บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีบทความวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการปรับปรุงสภาพน้ำมันหม้อแปลง เรื่อง " FLY ASH AS A RECLAMATION AGENT FOR USED INSULATING OILS" ของ J. TOMSHAW และ J. PADULA , 1977 การทดลองดังกล่าวเป็นเพียงระดับเบื้องต้น โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเก่า 500 มิลลิลิตร กรองผ่านเถ้าลอย 100 กรัม และ 400 กรัม ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า น้ำมันมีลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางไฟฟ้าดีขึ้น และได้ทดลองแบบ กระบวนการสัมผัส โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเก่า 1 แกลลอน ให้สัมผัสเถ้าลอย 4 ปอนด์ เป็นเวลา 2 วัน ผลการทดลองพบว่า น้ำมันมีลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางไฟฟ้าดีขึ้นเช่นกัน

นอกจากบทความวิจัยดังกล่าวแล้ว ยังไม่พบผลงานวิจัยที่กล่าวถึงการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ปรับสภาพน้ำมันหม้อแปลง ผลงานวิจัยอื่นเป็นการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ ดินกัมมันต์ ดังนี้

C. LAMARRE, M. DUVAL, และ J.-P. CRINE , 1988 ได้วิจัยเรื่อง " OPTIMUM RECLAMATION TIME FOR INSULATING OIL " โดยศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของน้ำมันหม้อแปลงที่ควรทำการปรับสภาพ และผลของการใช้ สารต้านการเกิดออกซิเดชัน ร่วมกับการปรับสภาพด้วยกระบวนการซึมผ่านดินกัมมันต์ซึ่งบรรจุในถังหลายใบที่เรียงต่อกันโดยการไหลย้อน แล้วหาความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันโดยวิธีการเร่งการเกิดออกซิเดชัน พบว่า การปรับสภาพน้ำมันหม้อแปลงควรดำเนินการเมื่อน้ำมันหม้อแปลงยังอยู่ในช่วงเวลาเหนี่ยวนำ (INDUCTION PERIOD) คือ ช่วงที่ยังมีสารต้านการเกิดออกซิเดชันเหลืออยู่ หากพ้นช่วงนี้ไปจนถึงช่วงอิ่มตัว (SATURATION) ซึ่งเป็นระยะที่ความเป็นกรดมีค่าเกิน 0.2 มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ กรัมของน้ำมัน และค่าแรงตึงผิว มีค่าต่ำกว่า 10 มิลลินิวตันต่อเมตร การปรับปรุงสภาพจะทำให้น้ำมันมีคุณภาพดีขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากมีสารประกอบมีขั้วซึ่งไม่มีฤทธิ์เป็นกรดอยู่มาก เช่น อัลดี

ไฮด์ คีโตน การเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชันหลังการปรับสภาพด้วยดินกัมมันต์ มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันใกล้เคียงกับน้ำมันใหม่และมากกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยดินกัมมันต์แต่มีการเติม สารต้านการเกิดออกซิเดชันที่ระยะสิ้นสุดช่วงเวลาเหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตาม การเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชันหลังการปรับสภาพด้วยดินกัมมันต์ ที่ระยะอิ่มตัวแล้ว จะมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำสุด

2.2 น้ำมันหม้อแปลง

2.2.1 ชนิดและโครงสร้างของน้ำมันหม้อแปลง

(สุพัตรา ภูมิวัฒน์ และ เพิ่มศักดิ์ ควรสถิตย์ , 2537)

น้ำมันหม้อแปลงผลิตจากน้ำมันดิบซึ่งมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ แนพธีนส์ดิบ พาราฟินส์ดิบ และ ชนิดที่ผสมกันระหว่าง แนพธีนส์ดิบ และ พาราฟินส์ดิบ น้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิดเป็นของผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มที่เป็น แนพธีนส์ พาราฟินส์ และ อะโรแมติกส์ ด้วยสัดส่วนที่แตกต่างกัน

น้ำมันที่ผลิตจากพาราฟินส์ดิบจะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มพาราฟินส์ ซึ่งรู้จักกันในรูปของไข น้ำมันนี้จะต้องผ่านการสกัดไขออก หรือเติมสารเพื่อลดจุดไหลเทเมื่อต้องใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำมาก เช่นในประเทศที่มีสภาพอากาศหนาวเย็น นอกจากนี้น้ำมันกลุ่มพาราฟินส์ยังละลายน้ำได้น้อย และยังละลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันได้น้อย จึงอาจก่อปัญหาการเกิดตะกอนสลัดจ์ (SLUDGE) ภายในหม้อแปลงและทำให้โครงสร้างของกระดาษมีลักษณะแห้งมากขึ้น

น้ำมันที่ผลิตจากแนพธีนส์ดิบ ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิด ไซโคลอัลเคนส์ สารประกอบอะโรแมติกส์ และมี พาราฟินส์ อยู่น้อยมาก น้ำมันชนิดนี้จึงมีจุดไหลเทต่ำและมีความสามารถในการละลายดี ไม่ต้องสกัดไขออก หรือเติมสารลดจุดไหลเทก่อนนำไปใช้ ข้อดีอีกประการของน้ำมันชนิดนี้คือมีลักษณะสมบัติในการละลายแก๊สที่ดีในขณะที่น้ำมันกลุ่มพาราฟินส์ มักขับไฮโดรเจนออกจากน้ำมันซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายขณะใช้งานได้

ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนชนิดน้ำมันกระดาษนั้น อายุของกระดาษจะขึ้นกับเสถียรภาพของน้ำมัน เมื่อน้ำมันเสื่อมลง ใยเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระดาษจะถูกเร่งให้เกิดการแตกสลายเร็วขึ้น ความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษจะลดลงจนกระดาษยุ่ยเปื่อยในที่สุด เป็นผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าหมดอายุการใช้งาน

น้ำมันหม้อแปลงเมื่อเสื่อมสภาพลง จะสามารถเปลี่ยนหรือปรับสภาพให้ดีขึ้นได้ แต่กระดาษเซลลูโลสที่เสื่อมแล้ว จะปรับกู้สภาพให้คืนใหม่ไม่ได้ ดังนั้น ความรู้ความเข้าใจเพื่อพิจารณาเลือกใช้น้ำมัน ตลอดจนหลักเกณฑ์ในการบำรุงรักษา และวิเคราะห์สภาพความเสื่อมของน้ำมัน จึงเป็นการรักษาให้อุปกรณ์อยู่ในสภาพที่ดีตลอดอายุการใช้งาน

2.2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

(BURMAH-CASTROL INDUSTRIAL LIMITED , 1981)

น้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่ 2 ประการ คือ เป็นตัวกลางระบายความร้อน และเป็นฉนวนไฟฟ้า ลักษณะสมบัติที่จำเป็นของน้ำมันหม้อแปลง ได้แก่

1) ความหนืดน้อย

2) จุดไหลเทต่ำ

3) มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าดี ได้แก่ มีความต่างศักย์สูงสุดที่ทนได้ของฉนวนสูง ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงต่ำ ค่าความสูญเสียทางฉนวนต่ำ

4) มีเสถียรภาพทางเคมีสูง

5) มีความดันไอต่ำ

6) ถ่ายโอนความร้อนได้ดี

7) ปราศจากสารมลทินเจือปน

2.2.3 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง

(วิชญ์ พิพุธวัฒน์ และ สุพัตรา ภูมิวัฒน์ , 2538)

