบนผิววัสดุที่มีความพรุนสูง (High porosity) จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

- การถ่ายโอนมวลสารจากของไหลภายนอกไปยังผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Mass transfer through external boundary layer)
- การแพร่มวลสารเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Diffuse into pores)
- การดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Chemisorption)
- การเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Reaction)
- ผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลุดจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Desorption of products)
- ผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากรูพรุน (Diffusion of products out of pores)
- การถ่ายโอนมวลสารของผลิตภัณฑ์ออกสู่ของไหล (Mass transfer back to bulk fluid)

1.8.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ (Metal supported catalysis)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สนใจ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า (Forward rate) พร้อมกันกับเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reverse rate) ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่สนใจเข้าสู่สมดุลเคมีได้เร็วขึ้น โดยไม่มีผลต่อสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ของปฏิกิริยาเนื่องจากเป็นสมดุลเคมีเดียวกัน

ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิว ความมีรูพรุน ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว ความสามารถในการด้านการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้ในปฏิกิริยาบางชนิด บางชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฉพาะโลหะอย่างเดียวอาจไม่สามารถทำหน้าที่ได้ดี

ถึงแม้ว่าจะทำได้แต่ก็ไม่คุ้มกับการลงทุน จึงมีการนำเอาสารชนิดหนึ่งมาใช้ เรียกสารเหล่านี้ว่าตัวรองรับ (Supporter)

ข้อดี หรือข้อได้เปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดที่มีตัวรองรับ ได้แก่

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดการ หรือเตรียมขึ้นได้ง่าย และปลอดภัย
2. สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และถ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวแล้วตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังสามารถนำมาใช้ได้อีกโดยวิธีการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะ สามารถแยกจากกันได้ดีเป็นอย่างดีโดยการกรองแบบซินเทอริง (Sintering)

สำหรับข้อดีอื่น ๆ นั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา อันได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ และสารที่ใช้เป็นตัวรองรับ

ตัวรองรับแต่ละชนิดที่นำมาใช้ต้องมีสมบัติตามข้างต้นมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของตัวรองรับ จึงแล้วแต่ผู้ที่จะนำไปใช้ด้วยว่า จะยอมรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไหนในปฏิกิริยานั้นๆ ตัวรองรับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ อลูมินา ซิลิกา และถ่านกัมมันต์

สิ่งที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับที่ต้องมีอยู่คือ ความสามารถในการต้านทานภาวะการรวมตัว อันเนื่องมาจากความร้อน อนุหมูมิที่โครงร่างผลึก (Lattice) เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่า อนุหมูมิฮัตติก (Huttig temperature) มีค่าประมาณ 0.3 ของจุดหลอมเหลวของโลหะ อนุหมูมิแทมแมน (Tamman's temperature) เป็นอนุหมูมิที่ผลึกเริ่มเคลื่อน มีค่าประมาณ 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวของโลหะ

1.8.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal)

ถ่านกัมมันต์เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นหลัก มีความพรุน และพื้นที่ผิวสูง สามารถผลิตได้จากชีวมวล เช่น กะลามะพร้าว ไม้ไผ่ มักมีความเป็นขี้ดำ หรือไม่มีขี้ดำ แม้ว่าการใช้คาร์บอนในปัจจุบัน จะเป็นการดูดซับ ตัวกรอง และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของยาง และอื่นๆ

ถ่านกัมมันต์เตรียมได้จากการให้ความร้อนวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอน เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อกำจัดน้ำและสารระเหยได้ ให้หลุดออกไป นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลอินทรีย์ ผลที่ได้วัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนหลัก แต่ยังมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆอยู่ หลังจากนั้นจึงนำมากัมมันต์ (Activate) ซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการใช้สารเคมี การออกซิไดส์โดยใช้ น้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ (นิยมเรียกว่าการกัมมันต์ทางกายภาพ) การใช้สารเคมี คือการใช้สารที่มีสมบัติเป็นตัวดึงน้ำที่ดี (Strong dehydrating agent) เช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ผสมกับวัสดุตั้งต้น แล้วจึงให้ความร้อนในช่วง

ประมาณ 500 – 800 องศาเซลเซียส อีกวิธีหนึ่งคือการกัมมันต์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไอน้ำ หรือคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเปิดรูพรุนที่มีอยู่และเพิ่มพื้นที่ผิวโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า คือ ประมาณ 800 – 1000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์อาจจะประกอบด้วยออกซิเจนประมาณร้อยละ 10 โดยมวล ซึ่งอาจจะจับอยู่ที่ผิวหน้าในรูปคีโตน ไฮดรอกซิล หรือกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างไปจากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยในสภาวะของการรีดิวซ์ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อาจมีค่าสูงถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม

การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับนั้น จะใช้กับปฏิกิริยาที่ถ่านกัมมันต์จะไม่มีผลกระทบจากสภาวะของการทดลอง ส่วนใหญ่จะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ยกเว้นการล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมแต่ส่วนที่เป็นสารว่องไวสามารถนำกลับคืนมาได้โดยการเผาตัวรองรับถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นคาร์บอนออกไป ดังนั้นถ่านกัมมันต์มักใช้เป็นตัวรองรับสำหรับโลหะมีตระกูล หรือปฏิกิริยาที่ต้องการใช้คาร์บอนเป็นตัวดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์

1.9 การกำจัดทาร์^{[1],[12]}

ทาร์เป็นของผสมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน ควบแน่นได้ มีลักษณะข้น เหนียว สีดำ ติดไฟได้ องค์ประกอบภายในทาร์ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่นำมาเผาไหม้ โดยปกติทาร์เป็นผลผลิตจากกระบวนการแกสซิฟิเคชันของชีวมวล หรือถ่านหิน ทาร์เป็นปัญหามากในการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปใช้ เนื่องจากสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ นำไปสู่การอุดตันกีดขวางเส้นทางการไหลของระบบ และเกาะติดตัวกรอง และเครื่องยนต์ได้

การกำจัดทาร์ สามารถทำได้ 2 ช่วงคือ ช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งแต่ละช่วงมีวิธีการย่อยๆ ดังนี้

ช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา

1. การใช้สภาวะทำงานที่เหมาะสม
2. การใช้วัสดุเติมพิเศษ
3. การออกแบบเตาที่เหมาะสม

ช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา

1. การดักจับทางกายภาพ
2. การแตกตัวด้วยความร้อน
3. การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา
4. การแตกตัวด้วยพลาสมา

1.9.1 การกำจัดทาร์ระหว่างปฏิกิริยา

1.9.1.1 การใช้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม ตัวแปรที่มีผลสำคัญยิ่งต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ และปริมาณทาร์ในกระบวนการแกสซิฟิเคชัน คือ อุณหภูมิ ความดัน ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ชนิด และลักษณะของชีวมวล แก๊สตัวกลางที่ใช้ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอื่นๆ โดยปกติ อุณหภูมิทำงานของกระบวนการที่ใช้จะมากกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีทาร์น้อย ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มอะโรมาติกจะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิทำงานส่งผลเสียต่อค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง การใช้ถ่านชาร์ให้หมด (Char conversion) และเสี่ยงต่อการเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ทาร์จะถูกกำจัดหากทำงานที่ความดันสูง และที่อัตราส่วนสมมูลสูงขึ้นแก๊สตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการแกสซิฟิเคชันนอกจากอากาศแล้ว ออกซิเจน ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ก็ถูกนำมาใช้และชนิดของตัวกลางมีผลต่อการเกิดน้ำมันดิน

1.9.1.2. การใช้วัสดุเติมพิเศษ การเติมวัสดุจำพวกตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น นิกเกิล โคบอลต์ แมกนีเซียม ซีโอไลต์ โอลิวัน และเหล็ก หรือวัสดุอื่น เช่น หินปูนลงไปบนชั้นเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาและการกำจัดน้ำมันดิน ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อส่วนประกอบของแก๊สและค่าความร้อนของแก๊สแล้ว ยังมีผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันดิน และอาจจะลดแนวโน้มการเกาะตัวของชั้นวัสดุที่จะไปขวางการไหลได้ด้วย โลหะออกไซด์อื่นๆ ที่มีการทดลองใช้ ได้แก่ V_2O_5 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO , NiO , CuO , MoO_3 เป็นต้น วัสดุชนิดอื่นที่หาได้ง่าย คือ ถ่านชาร์ ซึ่งใช้ในการแตกตัวขึ้นสอง แต่ตัวมันเองก็จะถูกทำปฏิกิริยาสลายไปด้วย สามารถสรุปได้ว่าการใช้วัสดุพิเศษเติมไปในเตาปฏิกรณ์จะมีผลดังนี้

- เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สเชื้อเพลิง
- เกิดการลดลงของทาร์ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการด้วย
- เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจน
- เกิดการลดลงของคาร์บอนมอนอกไซด์ และเกิดการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อแก๊สมีเทน
- มีปัญหาการหมดสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และการเกิดฝุ่นผงมาก

1.9.1.3. การออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสม การออกแบบเตาปฏิกรณ์มีผลต่อกระบวนการ โดยเฉพาะในด้านประสิทธิภาพ ค่าความร้อนของแก๊ส และการเกิดน้ำมันดิน การปรับแต่งเตาสามารถทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่สะอาดได้ ตัวอย่างในการพยายามปรับแก้ เช่น

- การฉีดอากาศช่วงที่ 2 ในเตา
- ปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน

- การหมุนเวียนแก๊สภายใน

1.9.2 การกำจัดทาร์หลังปฏิกิริยา

1.9.2.1. การดักจับเชิงกล เป็นการดักจับน้ำมันดินเชิงกล เช่น การใช้ลมวนไซโคลน ชุดกรองแบบต่างๆ การแยกอนุภาค การใช้เครื่องดักไฟฟ้าสถิต หรือการดักด้วยสกรับเบอร์ โดยใช้ร่วมในการดักจับฝุ่นเขม่าด้วย วิธีเหล่านี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง สามารถดักได้เป็นที่น่าพอใจ และมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นเพียงการกำจัดน้ำมันดินโดยการดักจับและแยกออกไปเท่านั้น ไม่ได้ทำลายโครงสร้างภายในแต่อย่างใด แต่มีราคาในการลงทุนค่อนข้างสูง และอาจจะเป็นปัญหาในการกำจัดของเสีย

1.9.2.2. การแตกตัวด้วยความร้อน ในวิธีการทำให้ทาร์แตกตัวด้วยความร้อน จะให้ความร้อนกับแก๊สที่ได้จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงที่โมเลกุลของทาร์แตกตัวเป็นแก๊สเบา การทำให้แตกตัวสามารถเกิดขึ้นได้ดีหากเพิ่มเวลาของปฏิกิริยา หรือให้สัมผัสกับพื้นผิวร้อนโดยตรง หรือส่งเสริมให้เกิดการออกซิเดชันบางส่วนโดยการเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปผสม ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันดินจะสูง หากทำการแกสซิฟายที่อุณหภูมิสูงถึง 1,250 องศาเซลเซียส และมีเวลา 0.5 วินาที

1.9.2.3. การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ทาร์แตกตัวเป็นที่สนใจมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาเคมีสลายทาร์ กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น หรือปรับปรุงส่วนประกอบในแก๊สเชื้อเพลิงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดทาร์ที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- มีประสิทธิภาพในการกำจัดทาร์
- สามารถแปลงมีเทนได้ หากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นแก๊สเชื้อเพลิง
- สามารถปรับสัดส่วนที่เหมาะสมจากกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ตามต้องการ
- มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเกาะตัว และเกิดการอุดตันจากเขม่าถ่าน

ได้ดี

- สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ และนำมาใช้ใหม่ได้อีก หลังจากผ่านกระบวนการแล้ว
- ควรมีความแข็งแรง คงทน
- ราคาไม่แพง

โดยปกติแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล (Ni-based catalyst) เป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสำหรับการแปลงเนฟทา และมีเทน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิลสามารถทำลายทาร์ โดยมีประสิทธิภาพในการสลายทาร์มากกว่าร้อยละ 90 และมีการเกิดไฮโดรเจนมากขึ้นจากเดิม หากมีการเพิ่มอุณหภูมิ จะเกิดไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้น และลดการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น CH_4 และ C_2H_4