เนื่องจากน้ำมันหม้อแปลงมีองค์ประกอบหลักคือ น้ำมันแร่ ซึ่งมีส่วนที่ไม่เสถียรได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว องค์ประกอบเหล่านี้อาจทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในหม้อแปลงโดยมี ความชื้น ทองแดง และเหล็ก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ ความร้อน สนามไฟฟ้าตลอดจนการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะใช้งานหม้อแปลง เป็นสภาวะที่เอื้อให้เกิดสารประกอบออกไซด์ ต่างๆได้แก่ สารกลุ่มเปอร์ออกไซด์ อัลกอฮอล์ คีโตนส์ และ กรดดังสมการ

$$RC{=}CR' + O_2 \xrightarrow[\text{HEAT, STRESS, VIBRATION}]{H_2O,Cu,Fe} ROOR' + ROH + R\overset{O}{\overset{\|}{C}}R' + R\overset{O}{\overset{\|}{C}}OH$$

ปริมาณของ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่ไม่อยู่ตัว ขึ้นกับชนิดของน้ำมันดิบ ที่ใช้สำหรับผลิตเป็นน้ำมันหม้อแปลงและกระบวนการกลั่น สารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นสารมีขั้ว ซึ่งจะลดความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมัน ส่วนกรดที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง เหล็ก น้ำมันวานิช หรือ สีในหม้อแปลงเกิดเป็นสารประกอบที่นำไฟฟ้าได้และละลายในน้ำได้บางส่วนเรียกว่า สลัดจ์ เมื่อมีสลัดจ์ สะสมเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการระบายความร้อนของน้ำมันจะลดลง ซึ่งจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ นอกจากนี้สารเจือปนที่เป็นน้ำ เศษผง ฝุ่น จะทำให้น้ำมันขุ่นมัวและ การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

นอกจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงแล้ว สารมลทินอีกส่วนหนึ่งในน้ำมันหม้อแปลงมาจากการเสื่อมสภาพของกระดาษพันตัวนำในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดน้ำมัน-กระดาษ การเสื่อมสภาพของกระดาษ มีความร้อนเป็นปัจจัยหลัก น้ำ และปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นสาเหตุรองลงมา ปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของกระดาษเนื่องจากความร้อนจะก่อให้เกิด น้ำ กรด คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบฟูแรนส์ นอกจากนี้ใยเซลลูโลสของกระดาษจะสั้นลง ทำให้ ความยาวของเซลลูโลสต่อโมเลกุลของกระดาษ และ ความแข็งแรงของกระดาษลดลง ซึ่งหมายถึงการหมดอายุการใช้งาน น้ำที่เกิดขึ้นนอกจากจะลดความแข็งแรงของฉนวนแล้ว

ยังอาจเป็นสาเหตุของการเกิดฟองขึ้นภายในหม้อแปลงถ้ามีสภาพการใช้งานที่เกินพิกัด ซึ่งนำไปสู่การสิ้นสภาพความเป็นฉนวนในที่สุด

ออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงมาจากองค์ประกอบในน้ำมันส่วนหนึ่ง และจากกระบวนการกลั่นอีกส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ออกซิเจนในบรรยากาศมีโอกาสสัมผัสกับน้ำมันหม้อแปลงได้จากการใช้งานสำหรับหม้อแปลงชนิดที่มีระบบป้องกันการรั่ว เมื่อระบบป้องกันการรั่วเสื่อมสภาพจะเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเกิด สลัดจ์ หรือ สารประกอบมีขั้ว ในระยะแรกจะน้อยมากเนื่องจากยังมี สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันตามธรรมชาติที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันเหล่านี้ จะค่อยๆถูกใช้ไปจนหมดหรือเหลือน้อยมาก ระยะนี้เรียกว่า ช่วงเวลาเหนี่ยวนำ หลังจากนั้น สลัดจ์ หรือ สารประกอบมีขั้วจะสะสมตัวเพิ่มขึ้น ค่าความสูญเสียทางฉนวน และ ความนำไฟฟ้าของน้ำมันจะสูงขึ้น ปริมาณกรด ดัชนีสี เพิ่มขึ้น แต่ค่าแรงตึงผิวลดลง เรียกปฏิกิริยาช่วงนี้ว่า ช่วงเวลาเกิดออกซิเดชัน หลังจากนั้นการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นจนเข้าสู่ระยะอิ่มตัว ปริมาณกรดจะสูงเกิน 0.2 มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ กรัมของน้ำมัน แรงตึงผิว ลดลงน้อยกว่า 10 mN/m

สลัดจ์ ที่เกิดจะเคลือบผิวของกระดาษฉนวน ทำให้การถ่ายโอนพลังงานความร้อนลดลง ปริมาณของน้ำที่แพร่ออกจากน้ำมันกับปริมาณของน้ำและกรดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมทั้งปริมาณน้ำที่เกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของกระดาษ ทำให้ พันธะไกลโคไซด์ของเซลลูโลส อ่อนลงและสลายออกเป็น กลูโคสอิสระได้ง่าย

ความร้อนนอกจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแล้ว ยังสามารถทำให้น้ำมันเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 150-500°C ซึ่งถือเป็นการเสื่อมสภาพตามปกติ การสลายตัวนี้จะให้ก๊าซที่มีมวลโมเลกุลต่ำเช่น ไฮโดรเจน มีเธน ในปริมาณมาก และอาจมีก๊าซที่มีมวลโมเลกุลสูงอื่นเช่น อีเธน เอทธิลีน นอกจากนี้ความร้อนยังสามารถทำให้กระดาษฉนวนสลายตัวให้คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์

2.2.4 การแบ่งประเภทน้ำมันหม้อแปลงเพื่อการปรับปรุงสภาพ

ใช้มาตรฐาน IEEE Std 637-1985 (IEEE Guide for the Reclamation of Insulating Oil and Criteria for Its Use) ในการพิจารณาคุณภาพน้ำมันที่กำลังใช้งานอยู่สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่ม 1 น้ำมันที่มีคุณภาพดี สามารถใช้งานได้ต่อไป
- กลุ่ม 2 น้ำมันซึ่งต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ (RECONDITIONING)
- กลุ่ม 3 น้ำมันที่มีคุณภาพไม่ดี จำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพใหม่ หรือ ทิ้ง
- กลุ่ม 4 น้ำมันที่มีคุณภาพต่ำมากควรทิ้ง

พิกัดมาตรฐานของ IEEE ได้แสดงไว้ตามตารางที่ ค 1 ถึง ค 4

2.2.5 การทดสอบลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

(สุพัตรา ภูมิวัฒน์ และ เพิ่มศักดิ์ ควรสถิตย์ , 2537)

1) ความต่างศักย์สูงสุดที่ทนได้ของฉนวน(DIELECTRICBREAKDOWN VOLTAGE)

เป็นการวัดความสามารถของน้ำมันที่จะคงทนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ค่านี้จะบ่งถึงสารเจือปน เช่นอนุภาคที่นำไฟฟ้า น้ำ หรือ ฝุ่น แต่ไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกรด หรือ สลัดจ์ ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ รวมทั้งข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิต เพียงการปรับปรุงสภาพด้วยวิธีเชิงกลก็สามารถทำให้ค่า ความต่างศักย์สูงสุดที่ทนได้ของฉนวน สูงขึ้นได้

2) ความสูญเสียทางฉนวน (DISSIPATION FACTOR ,TAN DELTA, tg δ หรือ POWER FACTOR)