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากโลหะแอลคาไล (Alkali) นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฐานจากนิกเกิล ได้มีการนำโลหะแอลคาไลมาประยุกต์ใช้ในการสลายน้ำมันดิน เช่น กลุ่มคาร์บอนेट กลุ่มออกไซด์ และกลุ่มไฮดรอกไซด์ของโลหะแอลคาไล สามารถทำให้น้ำมันดินแตกตัวระหว่างปฏิกิริยาแกสลิฟเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ (Dolomite) คือสารแร่กลุ่มแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไปเป็น $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ปกติโดโลไมต์ จะใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตแมกนีเซียม เมื่อเร็วๆ นี้มีการค้นพบว่าโดโลไมต์มีประสิทธิภาพสูงในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดทาร์ออกจากกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล

4. การแตกตัวด้วยพลาสมา นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มได้ทดลองพบว่าสารประกอบอินทรีย์สามารถถูกทำให้สลายได้ง่ายโดยกระแสไอออนโคโรนา หรือพลาสมา โดยอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับโมเลกุลแก๊ส ทำให้เกิดสารอนุมูลที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขึ้น และเข้าทำปฏิกิริยาในการแตกตัวทาร์อย่างรวดเร็ว

1.10 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ^[14] ได้ศึกษากระบวนการแกสลิฟเคชันของชีวมวลที่อุณหภูมิต่ำ ภายใต้การใช้ นิกเกิลบนถ่านชาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง 2 ชั้นตอน โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านชาร์ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และมีปริมาณของ นิกเกิลอยู่ที่ ร้อยละ 8.3 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสำหรับ กระบวนการแกสลิฟเคชันในช่วงอุณหภูมิ 450 – 650 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงถึง 16.6 เท่าของผลิตภัณฑ์แก๊สรวม

Franco และคณะ^[15] ศึกษาอิทธิพลของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการแกสลิฟเคชันด้วย ไออน้ำของชีวมวลในเครื่องผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไซ์เบด ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 700 – 900 องศาเซลเซียส โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง คือ สน ต้น โอ๊ค และยูคาลิปตัส พบว่าที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของไอน้ำกับชีวมวลเป็น 0.6 – 0.7 มวลต่อมวล ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนมาก และมีไฮโดรคาร์บอน และน้ำมันทาร์น้อย โดยค่าความร้อนปานกลางอยู่ในช่วง

16 – 19 kJ/Nm³ และพบว่าที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ของดีนไธค และยูคาลิปตัส ส่วนอุณหภูมิ 830 – 900 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา Boudouard เหนือกว่าปฏิกิริยา Water gas shift

Pengmei และคณะ^[16] ศึกษากระบวนการแกสซิฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้ อากาศ และไอน้ำร่วมกันในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนของไอน้ำกับชีวมวล (S/B) สัดส่วนอากาศต่างๆ กัน (Equivalence ratio, ER) และขนาดอนุภาคของชีวมวล เพื่อหาผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ การย่อยสลายด้วยไอน้ำ (Steam decomposition) ค่าความร้อนต่ำ (Low heating value, LHV) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน โดยการทดลองที่สภาวะต่างๆ ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สอยู่ในช่วง 1.43 ถึง 2.57 Nm³/kg biomass และค่าความร้อนต่ำของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 6741 ถึง 9143 kJ/Nm³ และจากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ได้แก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำให้ได้ค่าความร้อนต่ำลง และพบว่าชีวมวลที่มีขนาดเล็ก ให้ผลิตภัณฑ์แก๊ส และค่าความร้อนต่ำที่สูงขึ้น ซึ่งการศึกษานี้ยืนยันได้ว่า การใช้ไอน้ำในกระบวนการแกสซิฟิเคชันให้แก๊สที่มีคุณภาพมากกว่าการใช้อากาศในกระบวนการแกสซิฟิเคชัน