เป็นการวัดความสูญเสียทางฉนวนของน้ำมันภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ใช้วิธีการวัดตามมาตรฐาน IEC 247 หรือ ASTM D 927 ASTM D 924-92 การทดลองนี้จะวัดที่อุณหภูมิสองค่าเพื่อเปรียบเทียบกัน ในกรณีน้ำมันใหม่ ค่าที่ 90°C (หรือ 100°C) จะมากกว่าค่าที่ 20 °C (หรือ 25°C) ไม่เกิน 7 ถึง 10 เท่า แสดงว่าเป็นน้ำมันที่มีลักษณะสมบัติดี ถ้าเป็นน้ำมันที่ใช้แล้ว อัตราส่วนนี้จะสูง แสดงถึงการเจือปนสารมลทินที่นำไฟฟ้าได้ในน้ำมันที่ไม่ใช่น้ำมักเป็นสารมีขั้วที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

นอกจากนี้ การทดสอบควรดำเนินการที่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 ถึง 3 ค่า และควรเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความเครียดของสนามไฟฟ้าเดียวกัน โดยน้ำมันหม้อแปลงที่มีสารเจือปนซึ่งนำไฟฟ้าได้นั้น จะให้ค่าแทนเดลตา (TAN DELTA) ที่แปรตามความเครียดสนามไฟฟ้ามากกว่าน้ำมันซึ่งไม่มีสารเจือปนชนิดนำไฟฟ้าได้ การทดสอบนี้จะให้ข้อมูลทั้งการปนเปื้อนและสารจากการเสื่อมสภาพ ในรูปกรด

ค่าความสูญเสียทางฉนวน และค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ขึ้นกับ

- ปริมาณทองแดงที่ละลายในน้ำมัน
- ปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ในน้ำมัน
- ปริมาณกรดที่ละลายได้ในน้ำมัน

3) ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง (DC CONDUCTIVITY)

ตาม ASTM D3387 ไม่มีข้อกำหนดค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงไว้ เพราะข้อมูลจากการวัดความสูญเสียทางฉนวน อาจเพียงพอสำหรับน้ำมันใหม่ แต่ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะวัดค่านี้ประกอบค่าแทนเดลตาเสมอ ในกรณีของน้ำมันเก่าที่มีสารประกอบมีขั้วที่ไม่มีฤทธิ์เป็นกรด ซึ่งได้แก่ สารประเภท อัลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ คีโตนส์ และ อีเธอร์ นั้น การปรับสภาพน้ำมันหม้อแปลงด้วยดินกัมมันต์ จะกำจัดสารประกอบมีขั้วในรูปกรดเท่านั้น เมื่อนำน้ำมันกลับไปใช้งานใหม่ สารประกอบมีขั้วอื่นๆจะยังคงเหลืออยู่ และเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันเร็วขึ้น สารประกอบมีขั้วอื่นๆที่ไม่ใช่กรดนี้ สามารถตรวจได้ด้วยค่าค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง ความตึงผิว แต่ตรวจจับไม่ได้ด้วยค่าความสูญเสียทางฉนวน

4) แรงตึงผิว (INTERFACIAL TENSION , IFT)

เป็นการวัดแรงตึงผิวตรงรอยต่อของของเหลวสองชนิด คือ น้ำมันและน้ำ ค่านี้จะให้ข้อมูลทั้งสารปนเปื้อนชนิดมีขั้วและ สำหรับน้ำมันเก่าค่านี้จะบ่งบอกถึงระดับของการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลงใหม่จะมีค่า แรงตึงผิวสูงกว่าน้ำมัน หม้อแปลงที่ใช้แล้ว

5) **ค่าการสะเทินกรด (NEUTRALIZATION NUMBER)**

เป็นปริมาณมวลสารในหน่วยมิลลิกรัมของด่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งใช้ในการสะเทินกรด ในน้ำมันหม้อแปลง 1 กรัม ให้มีสภาพเป็นกลาง ถือเป็นค่าที่สำคัญที่สุดในการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันจากกรด น้ำมันที่มีค่าการสะเทินต่ำจะให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลง การกัดกร่อนโลหะลดลง อายุการใช้งานของอุปกรณ์ยาวนานขึ้น หากมีค่าสูงแสดงถึงการปนเปื้อนด้วยสารอื่นหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากกระบวนการ ออกซิเดชั่น จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนน้ำมันใหม่

6) **ปริมาณความชื้น (MOISTURE CONTENT)**

น้ำในรูปน้ำอิสระที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงสามารถแยกออกได้โดยการกรอง ส่วนน้ำในรูปที่ละลายในน้ำมัน ไม่สามารถ มองเห็นด้วยตาเปล่า และไม่สามารถทราบปริมาณโดยทดสอบด้วยวิธีทางฟิสิกส์หรือเคมี แต่จะมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ทนได้ของฉนวนต่ำลง อายุงานการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง และก่อให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะ

7) **ปริมาณก๊าซที่ละลาย (DISSOLVED GAS CONTENT)**

ภายใต้ความร้อนและความเครียดทางไฟฟ้าขณะการใช้งาน ทั้งน้ำมันและฉนวนกระดาษจะเสื่อมสภาพสลายตัวให้ก๊าซต่างกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตามวาระด้วยแก๊สโครมาโตรกราฟฟี (GAS CHROMATOGRAPHY) ทำให้ทราบระดับของก๊าซเหล่านี้ในสภาพการใช้งานปกติ เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น อัตราการเกิดก๊าซบางชนิดจะสูงขึ้น เช่น การเสื่อมสภาพอันเนื่องจากความเครียดทางไฟฟ้าจะก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน การเสื่อมสภาพอันเนื่องจากความร้อนจะก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและสารประกอบอัลคีนส์

8) **ปริมาณเฟอร์ฟูรัลดีไฮด์ (FURFURALDEHYDE)**

การสลายตัวของเซลลูโลสในกระดาษฉนวน ทำให้กระดาษสูญเสียความแข็งทางกล และให้สารฟูแรนส์ (FURANS) และอนุพันธ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยใช้ HPLC (HIGH PERFORMANCE LIQUID CHROMATOGRAPHY)

9) ปริมาณสารต้านทานออกซิเดชัน (INHIBITOR CONTENT)

น้ำมันไม่ควรถูกใช้งานเกินช่วงเวลาเหนี่ยวนำ คือช่วงที่ไม่มีสารต้านทานออกซิเดชัน เหลืออยู่ การใช้งานตั้งแต่หลังช่วงเวลาเหนี่ยวนำจนถึงช่วงเวลา อิ่มตัว ซึ่งตรวจสอบได้จากค่าการสะเทินกรดเกิน 0.2 มิลลิกรัมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ กรัมของน้ำมัน จะทำให้ไม่สามารถปรับปรุงสภาพน้ำมันให้ดีขึ้นได้ด้วยการปรับสภาพ จึงจำเป็นต้องทราบปริมาณของสารต้านทานออกซิเดชันที่ยังเหลืออยู่ เพื่อวางแผนบำรุงรักษาหรือเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการปรับปรุงสภาพต่อไป

10) ดัชนีสี (COLOR NUMBER)

เป็นค่าที่บ่งชี้ความเสื่อมของน้ำมันที่ใช้งานแล้วหรือแสดงการปนเปื้อนของน้ำมัน อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้ดัชนีสีเป็นเกณฑ์หลักในการตัดสินลักษณะสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

11) ความหนาแน่น (DENSITY)

(ALLINSON J.P. , 1975)

มีความสำคัญสำหรับการใช้งานในที่ที่มีอากาศหนาวเย็น เนื่องจากน้ำมันหม้อแปลงที่มีความหนาแน่นสูงจะจมลงในขณะที่หากมีน้ำอยู่ด้วย น้ำจะแข็งตัวเป็นน้ำแข็งลอยอยู่บนผิวซึ่งสามารถเกิดการแขวนลอยฟองอากาศไว้ภายในตัวน้ำมันได้

นอกจากนี้ การสังเกตลักษณะภายนอกก็สามารถบ่งบอกสภาวะของน้ำมันหม้อแปลงได้ เช่น สิ่งสกปรกบ่งบอกถึงการผ่านการใช้งานมาแล้ว ความขุ่นบ่งบอกถึงความชื้น หรือสลัดจ์ที่ถูกละลาย สีเขียวหมายถึงสารประกอบทองแดงที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

2.2.6 กระบวนการออกซิเดชัน & กระบวนการ ต้านออกซิเดชัน ของน้ำมันหม้อแปลง

(HICO PRODUCTS LIMITED : TECHNICAL BULLETIN NO.17020)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแร่ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ระหว่างไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันกับ ออกซิเจน ดังนี้

1. การเกิดอนุมูลอิสระ (FREE RADICALS FORMATION)

ปฏิกิริยาเริ่มต้น $RH \rightarrow R^{\bullet}$ .....(1)

2. ปฏิกิริยาลูกโซ่ (PROPAGATION STEP) $R_2 + O^{\bullet}_2 \rightarrow RO^{\bullet}_2$ .....(2)

$RO^{\bullet}_2 + RH \rightarrow RO_2H + R$ ..... (3)

3. ปฏิกิริยาสิ้นสุด (TERMINATION STEP) $2R^{\bullet} \rightarrow$ ผลิตภัณฑ์ ..... (4)

หรือ $RO^{\bullet}_2 + R^{\bullet} \rightarrow$ ผลิตภัณฑ์ ..... (5)

หรือ $2RO^{\bullet}_2 \rightarrow$ ผลิตภัณฑ์ + O_2 ..... (6)

ในกรณีที่มี ทองแดง (Cu) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$RO_2H + Cu^{++} \rightarrow RO^{\bullet}_2 + H^{+} + Cu^{+}$ ..... (7)

$RO^{\bullet}_2 + RH \rightarrow RO_2H + R^{\bullet}$ ..... (8)

การควบคุมกระบวนการออกซิเดชัน จำเป็นต้องลดสารเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ สารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (AH) ซึ่งมีกลไกดังนี้

$RO^{\bullet}_2 + AH \rightarrow RO_2H + A^{\bullet}$ ..... (9)

$A^{\bullet} + RO^{\bullet}_2 \rightarrow$ ผลิตภัณฑ์ ..... (10)

$2A^{\bullet} \rightarrow$ ผลิตภัณฑ์ ..... (11)

2.3 ดินกัมมันต์

2.3.1. โครงสร้างและคุณสมบัติการดูดซับของดินกัมมันต์

คุณสมบัติของดินกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับโครงร่างของผลึก โครงร่างของผลึกจะเรียงขนานกันเป็นชั้นๆ เหมือนแซนวิช รูปแบบการจัดเรียงชั้นที่ต่างกัน หรือมีการแปรเปลี่ยนภายในชั้นเดียวกัน จะทำให้มีโครงสร้างต่างชนิดกันไป หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของดินกัมมันต์มี 2 ชนิดคือ

1. **หน่วยอลูมินา หรือ ยิบไซต์** (GIBBSITE UNIT) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอะตอมของออกซิเจน หรือ หมู่ไฮดรอกซิลที่ต่อกันแบบโคลสแพค (CLOSE-PACKED) 2 แผ่น ระหว่างแผ่นจะมีอะตอมของอลูมินัม ถูกตรึงอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากอะตอมทั้ง 6 ของออกซิเจน หรือหมู่ไฮดรอกซิล

2. **หน่วยซิลิก้า** ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกลุ่มอะตอมของซิลิก้าและออกซิเจนที่ต่อกันแบบเตตระฮีดรอล (TETRAHEDRALLY COORDINATED SILICA,SiO_4) ซึ่งเชื่อมกันเป็นเครือข่าย เฮกซาโกนอล (HEXAGONAL)โดยมีองค์ประกอบเป็น Si_4O_{10} หรือ S_2O_5 (ครึ่งหน่วยเซล) เรียงซ้ำๆกัน แผ่น Si_2O_5 ซึ่งมีไอออนของออกซิเจน ที่ยอดจะสร้างพันธะกับแคทไอออน

ตัวอย่างขององค์ประกอบที่สำคัญในดินกัมมันต์ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (MONTMORILLONITE $(OH)_4Al_4Si_8O_{20}\cdot nH_2O$) และ แอตตาพัลไจต์ (ATTAPULGITE)

ตัวอย่างโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ประกอบด้วย ยิบไซต์ 1 ชั้น ถูกประกบด้วยแผ่นซิลิก้า 2 แผ่น ประกอบเป็น 1 หน่วยโครงสร้าง แต่ละหน่วยโครงสร้างจะจับกันในแกนดิ่งซ้อนๆกันโดยมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างหน่วยโครงสร้าง ขนาดของหน่วยโครงสร้างในแกนดิ่งจะแปรเปลี่ยนในช่วง 9.6 ถึง 21.4°A ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่มีอยู่ ดังนั้นโครงผลึกจึงขยายตัวได้ ไอออน ของ Al^{3+}ในชั้น ออกตะฮีดรอล (OCTAHEDRAL) และ Si^{4+} ในชั้นของซิลิก้าสามารถถูกแทนที่ด้วยแคทไอออน อื่นๆที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่า เช่น Fe^{2+} แทนที่ Al^{3+} ได้แร่นอนโทรไนต์ (NONTRONITE) ส่วนแร่ ซาโปไนต์ (SAPONITE) เกิดจากการแทนที่ Al^{3+} 2 อะตอมด้วย Mg^{2+} 3 อะตอม และแทนที่ Si^{4+} ด้วย Al^{3+} การแทนที่ด้วยไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าเป็นการทำลายสมดุลย์ทางประจุไฟฟ้า ทำให้สามารถดูดซับแคทไอออน อื่นๆเช่น Ca หรือ Na เข้าไปในระหว่างแผ่นและที่ขอบของแผ่น

คุณสมบัติของดินธรรมชาติบางชนิดเช่น มอนต์มอริลโลไนต์ เกิดจากการแทนที่ Al^{3+} โดย Mg^{2+} ทำให้มีประจุเกินบนโครงผลึก แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์นี้ จะส่งแรงดึงดูดออกจากจุดศูนย์กลางของหน่วยโครงสร้างไปจนถึงระยะที่ห่างจากผิว 4.5°A แรงนี้แรงพอที่จะยึดอิออนที่แลกเปลี่ยนให้อยู่ที่ผิว แต่ไม่แรงพอที่จะยึดหน่วยโครงสร้างด้วยกันให้แน่นขึ้น ดังนั้นน้ำสามารถเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น ทำให้ดันให้หน่วยโครงสร้าง แยกห่างจากกัน การขยายตัวของโครงร่างผลึกนี้ จะแปรเปลี่ยนไปตามระดับการเกิดไฮเดรชัน (HYDRATION) ของแคทไอออน มื่อนำดินไปกวนในน้ำได้เป็นสารแขวนลอย หน่วยโครงสร้างจะถูกน้ำแทรกจนบวมและแยกออกจากกันเป็นแผ่นบางๆ ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างชั้นได้มาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น

กรณีของแอตตาพัลไจต์ (ATTAPULGITE) ในชั้นของแผ่นซิลิก้าจะมีการแทนที่ของอะตอมซิลิกอนโดยอะตอมของอลูมิเนียมเพียงเล็กน้อย แรงดึงดูดแคทไอออนเกิดจากการแทนที่ไอออนเช่นเดียวกับมอนต์มอริลโลไนต์

2.3.2 ลักษณะและประโยชน์ของดินกัมมันต์

ดินกัมมันต์ แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีความสามารถในการดูดซับโดยธรรมชาติ และกลุ่มที่ต้องกระตุ้นให้มีลักษณะสมบัติในการดูดซับโดยทางเคมี ดินกัมมันต์ สามารถใช้งานในรูปเม็ดหรือผง ชนิดเม็ดใช้ในกระบวนการซึมผ่าน ส่วนชนิดผงใช้ในกระบวนการสัมผัส ในกระบวนการซึมผ่านน้ำมันจะไหลผ่าน ดินกัมมันต์เม็ดที่บรรจุในถัง ส่วนกระบวนการสัมผัสเป็นการกวนน้ำมันกับดินกัมมันต์ที่ถูกบดแล้ว (Hasnuddin Siddiqui M. K. ,1968)

ดินกัมมันต์ มีลักษณะคล้ายดินทราย มีความชื้นอยู่ 30-60 % ซึ่งจะถูกทำให้แห้งและแยกออกเป็นหลายเกรดตามความละเอียดของขนาดตะแกรง (MESH)

- ขนาด 16-30 30-60 และ 50-80 มีลักษณะเป็นเม็ด (GRANULAR)
- ขนาด 100+ และ 200+ เป็นผงละเอียด (FINE)

ทั้งสองแบบนี้ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แบบที่มีการระเหยปกติ (REGULAR VOLATILE MATTER, RVM) ซึ่งมีความชื้นประมาณ 6 % และแบบที่มีการระเหยต่ำ (LOW VOLATILE MATTER, LVM) ซึ่งมีความชื้นประมาณ 1 % โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 220 °F

ดินกัมมันต์ได้จากการเผา ที่อุณหภูมิ 800-1100 °F วิธีการนี้จะทำให้ดินกัมมันต์มีรูพรุนมากขึ้น มีพื้นที่ผิวประมาณ 125 ตารางเมตร ต่อกรัม

ดินกัมมันต์ มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา (SiO_2: Al_2O_3)ในช่วง 21:2 ถึง 1:8 ตัวอย่างประโยชน์ของ ดินกัมมันต์ คือใช้ดูดสี ดูดกลิ่น ดูดความชื้น และสะเทินกรดของ น้ำมันแร่ น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันหล่อลื่น ลักษณะสมบัติการดูดสีเป็นผลมาจากการที่ ดินกัมมันต์ สามารถแยกสารแขวนลอยเช่นอนุภาคเล็กละเอียดของโค๊ก (COKE) คาร์บอน และสารมลทินที่ละลายได้เช่นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นยางเหนียวซึ่งมีมวลโมเลกุลสูง สารเจือปนที่มีผลต่อการฟอกสีได้แก่อัลกอฮอล์ สามารถยับยั้งการฟอกสี สารประกอบคลอรีนช่วยให้การฟอกสีดีขึ้น ความชื้นในน้ำมันแร่ (≅0,2%) มีผลเล็กน้อยในการยับยั้งการฟอกสี (Mantell C.L.,1951) , (Patterson H. B.W., 1992)

นอกจากนี้ ดินกัมมันต์ ยังสามารถดูดซับความกระด้างในน้ำที่จะป้อนเข้าหม้อน้ำได้เนื่องจากมันสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุบวก

2.3.3 องค์ประกอบของ ดินกัมมันต์ กับความสามารถในการดูดซับ

ดินกัมมันต์ ที่มีองค์ประกอบเหมือนกันแต่ลักษณะสมบัติในการดูดซับอาจต่างกัน แต่ดินกัมมันต์มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา สูงมักมีความสามารถในการดูดซับสูง ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรดด่าง (pH) และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ รวมทั้งชนิดของ ดินกัมมันต์ที่ใช้ ได้มีการศึกษาการดูดซับสีและน้ำมันแร่โดยใช้ดินกัมมันต์ (C.L. MANTELL , 1951) ผลการทดลองสามารถอธิบายด้วยสมการสมดุลการดูดซับของ Freundlich

$$\log x/m = \log k + 1/n \log c$$

โดย x/m คือ จำนวนหน่วยของสีที่ถูกดูดซับต่อกรัมของสารดูดซับ

c คือ ความเข้มของสีที่สภาวะสมดุลย์

l/n คือ ความชันของกราฟ ขึ้นกับชนิดของน้ำมันและชนิดของสีที่ถูกดูดซับ

น้ำมันชนิดเดียวกันซึ่งถูกผลิตจากแหล่งผลิตเดียวกันด้วยกระบวนการที่เหมือนกันจะให้กราฟการดูดซับที่ต่างกันหากชนิดของสีต่างกัน น้ำมันที่ผ่านการใช้งานมากจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อการดูดซับมาก

2.4 การดูดซับ

เป็นกระบวนการแยกสารโดยที่องค์ประกอบที่อยู่ในวัฏภาคของไหลถูกถ่ายโอนไปยังผิวของสารดูดซับที่เป็นของแข็ง เมื่อสารดูดซับถึงสภาวะสมดุล สารดูดซับสามารถถูกล้างเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (REGENERATION) ได้อีก ดินกัมมันต์สามารถดูดซับองค์ประกอบต่างๆที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงได้ต่างกันดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.1 ผลของการดูดซับด้วยดินกัมมันต์ และ การสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีต่อองค์ประกอบในน้ำมันหม้อแปลง (ASTM , " ELECTRICAL INSULATING OILS" , 1988)

องค์ประกอบ กระบวนการ	พาราฟินส์ $CH_3(CH_2)_nCH_3$	โอเลฟินส์ $R\text{-}C{=}CH_2$	อะโรแมติกส์	สารประกอบมีขั้ว
การปรับสภาพด้วยดินกัมมันต์	ไม่มีผล	การดูดซับในระดับจำกัด	ไม่มีผล	ดูดซับได้
การสกัดด้วยตัวทำละลาย	ไม่มีผล	ไม่มีผล	สามารถสกัดสารประกอบที่เป็นวงแหวนความหนาแน่นสูงได้ดี	ไม่มีผล

2.4.1 แนวทางการพิจารณาใช้สารดูดซับโดยกระบวนการซึมผ่าน

1) ชั้นของสารดูดซับที่ลึกจะให้ผลการดูดซับที่ดี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังซึมผ่านที่ใหญ่จะสามารถรองรับอัตราการไหลได้มาก

2) การใช้สารดูดซับที่ละเอียดจะทำให้สามารถใช้ชั้นของสารดูดซับสั้นลง

3) ความหนืดของของไหล ณ อุณหภูมิหนึ่งที่จะกรองยิ่งสูง จะต้องใช้เวลาในการซึมผ่านมากขึ้น

4) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ควรลดความหนืดของน้ำมันลงโดยการอุ่นให้ร้อนหรือโดยการเจือจางจนถึงจุดซึ่งสามารถแทรกซึมเข้าช่องว่างของ สารดูดซับได้

เมื่อเติมสารที่จะถูกดูดซับเข้าถังกรองควรแช่ทิ้งไว้ให้นานพอที่จะไล่อากาศที่กักอยู่ในสารดูดซับ

กระบวนการซึมผ่านสามารถดำเนินการได้ 2 แบบ คือ

1. แบบความดัน คือ ของเหลวไหลจากบนลงล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก
2. แบบ ต้านแรงโน้มถ่วงของโลก คือ ของเหลวไหลจากล่างขึ้นบน ต้านกับแรงโน้มถ่วงของโลก

เมื่อ ดินกัมมันต์ ถูกใช้งานจนถึงภาวะสมดุล จะถูกถ่ายออกจากถังดูดซับนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ ประมาณ 1000 - 1300 $^{\circ}$F แล้วจึงนำกลับมาใช้กรองใหม่

2.4.2 อุปกรณ์การดูดซับ ที่สำคัญได้แก่

1) ถังดูดซับชนิดตรึงแน่น (FIXED-ADSORBER) สารดูดซับถูกบรรจุในหอดูดซับ ของไห]จะไหลผ่านหอดูดซับ จากทางด้านบนลงมา

2) ถังดูดซับชนิดใช้กวน (STIRRED-TANK ADSORBER) สารดูดซับจะถูกกวนให้กระจายในของเหลวโดยวิธีกวนภายในภาชนะ ใช้กับ สารดูดซับที่ละเอียด

2.4.3 สมดุลการดูดซับ

คือ สมดุลซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่อยู่ในของไหล กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่อยู่ในสารดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ชนิดของ สมดุลการดูดซับ ที่สำคัญ ได้แก่

2.4.3.1 สมดุลการดูดซับแบบเชิงเส้น

$q = K_H C$ (วัฏภาคของเหลว) ..... (12)

$q = K'_H P$ (วัฏภาคก๊าซ) ..... (13)

2.4.3.2 สมดุลการดูดซับแบบไม่เชิงเส้น ได้แก่

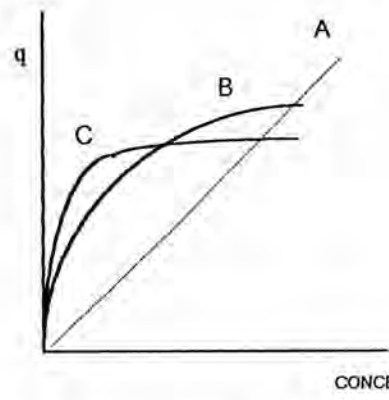
ก. แบบ LANGMUIR

$q = q_{max} KC / (1+KC)$ ..... (14)

ข. แบบ FREUNDLICH

$q = KC^m$ ..... (15)

โดย m = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เหมาะสำหรับใช้กับการดูดซับในของเหลว



A = สมดุลการดูดซับแบบเชิงเส้น

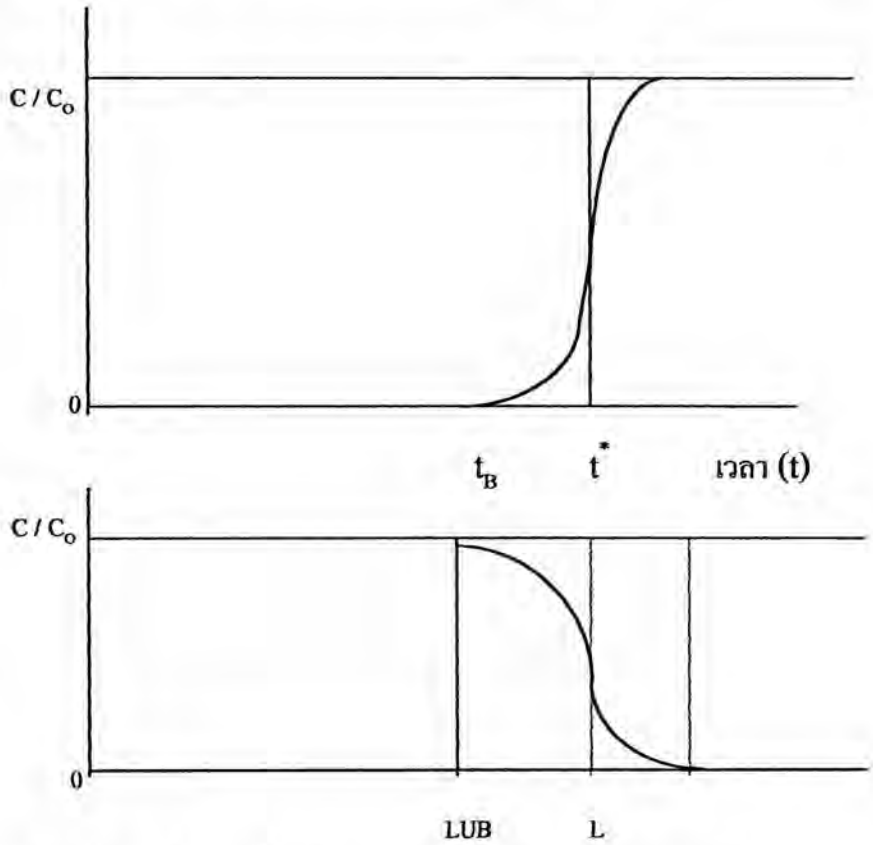
B = สมดุลการดูดซับแบบ FREUNDLICH

C = สมดุลการดูดซับแบบ LANGMUIR

รูปที่ 2.1 สมดุลการดูดซับแบบเชิงเส้น และแบบไม่เชิงเส้น

2.4.4 การลอดผ่านถังดูดซับชนิดตรึงแน่น (BREAKTHROUGH CURVE) (McCabe W.L. , Smith J.C. , 1993)

ในกระบวนการดูดซับที่ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องมักใช้ถังดูดซับชนิดตรึงแน่นซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเข้มข้นที่ทางออก กับเวลาดังรูปที่ 2.2 ในระยะแรกสารจะถูกดูดซับที่ปากทางเข้าจนหมด จึงไม่ปรากฏสารที่ถูกดูดซับที่ทางออก หลังจากนั้น สารดูดซับที่ปากทางเข้าจะถึงสภาวะสมดุล การถ่ายเทมวลจะเคลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งถัดไปจากปากทาง บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับจะเคลื่อนไปยังปลายทางออกจนถึงเวลา t_B จะเริ่มมีสารที่ถูกดูดซับปรากฏที่ทางออก ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นเดิมที่เวลา t^* หลังจากนั้น ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับจะสูงขึ้นจนเท่าความเข้มข้นเดิมก่อนการดูดซับ ขณะเดียวกันความเข้มข้นของสารตั้งแต่ปากทางมาจนถึงเวลา t^* ซึ่งตรงกับตำแหน่งเริ่มต้นของความยาวของสารดูดซับที่ยังไม่ถูกใช้งาน (LUB) จะสมดุลกับความเข้มข้นของสารแรกเริ่ม ระยะถัดออกไปทางด้านทางออกจะเป็นส่วนที่สารดูดซับยังสามารถใช้งาน



รูปที่ 2.2 การลอดผ่านถังดูดซับชนิดตรึงแน่น (BREAKTHROUGH CURVE)

คำนวณหา t_B และ หา LUB ได้จากสมการ $t_B = (L - LUB) * \rho_B (q_{eq} - q_0) / (U_O C_O)$ ..... (16)

คำนวณหา t^* จาก $t_B = (1 - LUB / L) * t^*$ ..... (17)

2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (PATTERSON H. B.W., 1992)

นอกจากลักษณะสมบัติของสารดูดซับและสารถูกดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

ก. อุณหภูมิ

สำหรับการดูดซับทางกายภาพซึ่งดูดซับด้วยแรงวันเดอร์วาวส์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 ^{o}C จะมีผลให้สารถูกดูดซับได้มากขึ้นที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 ^{o}C แรงวันเดอร์วาวส์จะถูกทำลายทำให้ดูดซับได้น้อยลงแม้ว่าความหนืดของน้ำมันจะลดลงและช่องว่างภายในสารดูดซับจะขยายใหญ่ขึ้น กรณีที่เป็นการดูดซับทางเคมี การเพิ่มอุณหภูมิเกิน 100 ^{o}C จะช่วยกระตุ้นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ ทำให้การดูดซับดีขึ้น ขณะเดียวกันหากอุณหภูมิเกิน 120 ^{o}C เม็ดสีจะถูกทำลายโดยมีสารดูดซับเป็นคะตะลิสต์ เช่นดินกัมมันต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด การดูดซับด้วยดินกัมมันต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด เพื่อกำจัดสีที่อุณหภูมิเกิน 106 ^{o}C โดยสัมผัสอากาศ จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดสีใหม่เพิ่มขึ้น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิก้าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีสูงสุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 ^{o}C

ข. ช่วงเวลาสัมผัสระหว่างสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

ในกระบวนการแบบสัมผัส การกวนให้สัมผัสกันนาน 5 นาที จะช่วยกำจัดสีได้กว่า 50 % หากนานเกิน 15 นาที จะช่วยกำจัดสีได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการกวนนานเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและเป็นการชักนำอากาศเข้าไปในน้ำมัน ในกรณีของการกรองแบบซึมผ่านซึ่งสารที่ถูกดูดซับได้สัมผัสกับสารดูดซับในปริมาณมาก สีจะถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วใน 2-3 นาทีแรกเท่านั้น

ฅ. การสัมผัสอากาศ

การดูดซับที่เกิดขึ้นพร้อมกับการสัมผัสอากาศจะก่อผลเสียดังนี้

- ในระยะสุดท้ายของการดูดซับ น้ำมันจะสูญเสียสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ตามธรรมชาติ
- ดินกัมมันต์เป็นสารกระตุ้นให้เกิดการออกซิเดชันเมื่อมีการสัมผัสอากาศ
- ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวมีแนวโน้มการเกิดออกซิเดชันได้ง่ายและเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทุก 10 $^{\circ}$C ที่เพิ่มขึ้น

การดูดซับน้ำมันที่ไวต่ออากาศควรกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

ง. ความชื้น

ความชื้นในระบบการดูดซับมาจาก 3 แหล่งใหญ่ คือ จากน้ำมัน จากดินกัมมันต์ และจากกระบวนการบางอย่าง ปกติดินกัมมันต์จะมีความชื้นอิสระที่สมดุลกับอากาศประมาณ 10 % และอาจสูงถึง 30 % เมื่อเก็บไว้ในที่ชื้น ดังนั้นการคำนวณปริมาณใช้งานจึงต้องชดเชยความชื้นส่วนนี้ ในทางปฏิบัติ ควรไล่ความชื้นในน้ำมันให้เหลือความชื้นไม่เกิน 0.1 % ก่อนเติมดินกัมมันต์ แม้ว่าดินกัมมันต์ จะผ่านการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิถึง 500 $^{\circ}$C ก็ตาม แต่ยังอาจมีน้ำที่เกาะอยู่ระหว่างแผ่นชั้นของโครงสร้างภายในของดินกัมมันต์ซึ่งมีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการดูดซับทางเคมี หากน้ำดังกล่าวถูกขับออกจากโครงสร้างอย่างรวดเร็วและรุนแรงจะทำให้ชั้นดังกล่าวยุบตัวส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวดูดซับที่สามารถเข้าถึงได้มีน้อยลง การแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำได้โดยเติมดินกัมมันต์ลงในน้ำมันที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ ณ ความดันขณะดูดซับ น้ำมันจะแทนที่น้ำที่อยู่ระหว่างชั้นอย่างช้าๆ โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

จ. ความเป็นกรด

ในดินธรรมชาติมีสารเชิงซ้อนของอลูมิเนียมซิลิเคตในปริมาณที่สูงและมีโลหะอื่นๆเป็นสารปนเปื้อน เช่น เหล็ก แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม และโปแตสเซียม อยู่ในปริมาณต่างๆกัน การทิ้งไว้นานๆจะเกิดการเสื่อมสภาพโดยบรรยากาศ (WEATHERING) เกิดเกลือซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้ เช่น เฟอริกซัลเฟต และ อลูมิเนียมซัลเฟต การซึมออก (LEACHING) ของเหล็ก และอลูมิเนียม และแทนที่ด้วยไฮโดรเจรแคทไอออนจะทำให้เกิดกรดซิลิสิก (SILICIC) ซึ่ง

สามารถถ่ายโปรตอนให้พันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนในสารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวได้ อนุมูลคาร์โบเนียมแล้วเกิดแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ดูดซับสารมลทินต่างๆในน้ำมันได้

จ. ขนาดของอนุภาค

อนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ก่อปัญหาในเรื่องการอุดตันขณะไหลผ่านถังดูดซับ การเพิ่มความพรุนแทนการลดขนาดของอนุภาคสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่การมีรูพรุนมากจะทำให้เก็บกักน้ำมันไว้ภายในดินกัมมันต์ไว้มากถึง 70 % ขณะที่ดินธรรมดาจะเก็บกักประมาณ 30 % และถ่านกัมมันต์เก็บกักประมาณ 150 % ดังนั้นควรใช้สารดูดซับผสมระหว่างดินกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม

2.5 รูปแบบของกระบวนการปรับสภาพน้ำมันหม้อแปลง

การปรับสภาพเป็นการใช้กระบวนการต่างๆ เพื่อทำให้องค์ประกอบของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น มีหลายแบบ

สามารถแบ่งวิธีการแยกสารมลทินออกจากน้ำมัน ตามประเภทของสารมลทินได้ดังนี้

ก) ก๊าซและน้ำ

การดึงความชื้นด้วยสูญญากาศ (VACUUM DEHYDRATION)

ใช้ลดปริมาณก๊าซและน้ำในน้ำมันหม้อแปลง ให้เหลือในระดับต่ำ น้ำมันจะถูกสเปรย์ผ่านหัวฉีดเข้าไปใน VACUUM CHAMBER และถูกทำให้ร้อน ก๊าซและน้ำจะถูกแยกออกไปรวมทั้ง VOLATILE ACIDS

ข) น้ำและของแข็ง

การอัดด้วยความดัน (BLOTTER OR FILTER PRESS)

เป็นการใช้ความดันอัดน้ำมันผ่านวัสดุพรุนที่เรียงต่อกัน ปกติใช้กระดาษ วิธีนี้สามารถแยกคาร์บอน น้ำ และ สลัดจ์ เมื่ออยู่ในรูปสารแขวนลอยได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่สามารถไล่อากาศ แต่กลับเป็นการเติมอากาศให้น้ำมัน

การเหวี่ยงหนีศูนย์ (CENTRIFUGE)

เป็นวิธีทางกลในการแยกสารแขวนลอยเช่น คาร์บอน น้ำ และ สลัดจ์ ที่มีความเข้มข้นสูงออกจากน้ำมันได้ แต่ไม่สามารถแยกคาร์บอนที่ละเอียดหรือ น้ำที่อยู่ในรูปที่ละลายได้

ถังซึมผ่านแบบรวมตัว (COALESCING FILTER)

เป็นถังกลมบรรจุด้วยไฟเบอร์กลาสซึ่งจะดักหยดน้ำและเพิ่มความแตกต่างของความดันคร่อมชั้นสารดูดซับ ดังนั้นจึงบังคับให้หยดน้ำรวมตัวกัน แล้วถูกรีดออกมาเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ที่ผิวนอกของไฟเบอร์กลาส และถูกกักในตะแกรงแยก แล้วสะสมที่ใต้ถัง ส่วนน้ำมันแห้งจะลอดผ่านตะแกรงแยก ออกไป

การตกตะกอน (PRECIPITATION OR SETTLING)

การตกตะกอนเป็นวิธีที่ถูกและประหยัดที่สุดในการแยกน้ำ สลัดจ์ และ สารมลทินที่เป็นของแข็งซึ่งหนักกว่าน้ำมัน เมื่อทิ้งให้น้ำมันพักตัวในระยะหนึ่ง น้ำจะถูกถ่ายออกทางด้านล่างเป็นระยะและน้ำมันจะถูกถ่ายเทออกทางผิวบน

ค) การดูดซับสารมลทินที่ละลายได้

การดูดซับเป็นกระบวนการซึ่งสารหนึ่งสามารถดึงดูดและยึดสารอื่นไว้อย่างเหนียวแน่นบนผิวของตัวมัน สารมลทินในน้ำมันรวมทั้งน้ำ โดยมากเป็นสารมีขั้ว ซึ่งสามารถถูกดูดซับได้ง่าย สารดูดซับที่ใช้กันมากคือ ดินกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ อลูมินากัมมันต์ โมเลกุลาร์ซีฟ

การดูดซับกรดขึ้นกับอุณหภูมิ อัตราการไหล ความหนืดของน้ำมัน ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณกรดแรกเริ่มในน้ำมัน

ในที่นี้จะเน้นการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วย ดินกัมมันต์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2.6 วิธีการปรับปรุงสภาพน้ำมันหม้อแปลงด้วย ดินกัมมันต์

(BARANOWSKI L.B. , KELLY J. J.,1977)

มี 3 วิธี คือ

2.6.1 กระบวนการสัมผัส

วิธีนี้ใช้ดินกัมมันต์ชนิดผง กวนผสมกับน้ำมันที่ถูกอุ่นให้ร้อนในถังบรรจุขนาดใหญ่ในกระบวนการแบบปฏิบัติการเป็นครั้ง เมื่อครบระยะเวลาที่น้ำมันสัมผัสกับ ดินกัมมันต์แล้ว น้ำมันจะถูกนำไปผ่านตัวกรองแบบใช้แรงดัน เพื่อแยกดินกัมมันต์ที่ใช้แล้วออกจากน้ำมัน วิธีนี้ใช้เวลานานและใช้ดินกัมมันต์เป็นจำนวนมากหรืออาจต้องทำซ้ำหลายๆครั้งจนกว่าจะได้น้ำมันคุณภาพที่ดี จึงเหมาะสำหรับน้ำมันปริมาณไม่มากนัก

2.6.2 เครื่องดูดซับชนิดใช้ครั้งเดียวทิ้งและ ชนิดสามารถบรรจุใหม่ (THROW AWAY & REPACKABLE CANISTER)

วิธีนี้ใช้ดินกัมมันต์ชนิดเม็ดบรรจุในถังหรือถุงที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (หรือใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งไป) ในปริมาณ 10-30 ปอนด์ จากนั้นนำไปไว้ในถังกรองด้วยแรงดันแล้วให้น้ำมันไหลผ่านจากด้านนอกผ่านดินกัมมันต์เข้าไปยังท่อที่อยู่กึ่งกลาง โดยมีตัวกรองแบบผ้าพันรอบท่อ วิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายสูงมากเหมาะสำหรับใช้กับงานเร่งด่วนและน้ำมันเสื่อมสภาพมาก ซึ่งต้องใช้ดินกัมมันต์จำนวนมาก แต่สามารถเปลี่ยนถังบรรจุได้เร็ว ถึงแม้ว่าดินกัมมันต์ที่ใช้จะราคาถูก แต่ค่าแรงในการเปลี่ยนถุงดินกัมมันต์ จะสูง

2.6.3 ถังดูดซับรวม (BULK FILTER)

วิธีนี้ใช้ ดินกัมมันต์ ชนิดเม็ด บรรจุในถังขนาดใหญ่ที่สามารถทนแรงดันได้ทางด้านบน โดยมีตะแกรงกรองอย่างละเอียดอยู่ทางด้านล่าง น้ำมันที่ถูกอุ่นให้

ร้อนจะไหลผ่าน ดินกัมมันต์ แต่ละชั้นอย่างช้าๆ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก หรือใช้ความดันจากปั๊มป์น้ำมันอัดทางด้านขาเข้า กระบวนการนี้เรียกว่า การซึมผ่านโดยแรงโน้มถ่วงหรือใช้ความดัน ดินกัมมันต์ที่ใช้สามารถบรรจุในตะกร้าขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถแยกออกได้ง่าย หรือใช้พลั่วตักออกทางด้านข้าง หรือยกทั้งใบเอียงเท ดินกัมมันต์ ออกทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายของวิธีนี้ต่ำกว่าแบบชนิดสามารถบรรจุใหม่ แต่ดินกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะขนย้ายลำบาก

2.6.4 ถังดูดซับแบบซึมผ่านใต้ผิวชั้นสารดูดซับ (DEEP BED FILTRATION)

วิธีนี้ใช้ดินกัมมันต์บรรจุในถังทรงสูงหลายๆใบต่อกัน ซึ่งสามารถให้น้ำมันไหลผ่านทีละถัง เมื่อต่ออนุกรมกัน หรือไหลผ่านทุกถังเมื่อต่อขนานกัน เพื่อให้น้ำมันสัมผัสกับ ดินกัมมันต์ ได้ยาวนานขึ้น น้ำมันจะมีสภาพดีขึ้นมากจากการไหลผ่านเพียงครั้งเดียว นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ถังเพียง 2-3 ใบในขณะที่กำลังเปลี่ยนดินกัมมันต์ในอีกถังหนึ่ง จึงทำให้สามารถประหยัดเวลาในการเปลี่ยนดินกัมมันต์ และสามารถเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพ

ถังทรงสูงแต่ละใบนี้สามารถบรรจุ ดินกัมมันต์ ได้ 200-1300 กิโลกรัม ส่วนถังแบบเคลื่อนย้ายได้สามารถบรรจุดินกัมมันต์ได้ 100-400 กิโลกรัมดินกัมมันต์ ขนาดเล็กสามารถบรรจุโดยใช้แรงดูดสูญญากาศ ส่วน ดินกัมมันต์ ขนาดใหญ่บรรจุโดยใช้สายพานลำเลียง และมีเครื่องทำความร้อน หุ้มอยู่ภายนอกเพื่ออบดินกัมมันต์ ให้แห้งเพื่อนำไปทิ้งต่อไป

ดินกัมมันต์ ที่ใช้แล้วสามารถทำให้แห้งได้ โดยการดึงน้ำมันออกอย่างช้าๆเข้าไปในถังเก็บโดยใช้ปั๊มป์น้ำมัน ดินกัมมันต์นี้สามารถอมน้ำมันได้ตั้งแต่ 0.5-1.0 กิโลกรัมต่อ ดินกัมมันต์ 1 กิโลกรัม