Kumabe และคณะ^[17] ได้ทำการศึกษากบวนการแกสซิฟิเคชันด้วยอากาศและไอน้ำเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ชีวมวล คือ ไม้สนญี่ปุ่น (Japanese cedar) ผสมร่วมกับ ถ่านหิน Mulia จากประเทศอินโดนีเซีย ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed gasifier) โดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 1173 เคลวิน (900 องศาเซลเซียส) ในการทดลองนี้ได้ทำการแปรผันอัตราส่วนของชีวมวลจาก 0 ถึง 1 ซึ่งที่อัตราส่วนนี้ปริมาณของชีวมวลคิดจากฐานของคาร์บอนในสารตั้งต้นทั้งหมด จากผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์แก๊ส เพิ่มขึ้นและ ส่วนที่เป็นถ่านชาร์ และน้ำมันทาร์ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของชีวมวล โดยที่อัตราส่วนของชีวมวลจาก 0 ถึง 1 พบว่ามีผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 58% เป็น 98% ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนที่เป็นถ่านชาร์ ลดลงจาก 36 % เหลือ 1% และส่วนที่เป็นน้ำมันทาร์ลดลง จาก 7% เหลือ 1% เนื่องจากในชีวมวลมีปริมาณ สารระเหยได้ (Volatile matter) สูงเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหิน จึงทำให้ได้ปริมาณแก๊สมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของชีวมวล ซึ่งภายใต้สภาวะเงื่อนไขของการศึกษานี้สามารถสรุปผลการทดลองของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้โดยคิดเป็นประสิทธิภาพของแก๊สเย็น (Cold gas efficiency) โดยที่อัตราส่วนการแปรผันของชีวมวลจาก 0 ถึง 1 ได้ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นจาก 65% เป็น 85% ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้

บุปผา^[18] ได้ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อกระบวนการแกสซิฟิเคชันของชีวมวลด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ชีวมวลที่นำมาศึกษา ได้แก่ แกลบ ตัวแปรที่ทำการศึกษา

คือ อุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำ ร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับเกมมาอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับเกมมาอะลูมินา และโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับเกมมาอะลูมินา ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส จากผลการทดลองในกระบวนการแกสซิฟิเคชัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับเกมมาอะลูมินา ช่วยเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่ออุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำ และร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนแก๊สมีเทนลดลงอย่างมาก สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที และร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 9 โดยผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีร้อยละความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 33.47 และ 30.88 ตามลำดับ

สุพัตรา^[19] ได้ศึกษาแก๊สสังเคราะห์จากแกสซิฟิเคชันของยูคาลิปตัส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแกสซิฟิเคชันจากชีวมวลที่อุณหภูมิ 500 – 800 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยทำการทดลองโดยใช้ไม้ยูคาลิปตัสโดยมีการป้อนไอน้ำ คือ 0.15 – 2.10 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล ซึ่งไอน้ำทำหน้าที่เป็น Gasifying medium เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 โดยประมาณ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ ปริมาณไอน้ำต่อชีวมวล และการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลอง ป้อนไม้ยูคาลิปตัสปริมาณ 15 กรัม เข้าเครื่องปฏิกรณ์ พบว่า ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลต่ำ จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูง จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง สำหรับที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ต่ำนั้น จะทำให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สูงนั้น จะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 1 : 1 คือที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของชีวมวล และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 1 : 1.612 และเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

โคโลไมต์ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัมต่อกรัมของชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่า แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0.96

1.11 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาตัวแปรในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยกระบวนการแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากยูคาลิปตัสโดยกระบวนการแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เปรียบเทียบผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากยูคาลิปตัสกับชีวมวลชนิดอื่น

1.12 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา เิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์

1. ทำให้ได้ความรู้ และประสบการณ์ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์
2. ทราบถึงตัวแปรที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสจากกระบวนการแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีปริมาณมากที่สุด
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาเชื้อเพลิงแก๊สไฮโดรเจนมาทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด
4. สามารถนำไปพัฒนาเป็นแนวทางในเชิงพาณิชย์ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ได้ในอนาคต
5. เป็นการนำไม้ยูคาลิปตัสซึ่งเป็นไม้โตเร็วมาทำให้เกิดประโยชน์มากขึ้น
6. เพิ่มทางเลือกในการผลิตแก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเคมีภัณฑ์
7. ทราบแนวทางในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ

1.13 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บและวิเคราะห์สมบัติของยูคาลิปตัส และซีเลื่อยโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)
3. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchanged) นิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ (Nickel loaded lignite)

4. ศึกษาตัวแปรในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นอนุกรมใน ช่วง 550-650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ และอัตราส่วนโดยมวลของชีวมวลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา
5. การวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่ได้เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และ คาร์บอนมอนอกไซด์ โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี
6. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล
7. เขียนรายงานวิทยานิพนธ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved