

ความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานจากแอ่งพิชญ์โลก

นายวรภาพ ทองเสมอ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559

POROSITY AND PERMEABILITY OF SHALES FROM THE PHITSANULOK BASIN

Mister Worapop Thongsame

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology  
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Academic Year 2016

หัวข้อโครงการ

ความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานจากแอ่ง  
พิษณุโลก

โดย

นายวรภพ ทองเสมอ

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

อาจารย์ ดร.วรัญทร คณิตปัญญาเจริญ

วันที่ส่ง.....

วันที่อนุมัติ.....

.....  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก  
(อาจารย์ ดร.วรัญทร คณิตปัญญาเจริญ)

Project Title                   POROSITY AND PERMEABILITY OF SHALES FROM THE  
  PHITSANULOK BASIN  
By                                   Mister Worapop Thongsame  
Field of Study                 Geology  
Project Advisor                Waruntorn Kanitpanyacharoen, Ph.D.

---

Submitted date.....

Approval date.....

.....

Project Advisor  
(Waruntorn Kanitpanyacharoen, Ph.D.)

วรภพ ทองเสม : ความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานจากแอ่งพิษณุโลก. (POROSITY AND PERMEABILITY OF SHALES FROM THE PHITSANULOK BASIN) อ.ที่ปรึกษาโครงการ  
หลัก : อาจารย์ ดร.วรัญทร คณิตปัญญาเจริญ, 46 หน้า.

หินดินดานเป็นหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนขนาดเล็กในสภาพแวดล้อมที่มีพลังงานต่ำและมักจะมีการสะสมตัวของอินทรีย์สารร่วมด้วย เมื่อสารอินทรีย์ได้รับความร้อนและความดันที่เหมาะสมก็จะสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ และถูกกักเก็บไว้ในหินดินดานหรือหินกักเก็บชนิดอื่นๆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง การผลิตปิโตรเลียมขึ้นมาโดยตรงจากหินดินดานนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เนื่องจากหินดินดานมักจะมีพรุนและความซึมผ่านต่ำไม่เหมาะสมต่อการไหลของปิโตรเลียม แต่วิวัฒนาการของเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถผลิตก๊าซธรรมชาติขึ้นจากหินดินดานที่เป็นหินต้นกำเนิดได้โดยตรง โดยการอัดของเหลวด้วยแรงดันสูงเข้าไปสร้างรอยแตกในหินดินดาน เพื่อสร้างเส้นทางการไหลให้ก๊าซธรรมชาติเข้าสู่หลุมผลิตต่อไป แต่เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงและยังไม่มีการศึกษาลักษณะจำเพาะของหินดินดานอย่างละเอียดในประเทศไทย โครงการนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานจากหมวดหินขุมแสงซึ่งเป็นหินต้นกำเนิดปิโตรเลียมในพื้นที่แอ่งพิษณุโลกซึ่งเป็นแอ่งตะกอนบนบกที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย โดยใช้วิธีถ่ายภาพตัดขวางด้วยรังสีเอกซ์ซินโครตรอน เพื่อวิเคราะห์รูปร่างและการกระจายตัวของรูพรุนใน 3 มิติ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความซึมผ่านของหินดินดานและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลควบคู่ไปกับการใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซินโครตรอนในการหาปริมาณร่องค์ประกอบและการเรียงตัวของแร่ในหินดินดาน จากการศึกษาพบว่าหินดินดาน 5 ตัวอย่างประกอบไปด้วยแร่ดิน 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์และมีค่าความพรุนอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์รวมทั้งมีค่าความซึมผ่านของหินอยู่ในช่วง 10 ถึง 27 มิลลิดาซี ซึ่งค่าความพรุนและค่าความซึมผ่านที่วัดได้จากตัวอย่างหินดินดานนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณได้จากข้อมูลหารหยังธรณีหลุมเจาะ เนื่องจากเป็นวิธีการวัดค่าโดยตรงจากหินและปริมาตรของหินที่ใช้วัดมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ลักษณะของรูพรุนที่พบมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง ส่วนใหญ่เป็นรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคและรูพรุนที่เชื่อมต่อเป็นรอยแตก ซึ่งการเชื่อมต่อกันของรูพรุนแต่ละชนิดเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมค่าความซึมผ่านของหินและรูปแบบการไหลในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการไหลของของไหลในหินดินดานจะไหลได้ดีไปตามรอยแตกที่มักจะอยู่ในทิศทางที่ขนานกับระนาบชั้นหิน

ภาควิชา.....ธรณีวิทยา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....ธรณีวิทยา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....  
ปีการศึกษา.....2559.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 5632739423 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : POROSITY AND PERMEABILITY / POROSITY OF SHALE / PHITSANULOK BASIN

WORAPOP THONGSAME : POROSITY AND PERMEABILITY OF SHALES FROM THE PHITSANULOK BASIN. ADVISOR: WARUNTORN KANITPANYACHAROEN, Ph.D., 46 pp.

Shale is a fine-grained clastic sedimentary rock deposited in a low energy environment such as lacustrine, fluvial, and delta. Besides containing a large amount of clay minerals, shale is often composed of a significant content of organic material. Upon increasing of pressure and temperature over millions of years in the subsurface, the organic material in shale can gradually transform into petroleum. Over time petroleum can either slowly migrate to nearby porous rocks or remain trapped in shale. However petroleum production directly from shale reservoir is challenging due to its extremely small pore size and requires advanced techniques such as hydraulic fracturing and horizontal drilling. Hydraulic fracturing injects high-pressured fluid into shale to create large fractures, connecting small pores and providing suitable flow path for natural gas into the production well. Despite an abundance of research on shale characteristics worldwide, there is a lack of understanding of transport properties of organic-rich shale in Thailand. This study thus aims to investigate porosity and permeability of Chum Saeng Shale in the Phitsanulok Basin, which is the largest onshore basin, by using advanced X-ray techniques. Synchrotron X-ray Tomography (Syn-MCT) is used to analyze the three-dimensional distribution and morphology of pore and fracture at high resolution while synchrotron X-ray diffraction is used to determine mineral composition and preferred orientation. Results from Syn-MCT suggest that porosity of five shale samples ranges from 0.3 to 17 vol.% and the calculated absolute permeability ranges from 10 to 27 mD. Porosity and permeability of our measurements are higher than those from well-logging data as our study directly measures these parameter from shale plugs and uses different volumes of interest. The major pore types in these samples include intergranular pore and fracture pore. The 3D flow simulations of these samples also confirm that the permeability and flow pattern are mainly controlled by the morphology and connectivity of pores.

Department : .....Geology.....Student's Signature.....

Field of Study : ..Geology.....Advisor's Signature.....

Academic Year : 2016.....Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ หากปราศจากความช่วยเหลือจาก อ.ดร.วรัญทร คณิตปัญญาเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความอนุเคราะห์นำตัวอย่างไปฉายรังสีเอ็กซ์จากเครื่อง ซิงโครตรอนให้ที่สหรัฐอเมริกา คอยให้คำปรึกษาทั้งเรื่องการเรียน การทำงาน และการใช้ชีวิต คอยให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ คอยดูแลการใช้ชีวิตของผู้จัดทำในขณะที่ยังดำเนินงานอยู่ ยิ่งไปกว่านั้นยังคอยฝึกฝนทักษะต่าง ๆ ที่หาไม่ได้จากห้องเรียนให้กับผู้จัดทำ โดยผู้จัดทำจะไม่สามารถมีวันนี้ได้หากปราศจากคำแนะนำต่าง ๆ ของ อ.ดร.วรัญทร ตลอดช่วงเวลา 1 ปีที่ผ่านมา ดังนั้นจึงอยากขอขอบคุณ อ.ดร.วรัญทร ใน ณ ที่นี้ และสัญญาว่าจะนำความรู้ ความสามารถ และโอกาสที่อาจารย์มอบให้ ไปช่วยเหลือผู้อื่นต่อไป

ขอขอบคุณบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างหินดินดานจากแอ่งพิชญโลก โดยหาปราศจากตัวอย่างจากบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โครงการฉบับนี้คงเกิดขึ้นไม่ได้เป็นแน่

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบุคคลากรทุกท่านในภาควิชา รวมไปถึงคนที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำโครงการฉบับนี้ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจกันตอนระยะเวลา 1 ปี ในการจัดทำโครงการฉบับนี้ หากไม่มีทุกท่านอยู่โครงการฉบับนี้คงมีอาจสำเร็จลุล่วงไปได้

นายวรภพ ทองเสม

ผู้จัดทำ

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ .....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 ความพรุนและความซึมผ่าน (Porosity and Permeability).....	2
1.3 การศึกษาหินดินดานในปัจจุบัน.....	4
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	4
บทที่ 2 พื้นที่ศึกษา.....	5
2.1 แอ่งพิษณุโลก (Phitsanulok Basin) .....	5
2.2 ธรณีประวัติ (Geologic Background).....	6
2.3 การลำดับชั้นหิน (Stratigraphy).....	8
2.4 ระบบปิโตรเลียม (Petroleum system).....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	11
3.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง.....	11
3.2 การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) .....	11
3.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction).....	13
บทที่ 4 ผลงานวิจัย.....	15
4.1 การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) .....	15
4.2 ค่าความซึมผ่านได้ (Permeability).....	33
4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction).....	36
4.4 การจัดเรียงตัวของแร่ (Preferred - orientation) .....	36



บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล.....	42
5.1 อภิปรายผล.....	42
5.2 สรุปผล.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	แผนที่แสดงการกระจายตัวของแอ่งตะกอนในมหายุคซีโนโซอิก (Cenozoic basin).....	5
รูปที่ 2.2	แผนที่แสดงบล็อกของธรณีแปรสัณฐานบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....	7
รูปที่ 2.3	แผนที่แสดงการคลายตัวของเขตมุดตัวขวา-สุมาตรา.....	8
รูปที่ 2.4	การลำดับชั้นหิน (Stratigraphy) ของแอ่งพิซนุโลก.....	9
รูปที่ 2.5	ภาพตัดขวางในแนวตะวันออก - ตะวันตกของแอ่งพิซนุโลก.....	9
รูปที่ 3.1	แผนภาพการทำงานของภาพถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน.....	12
รูปที่ 3.2	สมบัติการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของวัตถุ.....	12
รูปที่ 3.5	แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน.....	13
รูปที่ 4.1	แผนภาพแสดงการแบ่งชนิดของรูพรุนตามการแบ่งชนิดของ Louck et al. (2012).....	16
รูปที่ 4.2	รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain)....	16
รูปที่ 4.3	รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelets).....	17
รูปที่ 4.4	รูพรุนชนิดรูพรุนบริเวณขอบของเม็ด (Pores at the edge of rigid grains) .....	17
รูปที่ 4.5	รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแร่ไฟไรต์แบบแพรมบอยดอล.....	18
รูปที่ 4.6	รูพรุนชนิดรูพรุนในแผ่นแร่ดิน (Intraplatelet pores within aggregates).....	18
รูปที่ 4.7	รูพรุนชนิดรอยแตกในตัวอย่างที่ 5.....	19
รูปที่ 4.8	การกระจายตัวและรูปร่างของรูพรุนในตัวอย่างหมายเลข 1.....	20
รูปที่ 4.9	การกระจายของของเคอโรเจนในตัวอย่างหมายเลข 1.....	20
รูปที่ 4.10	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของเคอโรเจนกับรูพรุน.....	21
รูปที่ 4.11	การกระจายตัวของแร่ซีเดอไรต์ในตัวอย่างหมายเลข 1.....	21
รูปที่ 4.12	การกระจายตัวของแร่ไฟไรต์ที่เกิดเป็นแบบแพรมบอยดอล (Framboidal pyrite).....	22
รูปที่ 4.13	การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 1.....	22
รูปที่ 4.14	รูพรุนตัวอย่างที่ 2.....	23
รูปที่ 4.15	เคอโรเจนในตัวอย่างที่ 2.....	24
รูปที่ 4.16	แร่ไฟไรต์ในตัวอย่างที่ 2.....	24
รูปที่ 4.17	การกระจายตัวของตัวอย่างที่ 2.....	25
รูปที่ 4.18	ภาพตัดขวางของตัวอย่างที่ 3 .....	26
รูปที่ 4.19	รูพรุนของตัวอย่างที่ 3.....	26
รูปที่ 4.20	ลักษณะของแร่ไฟไรต์ในตัวอย่างที่ 3.....	27
รูปที่ 4.21	การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 3.....	27
รูปที่ 4.22	รูพรุนในตัวอย่างที่ 4.....	28

รูปที่ 4.23 รูปที่ร่างของแร่ไพไรต์ในตัวอย่างที่ 4.....29

รูปที่ 4.24 แร่ดินในตัวอย่างที่ 4.....29

รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 4.....30

รูปที่ 4.26 รูพรุนในตัวอย่างที่ 5.....31

รูปที่ 4.27 เคอโรเจนในตัวอย่างที่ 5.....31

รูปที่ 4.28 แร่ไพไรต์ในตัวอย่างที่ 5.....32

รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 5.....32

รูปที่ 4.30 สมการของดาซีและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการ.....33

รูปที่ 4.31 แบบจำลองการไหลของของไหลผ่านตัวอย่างที่ 3.....34

รูปที่ 4.32 แบบจำลองการไหลของของไหลผ่านตัวอย่าง 4.....34

รูปที่ 4.33 แบบจำลองการไหลของของไหลผ่านตัวอย่างที่ 5.....35

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาตัวอย่างด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน.....	15
ตารางที่ 4.2 ค่าความพรุนและค่าความซึมผ่านของทั้ง 5 ตัวอย่าง.....	33
ตารางที่ 4.3 ปริมาณแร่องค์ประกอบของทั้ง 5 ตัวอย่าง.....	36

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

หินดินดาน (shale) เป็นหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนขนาดเล็กมาก ๆ ทำให้ลักษณะจำเพาะต่าง ๆ ของหินดินดานมีขนาดเล็กตามไปด้วย เช่น รูพรุน การเรียงตัวของแร่ ส่งผลให้เราไม่สามารถศึกษาหินดินดานด้วยตาเปล่าหรือนำแผ่นหินขัดบาง (Thin section) ของหินไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ดังนั้นในการศึกษาหินดินดานจึงได้ใช้เทคโนโลยีอื่น ๆ เข้ามาช่วย เช่น การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ซึ่งเป็นการใช้รังสีเอ็กซ์ฉายไปในหินดินดานเพื่อดูโครงสร้างภายในสามมิติที่ละเอียดระดับไมครอน และการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction) ที่เป็นการใช้สมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวัดปริมาณแร่องค์ประกอบและการเรียงตัวของแร่ (Kanitpanyacharoen *et al.*, 2013)

ปัจจุบันหินดินดานถูกนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้นในต่างประเทศ เช่น การกักเก็บกากกัมมันตรังสีจากโรงงานผลิตไฟฟ้านิวเคลียร์ และการผลิตปิโตรเลียมจากหินดินดาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตปิโตรเลียมจากหินดินดานที่ใช้วิธีการอัดของไหลแรงดันสูงไปสร้างรอยแตกในหินดินดาน เพื่อให้ก๊าซธรรมชาติไหลเข้าสู่หลุมผลิต ทำให้หลายประเทศสามารถผลิตปิโตรเลียมได้ในปริมาณมหาศาล เช่น สหรัฐอเมริกา รัสเซีย เป็นต้น ดังนั้นสำหรับประเทศไทยจึงควรมีการศึกษาหินดินดานเพื่อดูศักยภาพในการผลิตปิโตรเลียม ซึ่งการศึกษาหินดินดานเพื่อดูศักยภาพในการผลิตปิโตรเลียมจำเป็นที่จะต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดาน ซึ่งทำการตรวจวัดให้แม่นยำได้ยากเนื่องจากรูพรุนในหินดินดานมีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร) ดังนั้นการตรวจวัดความพรุนและความซึมผ่านในหินดินดานโดยตรงในห้องปฏิบัติการจึงทำได้ยากและจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง

การศึกษาหินดินดานในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก สำหรับการเริ่มต้นศึกษาจึงควรเริ่มจากพื้นที่ที่มีหินดินดานที่เป็นหินต้นกำเนิดจำนวนมากและมีโอกาสที่จะสามารถพัฒนาเป็นแหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติจากหินดินดานต่อไปได้ในอนาคต ซึ่งแอ่งพิชญ์โลกเป็นแอ่งสะสมตะกอนบนบกที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทยและมีการผลิตปิโตรเลียมอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นแอ่งพิชญ์โลกจึงเป็นพื้นที่ที่ดีที่สุดในการเริ่มศึกษาหินดินดานเพื่อผลิตก๊าซธรรมชาติจากหินดินดาน

## 1.2 ความพรุนและความซึมผ่าน (Porosity and Permeability)

รูพรุน (Pore or void) หมายถึง ช่องว่างภายในเนื้อหินโดยอาจจะมีของเหลวหรืออากาศบรรจุอยู่ในช่องว่างนั้นก็ได้ ซึ่งรูพรุนเกิดเนื่องจากตะกอนสะสมตัวแล้วยังมีช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนอยู่ ต่อมาเกิดการอัดแน่นของตะกอนแต่ช่องว่างนั้นก็ยังไม่ถูกปิดจึงทำให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้น สำหรับในหินทราย รูปร่างของรูพรุนมักจะมีลักษณะเรียบง่าย เช่น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม เนื่องมาจากแรงค์ประกอบของหินทรายมีรูปที่ร่างกลมหรือเป็นแท่ง แต่ในกรณีของหินดินดานซึ่งประกอบไปด้วยแร่ดิน (Clay mineral) จำนวนมาก ซึ่งรูปร่างของแร่ดินมักเป็นแผ่นบาง ๆ ขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการจัดเรียงแร่ได้หลายรูปที่แบบ ส่งผลให้เกิดรูพรุนได้หลายรูปที่แบบเช่นกัน

ความพรุน (Porosity) หมายถึง ปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของหินทั้งหมด ซึ่งการวัดค่าความพรุนของหินนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กราฟประมาณค่าความพรุนจากปริมาณของแร่ดิน จากสมมติฐานที่ว่าถ้าปริมาณของแร่ดินเพิ่มขึ้น ค่าความพรุนจะลดลง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถทำได้ง่าย เพียงแค่หาปริมาณแร่ดินแล้วนำไปเทียบกับกราฟต้นแบบ แต่ข้อเสียคือเป็นการประมาณเท่านั้น และการที่ปริมาณแร่ดินเพิ่มขึ้นค่าความพรุนก็ไม่จำเป็นต้องลดลงเสมอไป (Shevvin et al., 2006)

อีกวิธีหนึ่งคือการวัดจากการหยั่งธรณีหลุมเจาะ (Well logging) โดยทั่วไปแล้วมักอาศัยข้อมูลจากผลบันทึกทางคลื่นเสียง (Sonic log) เป็นการส่งคลื่นเสียงเข้าไปในชั้นหินแล้วบันทึกช่วงเวลาทีคลื่นเคลื่อนที่กลับมา จะทำให้เราได้ค่าความเร็วช่วงชั้นของชั้นหิน (Interval velocity) ซึ่งค่าความเร็วช่วงชั้นของชั้นหินจะเป็นสมบัติเฉพาะตัวของชนิดหินและค่าความพรุน ผลบันทึกความหนาแน่น (Density log) เป็นการส่งรังสีแกมมาไปยังชั้นหิน จากนั้นรังสีแกมมาจะเข้าไปชนกับอิเล็กตรอน แล้วถูกดูดกลืนไปส่วนรังสีแกมมาที่เหลืออยู่ก็จะเดินทางกลับมายังตัวตรวจจับ ถ้าหินมีความหนาแน่นมากปริมาณอิเล็กตรอนก็จะมากตามและการดูดกลืนของรังสีแกมมาก็จะมากเช่นกัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นได้แก่ ชนิดหิน ความพรุน และชนิดของของไหลในรูพรุน และผลบันทึกนิวตรอน (Neutron log) เป็นการยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในชั้นหิน โดยอนุภาคนิวตรอนในของรูพรุนเต็มไปด้วยน้ำหรือน้ำมันซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรเจนอะตอม พออนุภาคนิวตรอนชนเข้ากับไฮโดรเจนจะถูกดูดกลืนไป จากนั้นนิวตรอนที่เหลือจะวิ่งกลับมายังหลุม ดังนั้นถ้าปริมาณนิวตรอนถูกดูดกลืนไปมากจะแสดงถึงมีค่าความพรุนที่มากตาม สำหรับข้อดีของการหยั่งธรณีหลุมเจาะคือเป็นค่าที่วัดได้ดิน จึงเป็นการวัดค่าความพรุนของตัวอย่างในสภาวะจริง แต่ข้อเสียของการหยั่งธรณีหลุมเจาะคือเป็นการวัดค่าความพรุนโดยอ้อม มีความละเอียดต่ำไม่สามารถตรวจวัดรูพรุนในระดับไมโครเมตรได้ และเป็นการเฉลี่ยทุก ๆ 15 เซนติเมตรจึงได้รับผลกระทบจากสิ่งต่าง ๆ มากมาย เช่น การแทรกสลับของหินชนิดอื่นที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 15 เซนติเมตร ชนิดของของไหลในรูพรุน ชนิดของแรงค์ประกอบ และความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น (Bowers and Katsube, 2002)

สำหรับอีกวิธีหนึ่งคือการอัดปรอทในหลอดสูญญากาศ (Mercury Injection Capillary Pressure, MICP) โดยการอัดปรอทเข้าไปในหินที่ถูกเก็บอยู่ในหลอดสูญญากาศซึ่งปริมาณปรอทที่หายไปจะเท่ากับค่าความพรุน โดยข้อดีของวิธีนี้จะเป็นการวัดค่าความพรุนโดยตรง แต่ข้อเสียคือต้องนำตัวอย่างขึ้นมาบนผิวดิน ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างสูญเสียดังกล่าวที่ตัวอย่างเคยเป็นเมื่ออยู่ใต้ดิน และทำให้ตัวอย่างปนเปื้อนไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ห่ออื่นได้ (Olson and Grigg, 2008)

วิธีใหม่ที่ได้รับการพัฒนามาจากเทคโนโลยีทางการแพทย์คือการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ของตัวอย่างหิน ซึ่งเป็นการฉายรังสีเอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่าง เพื่อดูโครงสร้างภายในของตัวอย่างแบบ 3 มิติ ทำให้เห็นถึงรูปร่างของรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน รวมไปถึงการเชื่อมต่อกันของรูพรุน ข้อดีของวิธีการนี้คือการวัดค่าความพรุนโดยตรง และมีความละเอียดสูงสามารถตรวจวัดรูพรุนในระดับไมโครเมตรได้ ข้อเสียคือตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีขนาดเล็กจึงทำให้ต้องมีการวัดหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลครอบคลุมทั้งพื้นที่และยังมีต้นทุนในการวิเคราะห์ตัวอย่างสูงอีกด้วย

ความซึมผ่าน (Permeability) หมายถึง ความสามารถของของไหลในการไหลผ่านวัตถุที่มีรูพรุน โดยค่าความซึมผ่านไม่จำเป็นต้องแปรผันตามค่าความพรุน เนื่องจากปัจจัยที่ควบคุมค่าความซึมผ่านนั้นคือรูปร่างและการเชื่อมต่อกันของรูพรุน โดยทั่วไปในการวัดค่าความซึมผ่านจะทำได้โดยสมมติว่าของไหลไหลผ่านตัวอย่างตามกฎของดาศี (Darcy's law) สำหรับการวัดค่าความซึมผ่านของหินนั้นทำได้โดยการเก็บตัวอย่างขึ้นมา แล้วทำการอัดของไหล เช่น แก๊สฮีเลียม ผ่านตัวอย่างแล้วทำการวัดค่าความดันบริเวณที่ของไหลไหลเข้าไปในตัวอย่างและบริเวณที่ของไหลไหลออกจากตัวอย่าง ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง และอัตราการไหลของของไหลผ่านตัวอย่าง จากนั้นจึงนำค่าต่าง ๆ ไปแทนค่าในสมการของดาศีเพื่อหาค่าความซึมผ่าน (Sun *et al.*, 2016) ซึ่งมีข้อเสียคือตัวอย่างจะสูญเสียดังกล่าวได้ผิวโลกและตัวอย่างจะปนเปื้อนจนไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ห่ออื่นได้

สำหรับการวัดค่าความซึมผ่านโดยการใช้ข้อมูลจากวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) นั้น จะเป็นการนำของมูลที่ได้จากการวัดค่าความพรุนมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยกฎของดาศีเช่นเดียวกัน แล้วทำการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ เป็นตัวแปรได้ผิวโลก เช่น ค่าความหนืดใช้ค่าความหนืดของน้ำมัน ความดันใช้ความดันได้ผิวโลก เป็นต้น แต่จะมีข้อเสียคือใช้ต้นทุนสูง และจำลองการไหลได้ในพื้นที่ขนาดเล็กจึงอาจจะไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่

### 1.3 การศึกษาหินดินดานในปัจจุบัน

สำหรับในประเทศไทยนั้นมีการศึกษาหินดินดานในด้านของโครงสร้าง สภาพแวดล้อมการเกิดมากมาย แต่ในการศึกษาความพรุนและความซึมผ่านนั้น ยังไม่มีการศึกษาในประเทศไทยมากนัก จะมีก็เพียงแต่การศึกษาทางธรณีเคมี แล้วคำนวณกลับมาเป็นค่าความพรุน กับการบันทึกค่าจากการหยั่งธรณีเท่านั้น ไม่ได้มีการนำตัวอย่างขึ้นมาวัดค่าความพรุนกับการซึมผ่านโดยตรงแต่การศึกษาในต่างประเทศ ได้มีการนำวิธีการใหม่ ๆ มาทำการศึกษาความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดาน เพื่อหาค่าความพรุนและความซึมผ่านที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปช่วยในการประเมินศักยภาพในการผลิตปิโตรเลียมหรือการกักเก็บกักกัมมันตรังสีของหินดินดานต่อไป

Kuila et al. (2014) ได้ทำการวัดค่าความพรุนของหินดินดานจาก 2 แหล่ง คือ จากตะวันออกของยุโรปและตะวันออกเท็กซัส โดยในวิธีการแช่น้ำ (water immersion porosimetry) โดยวิธีนี้จะคล้ายกับการอัดปรอทในหลอดสูญญากาศ แต่จะเป็นการนำหินไปแช่น้ำให้อิ่มตัว แล้วหลังจากนั้นจึงทำการรอบตัวอย่างให้แห้ง จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักระหว่างตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำและแห้ง เพื่อดูน้ำหนักของน้ำที่หายไปจากตัวอย่าง ซึ่งปริมาตรของรูพรุนจะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่หายไป ข้อดีคือทำได้ง่าย แต่ข้อเสียคือไม่สามารถวัดค่าความพรุนของหินบริเวณที่รูพรุนไม่มีการเชื่อมต่อกันได้

การศึกษาลักษณะเฉพาะของรูพรุนในหินดินดานคูไซบะ (Qusaiba Shale) จากประเทศซาอุดีอาระเบีย (Abouelresh, 2016) โดยทำการศึกษาหลายวิธีเริ่มจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อศึกษาแร่ประกอบในหินดินดาน การทำธรณีเคมี (Geochemistry) เพื่อศึกษาอินทรีย์สารในหินดินดาน การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM-EDS) เพื่อศึกษารูปร่างของรูพรุน และใช้การสั่นพ้องของคลื่นสนามแม่เหล็กนิวเคลียร์ (Nuclear magnetic resonance) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของรูพรุนและวัดค่าความพรุน หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดมารวมกัน ทำให้ได้ลักษณะเฉพาะของรูพรุนในหินดินดาน โดยข้อดีคือจะได้ทั้งค่าความพรุนที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและได้รูปร่างของรูพรุน แต่ข้อเสียคือใช้เวลาและการศึกษาจะต้องแบ่งตัวอย่างตามแต่ละวิธีศึกษา จึงทำให้เป็นการวัดค่าคนละจุดของตัวอย่าง

### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาลักษณะรูปร่างและการเชื่อมต่อกันของรูพรุนในหินดินดานจากแอ่งพิซนุโลก ซึ่งเป็นหินต้นกำเนิดปิโตรเลียม แล้วนำไปคำนวณหาค่าความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานภายในแอ่งพิซนุโลก เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตปิโตรเลียมต่อไป



## บทที่ 2 พื้นที่ศึกษา

### 2.1 แอ่งพิษณุโลก (Phitsanulok Basin)

แอ่งพิษณุโลกเป็นแอ่งสะสมตะกอนที่เกิดการสะสมตัวในยุคพาลีโอจีน (Paleogene) มหายุคซีโนโซอิก (Cenozoic) ซึ่งเป็นแอ่งสะสมตะกอนบกที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทย โดยตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของประเทศไทยครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดพิษณุโลก จังหวัดกำแพงเพชร และจังหวัดพิจิตร มีพื้นที่ประมาณ 6,000 ตารางกิโลเมตร ซึ่งสภาพแวดล้อมการสะสมตัวในอดีตส่วนใหญ่เป็นธารน้ำพาทะเลสาบ (Fluvio – lacustrine) ที่เกิดจากแรงดึงออกในช่วงสมัยไมโอซีน (Miocene extension) (PTTEP, 2009)



รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงการกระจายตัวของแอ่งตะกอนในมหายุคซีโนโซอิก (Cenozoic basin) โดยแอ่งพิษณุโลกเป็นแอ่งตะกอนบนบกที่ใหญ่ที่สุด (USGS, 2014)

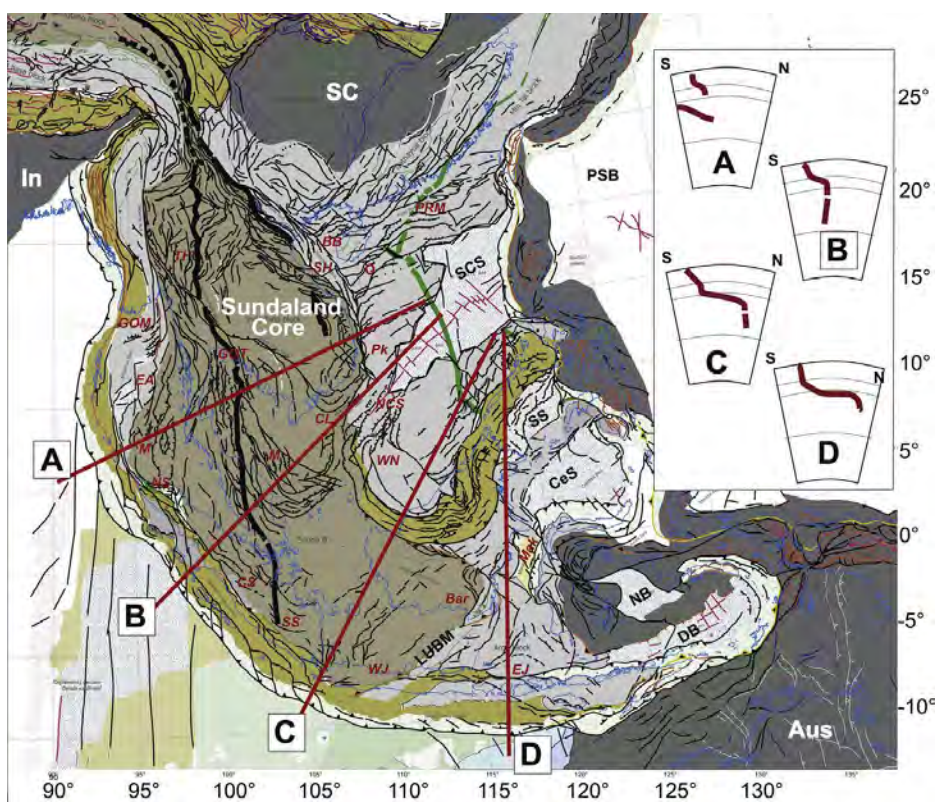
## 2.2 ธรณีประวัติ (Geologic Background)

ประเทศไทยเกิดการรวมกันของแผ่นเปลือกโลกขนาดเล็ก 2 แผ่นที่ชื่อว่า แผ่นเปลือกโลกซิวมาสุ (Sibumasu) และแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (Indochina) โดยที่ในอดีตทั้งสองแผ่นเคยเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นดินกอนวานา (Gondwana land) โดยแผ่นเปลือกโลกทั้ง 2 แผ่นได้แยกออกจากแผ่นดินกอนวานาในช่วงเวลาที่ต่างกัน จากนั้นช่วงยุคเพอร์เมียน (Permian) ทั้ง 2 แผ่นได้เคลื่อนที่เข้ามาชนกันจนเกิดขึ้นมาเป็นประเทศไทย ซึ่งผลจากการชนกันของทั้ง 2 แผ่นทำให้เกิดรอยเลื่อนแนวระดับ (Strike – slip fault) ขนาดใหญ่ 3 รอยเลื่อน ได้แก่ รอยเลื่อนแม่น้ำแดง (Red – river fault) รอยเลื่อนแม่ปิง (Mae Ping fault) และรอยเลื่อนสกาย (Sagang fault) (Charusiri and Pum-Im, 2009)

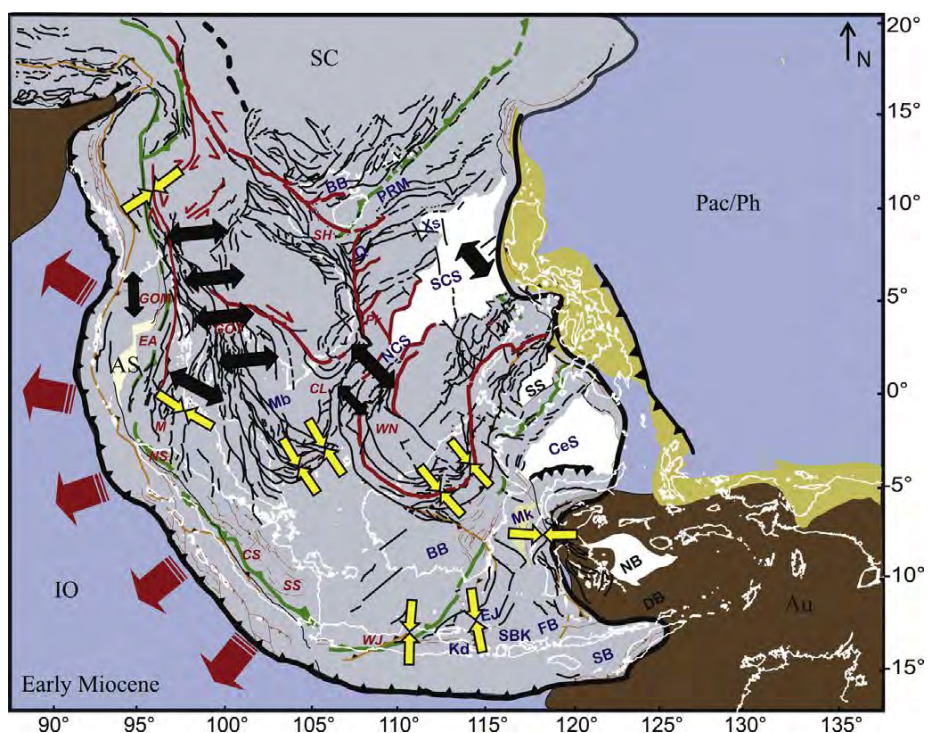
หลังจากในช่วงยุคพาลีโอจีน (Paleogene) ได้มีการเปิดออกของแอ่งตะกอน (Sedimentary basin) จำนวนมากตามแนวเหนือใต้ (North – South) ในประเทศไทย โดยอายุของแอ่งตะกอนจะไล่ตั้งแต่อายุแก่บริเวณทิศใต้ไปจนถึงอายุน้อยบริเวณทิศเหนือ (Younging to the north) ซึ่งแอ่งพิชฌุโลกเองก็เป็นหนึ่งในแอ่งตะกอนที่เปิดออกในช่วงนั้นเช่นกัน สำหรับการเปิดออกของแอ่งตะกอนยุคพาลีโอจีนในประเทศนั้นยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร แต่ก็มีอยู่หลัก ๆ 2 ทฤษฎีด้วยกัน คือการที่แอ่งตะกอนเปิดออกเนื่องจากรอยเลื่อนแนวระดับ (Strike – slip fault) และแอ่งเกิดจากการดึงออก (Rifting)

Charusiri and Pum-Im (2009) ได้แบ่งการเกิดของแอ่งตะกอนยุคพาลีโอจีนออกเป็น 4 ช่วงด้วยกัน ช่วงแรกคือช่วงดึงออกและสะสมตัวระหว่างดึงออก (Pull apart and Synrifting episode) ช่วงระหว่าง 55 ถึง 35 ล้านปีก่อน ซึ่งตรงกับสมัยอีโอซีน (Eocene) ในช่วงนี้แผ่นทวีปอินเดีย (Indian plate) ได้เคลื่อนที่เข้ามาชนกับแผ่นทวีปยูเรเชีย (Eurasia plate) ส่งผลให้รอยเลื่อนแนวระดับขนาดใหญ่ (Strike – slip fault) ขนาดใหญ่ 3 รอยเลื่อน ได้แก่ รอยเลื่อนแม่น้ำแดง (Red – river fault) รอยเลื่อนแม่ปิง (Mae Ping fault) และรอยเลื่อนสกาย (Sagang fault) เกิดการเลื่อนตัวอีกครั้ง แต่ทิศทางการเลื่อนตัวเกิดในทิศที่ตรงกันข้าม ส่งผลให้เกิดแรงดึงออกในแนวเหนือใต้ของประเทศไทยเกิดเป็นแอ่งตะกอนขึ้น ช่วงที่ 2 คือช่วงทรุดตัวด้วยความร้อน (Quiescent thermal subsidence) อยู่ระหว่าง 35 ถึง 15 ล้านปีก่อน ในช่วงนี้แรงจากการดึงออกเริ่มลดลง แต่ตัวแอ่งตะกอนจะเกิดการทรุดตัว เนื่องจากได้รับอิทธิพลของความร้อนจากแนวภูเขาไฟในฝั่งอันดามันและการพลุมนของเนื้อโลก (Mantle plume) ในฝั่งอ่าวไทย ช่วงที่ 3 ช่วงเลื่อนตัวแบบบีบ (Transpressional Wrenching Episode) ช่วงนี้จะอยู่ระหว่าง 15 ถึง 10 ล้านปีก่อน ในช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนแนวแรงจากการดึงออกเป็นดันเข้า ทำให้เกิดโครงสร้างชั้นหินคดโค้งและการผกผัน (Folding and Inversion) ขึ้นภายในแอ่งตะกอนต่าง ๆ และช่วงสุดท้ายคือช่วงหลังจากการดึงออก (Post – rifting Episode) อยู่ระหว่าง 15 ล้านปีก่อนถึงปัจจุบัน ในช่วงนี้จะเป็นหลังจากที่แอ่งตะกอนหยุดการพัฒนาแล้ว จากนั้นจึงมีตะกอนชุดใหม่ในยุคปัจจุบันเข้ามาปิดทับ ซึ่งลักษณะของตะกอนก็จะแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมในแต่ละพื้นที่

Pubellier and Morley (2014) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาของแอ่งตะกอนบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมไปจนถึงแผ่นเปลือกโลกภาคพื้นทวีปและมหาสมุทรในบริเวณนี้ โดยบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ประกอบด้วยบล็อกของธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic block) หลัก ๆ ทั้งหมด 5 บล็อก ได้แก่ บล็อกอินเดีย (India block) บล็อกออสเตรเลีย (Australia) บล็อกจีนใต้ (South China) บล็อกซุนดาแลนด์ (Sundaland block) และบล็อกชวา-สุมาตรา (Java – Sumatra block) ซึ่งการเคลื่อนตัวของบล็อกของธรณีแปรสัณฐานในยุคพาลีโอจีน (Paleogene) ถึงยุคนีโอจีน (Neogene) จะเป็นตัวการทำให้แอ่งตะกอนบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เปิดออก นอกจากนั้นยังเป็นตัวการกำหนดลักษณะทางโครงสร้างและสภาพแวดล้อมการสะสมตัวของแอ่งตะกอนอีกด้วย โดยแอ่งพิซญูโลกเป็นแอ่งตะกอนที่เปิดออกในช่วงสมัยไมโอซีน (Miocene) โดยในช่วงนั้นได้มีการคลายตัวของการมุดตัว (Subduction) บริเวณเขตมุดตัวชวา-สุมาตรา (Java – Sumatra subduction zone) จึงส่งผลให้เกิดแรงดึงออก (Extension) บริเวณตอนกลางของประเทศไทย จึงทำให้แอ่งพิซญูโลกเปิดออกและเกิดการพัฒนาต่อไป



รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงบล็อกของธรณีแปรสัณฐานบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งประกอบไปด้วยบล็อกหลัก ๆ ทั้งหมด 5 บล็อก ได้แก่ บล็อกอินเดีย (India block) บล็อกออสเตรเลีย (Australia) บล็อกจีนใต้ (South China) บล็อกซุนดาแลนด์ (Sundaland block) และบล็อกชวา-สุมาตรา (Java – Sumatra block) (Pubellier and Morley, 2014)

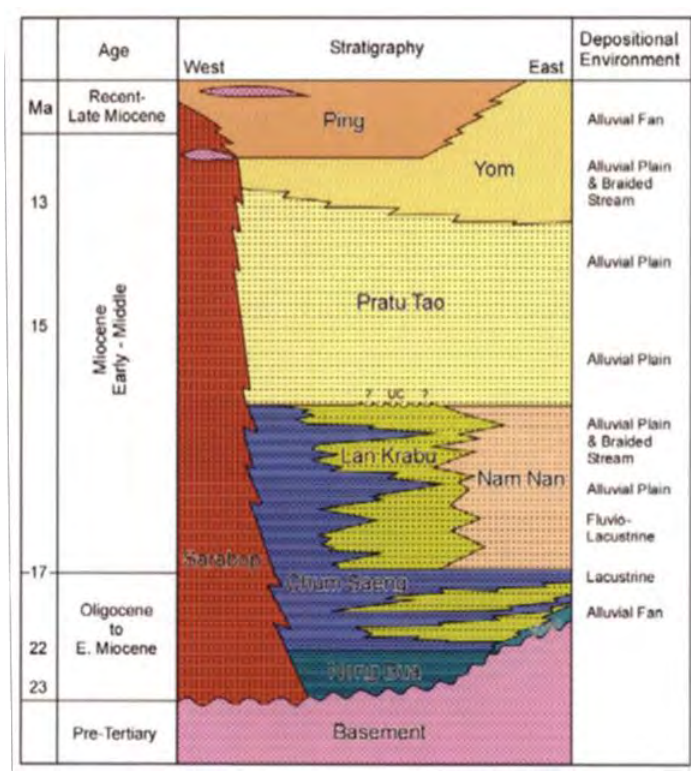


รูปที่ 2.3 แผนที่แสดงการเคลื่อนตัวของเขตมุดตัวชาวา-สุมาตรา (Java – Sumatra subduction zone) ในบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ จึงทำให้บริเวณตอนกลางของประเทศไทยเกิดแรงดึงออกขึ้น (Pubellier and Morley, 2014)

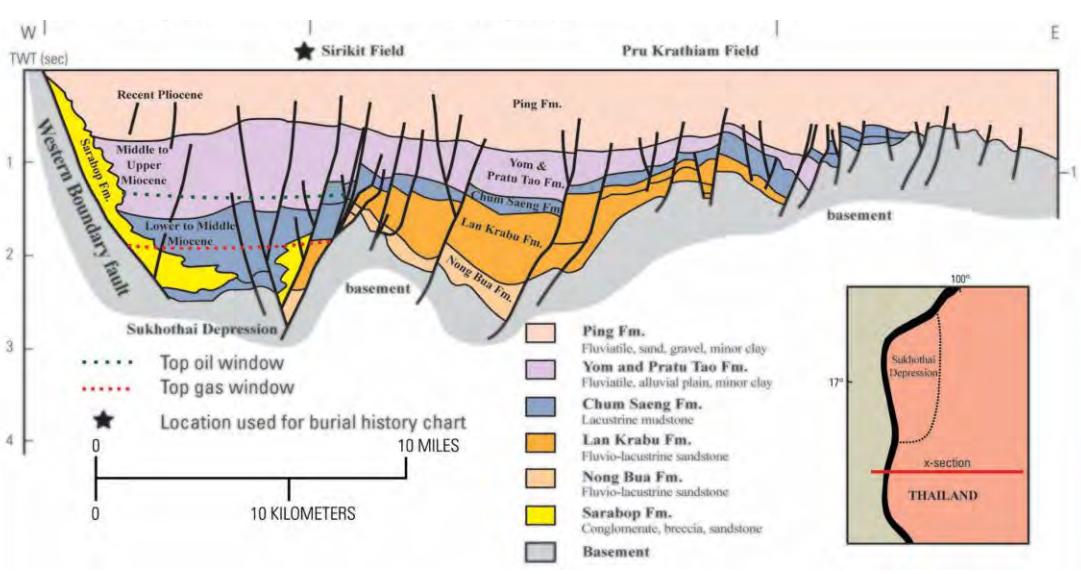
### 2.3 การลำดับชั้นหิน (Stratigraphy)

ในแอ่งพิษณุโลกนั้นจะประกอบไปด้วยหินตะกอนเนื้อประสม (Clastic sedimentary rock) ทั้งหมด เริ่มจากสมัยโอลิโกซีน (Oligocene) ถึงไมโอซีนตอนต้น (Early Miocene) เป็นช่วงที่แอ่งตะกอนเริ่มเปิดจึงได้ตะกอนขนาดใหญ่และมีมาทัวริตี้ต่ำ โดยสภาพแวดล้อมการสะสมตัวนั้นจะเริ่มตั้งแต่ตะกอนน้ำพารูปที่พัด (Alluvial fan) ในหมวดหินสารบบ (Sarabop Formation) ซึ่งเกิดบริเวณขอบแอ่งทางด้านทิศตะวันตก แล้วพัฒนามาเป็นธารน้ำพปากแม่น้ำ (Fluvio – deltaic) จนถึงสภาพแวดล้อมแบบทะเลสาบ (Lacustrine) ในบริเวณกลางแอ่งและขอบแอ่งด้านตะวันออก ในหมวดหินหนองบัว (Nong Bua Formation) ถัดจากนั้นในช่วงไมโอซีนตอนต้นถึงตอนกลาง (Early to Middle Miocene) สภาพแวดล้อมการสะสมตัวที่เด่นในช่วงนั้นคือทะเลสาบ (Lacustrine environment) ในหมวดหินชุมแสง (Chum Sang Formation) และธารน้ำพปากแม่น้ำ (Fluvio – deltaic) ในหมวดหินลานกระบือ (Lan Krabu Formation) นอกจากนี้ยังพบการสะสมตัวแบบแม่น้ำประสานสาย (Braided river) ในหมวดหินน้ำ่าน (Nam Nan Formation) หลังจากนั้นมีการปิดทับของตะกอนธารน้ำพ (Fluvial environment) ในหมวดหินปะดู่เท่า (Pratu Tao Formation) ซึ่งมีการสะสมตัวแบบแม่น้ำโค้งตัว (Meandering river) ทำให้ประกอบด้วยหินตะกอนที่มีตะกอนขนาดเล็ก ซึ่งสะสมตัวในสภาพแวดล้อมแบบที่ราบน้ำท่วมถึง (Flood plain) เป็นหลัก จากนั้นมีการปิดทับของหมวดหินยม (Yom Formation)

ซึ่งสะสมตัวในสภาพแวดล้อมแบบตะกอนน้ำพาตรงพื้นราบ (Alluvial plain) ร่วมกับแม่น้ำประสานสาย (Braided river) สุดท้ายจึงถูกปิดทับด้วยหมวดหินปิง (Ping Formation) ในช่วงไมโอซีนตอนปลายถึงปัจจุบัน (Late Miocene to Recent) ที่สะสมตัวในสภาพแวดล้อมแบบธารน้ำพา (Fluvial environment) (PTTEP, 2009)



รูปที่ 2.4 การลำดับชั้นหิน (Stratigraphy) ของแอ่งพิษณุโลก (PTTEP, 2009)



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางในแนวตะวันออก - ตะวันตกของแอ่งพิษณุโลก (PTTEP, 2009)

## 2.4 ระบบปิโตรเลียม (Petroleum system)

หินต้นกำเนิด (Source rock) ในแอ่งพิชญ์โลกนั้นเป็นหินดินดาน หินโคลน และหินทรายแป้งในหมวดหินขุมแสง ซึ่งสภาพแวดล้อมการสะสมตัวเป็นแบบทะเลสาบ (Lacustrine) ทำให้มีความหนาของชุดหินถึง 300 เมตร จากการวิเคราะห์ค่าทางด้านธรณีเคมีพบว่าหมวดหินนี้ประกอบไปด้วยเคโรเจนแบบที่ 1 2 และ 3 (Kerogen Type I, II, III) ทำให้ปิโตรเลียมที่ได้มีทั้งน้ำมันและแก๊ส ช่วงเวลาที่เกิดปิโตรเลียมโดยประมาณอยู่ที่ 16 ล้านปีก่อน นอกจากนั้นด้วยการรบกวนของแบคทีเรียทำให้ปิโตรเลียมบางส่วนแปรสภาพไป ทำให้มีความหนืดสูงขึ้น (PTTEP, 2009)

หินกักเก็บ (Reservoir rock) ในแอ่งพิชญ์โลกประกอบไปด้วยหลายหมวดหินที่มีความสามารถจะเป็นหินกักเก็บได้ เช่น หมวดหินประตูท่าและหมวดหินยม แต่หินกักเก็บหลักของแอ่งนี้หมวดหินลานกระบือ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมการสะสมตัวแบบธารน้ำทะเลสาบ (Fluvio - lacustrine) โดยมีหมวดหินนี้มีการเชื่อมติดกับหมวดหินขุมแสงในลักษณะแบบนิ้วมือเชื่อมติดกัน (interfingering) ซึ่งแสดงหมวดหินขุมแสงและหมวดหินลานกระบือมีการสะสมตัวในช่วงเวลาเดียวกัน แล้วมีการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมทางด้านข้าง (Lateral facies change) สำหรับค่าความพรุนของหมวดหินลานกระบือนั้นอยู่ที่ประมาณ 20 – 30 % ความหนาของชั้นหินค่อนข้างน้อยอยู่ที่ประมาณ 1 – 7 เมตร แทรกสลับ (Interbedded) อยู่กับหมวดหินขุมแสงและมีความต่อเนื่องด้านข้าง (Lateral connectivity) ค่อนข้างดี (PTTEP, 2009)

หินปิดกั้น (Seal) เนื่องหมวดหินขุมแสงที่เป็นหินต้นกำเนิดนั้นเป็นหินที่เกิดจากการสะสมตัวด้วยตะกอนขนาดเล็ก จึงทำให้มีค่าความพรุนและความซึมผ่านต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นหมวดหินขุมแสงยังวางตัวปิดทับหมวดหินลานกระบือที่เป็นหินกักเก็บอีกด้วย ส่งผลให้หมวดหินขุมแสงที่เป็นหินต้นกำเนิดทำหน้าที่เป็นหินปิดกั้นในแอ่งพิชญ์โลกด้วย (PTTEP, 2009)

โครงสร้างกักเก็บ (Trap) ในแอ่งพิชญ์โลกเกิดจากการเปิดแอ่งแบบแยกออก จึงทำให้ประกอบไปด้วยรอยเลื่อนมากมายภายในแอ่ง ซึ่งตัวรอยเลื่อนนี้เองที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างกักเก็บแบบโครงสร้าง (Structural trap) นอกจากนั้นการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมทางด้านข้าง (Lateral facies change) ของหมวดหินลานกระบือกับหมวดหินขุมแสง ยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างกักเก็บแบบลำดับชั้นหิน (Stratigraphic trap) อีกด้วย (PTTEP, 2009)

การเกิดของปิโตรเลียม (Petroleum generation) ในแอ่งพิชญ์โลกนั้นอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 14 – 16 ล้านปีก่อน แล้วจากนั้นปิโตรเลียมจึงเคลื่อนที่ออกจากหมวดหินขุมแสงไปสะสมตัวยังหมวดหินลานกระบือ (PTTEP, 2009)

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

สำหรับการศึกษาค่าความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานนั้น สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้นั้นจะเป็นการใช้สมบัติบางประการของรังสีเอ็กซ์เข้ามาช่วย ได้แก่สมบัติการดูดกลืนและเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยที่ใช้สมบัติการดูดกลืนเพื่อดูโครงสร้างภายในของหินดินดาน ตั้งแต่รูปร่างที่ว่างของรูพรุน การกระจายตัว รวมไปถึงจนถึงการเชื่อมต่อกันของรูพรุน ส่วนสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้นใช้เพื่อวัดปริมาณของแร่แต่ละชนิดในหินดินดานและการจัดเรียงตัวของแร่

### 3.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

หินดินดานที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหินดินดานที่ได้จากแอ่งพิชญ์โลก โดยเป็นหินดินดานที่อยู่ใต้ผิวโลก ลึกลงไปได้ดิน ทำการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการเจาะลงไปใต้ผิวโลกแล้วเก็บแท่งตัวอย่างขึ้นมา จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาแบ่งเป็นส่วน ๆ เพื่อนำไปศึกษาในด้านต่าง ๆ ต่อไป หลังจากได้แท่งตัวอย่างมาแล้ว จึงเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาตัดให้ได้เป็นรูปที่ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มม. ยาว 5 มม. จากนั้นจึงทำการฝนตัวอย่างให้ผิวของตัวอย่างเรียบเสมอกัน เพื่อให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนพื้นผิวของตัวอย่างสม่ำเสมอ

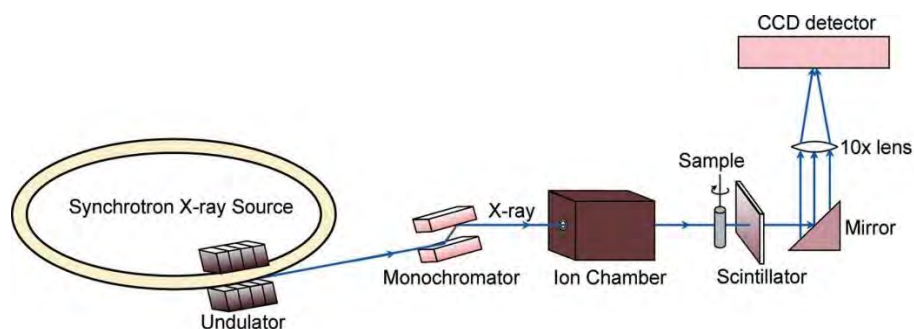
### 3.2 การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography)

สำหรับการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอนนั้น เป็นการอาศัยคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างทรงกระบอกไปยังรังสีเอ็กซ์ที่กำเนิดจากเครื่องซินโครตรอน (Synchrotron) จากนั้นรังสีจะไปตกกระทบบนตัวอย่างและเกิดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ขึ้น โดยที่วัตถุแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ไว้ในปริมาณที่ไม่เท่ากันและรังสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังแผ่นรับภาพเพื่อทำการบันทึกข้อมูล (รูปที่ 3.1) หลังจากนั้นจึงหมุนตัวอย่างอีก 0.125 องศา แล้วทำการยิงรังสีเอ็กซ์อีกครั้งหนึ่ง รังสีบางส่วนก็จะถูกดูดกลืนด้วยแร่ บางส่วนก็จะถูกส่งผ่านไปยังแผ่นรับภาพ ทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จากองศาที่ 0 จนถึงองศาที่ 180 ก็จะทำให้เราได้ภาพโครงสร้างภายในของตัวอย่างในทุก ๆ องศา จากนั้นเราจึงนำทุกภาพที่ได้มาสร้างเป็นภาพจำลองของตัวอย่างแบบ 3 มิติขึ้นมา (Kanitpanyacharoen *et al.*, 2013)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างนั้นเราทำได้โดยอาศัยสมบัติของความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่ไม่เท่ากันของวัตถุแต่ละชนิดตามกฎของเบียร์ (Beer's law) โดยอากาศหรือของเหลวนั้นจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในปริมาณที่ต่ำมาก แต่แร่บางชนิดที่ประกอบด้วยธาตุที่มีอิเล็กตรอนมาก เช่น ไพไรต์ที่ประกอบด้วย

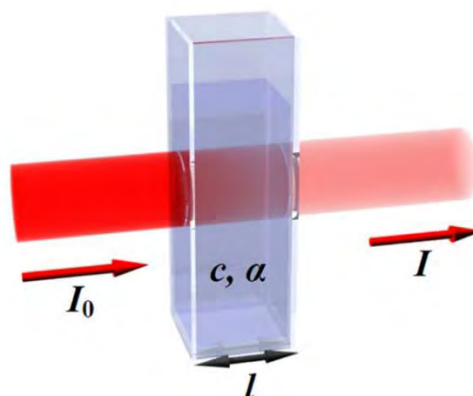
อะตอมของธาตุเหล็ก จะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ไว้มาก พอเรานำค่าความเข้มของการดูดกลืนมาแสดงเป็นภาพสีเทา 256 เกรดสี ก็จะได้ภาพส่วนที่เป็นรูพรุนมีสีเข้ม เช่น สีดำ แต่ส่วนที่เป็นแร่ก็จะมีสีสว่าง เช่น ไฟไรต์ก็จะมีสีขาว แร่ควอตซ์ก็จะมีสีเทา เป็นต้น จากสมบัติการดูดกลืนนี้จะทำให้เราสามารถแยกรูพรุนออกจากส่วนที่เป็นแร่ได้ แล้วเราจึงทำการเลือกช่วงสีที่เป็นรูพรุน เพื่อทำการเลือกรูพรุนของตัวอย่างทั้งตัวอย่าง จากนั้นจึงทำการคำนวณปริมาณรูพรุนออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ สุดท้ายจึงทำการจำลองการไหลของของไหลเข้าไปในตัวอย่าง โดยใช้สมการของดาร์ซี เพื่อคำนวณหาค่าความซึมผ่านของตัวอย่างออกมา

กฎของเบียร์ (Beer's law) เป็นกฎที่อธิบายถึงสมบัติการดูดกลืนแสงของวัตถุ โดยกฎของเบียร์กล่าวไว้ว่าเมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน ซึ่งหมายถึงเมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุแสงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนไว้ตามความสามารถในการดูดกลืนแสงของวัตถุแต่ละชนิด อีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านไปตามสมการ  $I = I_0 e^{-klc}$  โดยที่  $I$  คือค่าความเข้มแสงที่ปล่อยออกมา  $I_0$  คือค่าความเข้มแสงเริ่มต้นที่ยิงเข้าไปในตัวอย่าง  $K$  คือค่าความสามารถการดูดกลืนแสง  $l$  คือความยาวของวัตถุ  $c$  คือความเข้มข้นของตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของ การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography)

(Kanitpanyachoen et al., 2013)



รูปที่ 3.2 สมบัติการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของวัตถุ จะเห็นว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านวัตถุจะถูกดูดกลืนไว้บางส่วน และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไป (ที่มา images.slideplayer.com)



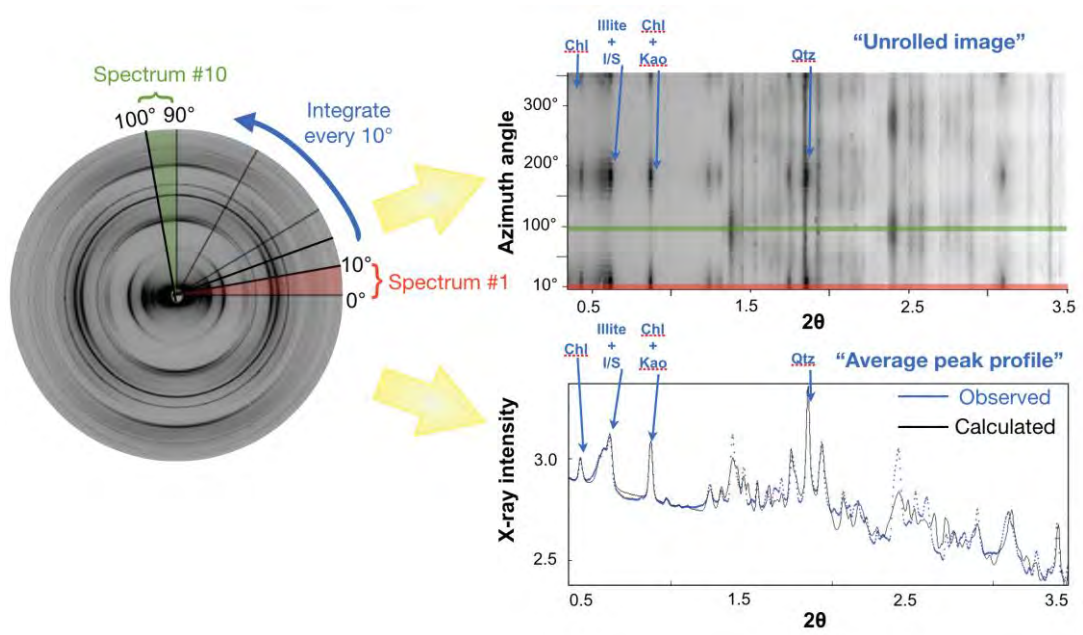
### 3.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอนนั้นการทำงานจะคล้ายกับการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างทรงกระบอกไปยิงรังสีเอ็กซ์ แล้วจากนั้นรังสีจะเข้าไปตกกระทบกับตัวแร่เกิดการเลี้ยวเบนขึ้น จากนั้นรังสีที่เลี้ยวเบนก็จะไปตกลงบนแผ่นรับภาพ โดยที่เราจะสามารถรู้ชนิด ปริมาณ และการเรียงตัวของแร่ได้จากกฎของแบร็ก (Bragg's law) พอเราได้ข้อมูลขององศาแรกแล้วก็ทำการหมุนตัวอย่างในองศาถัดไป ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 180 องศา ก็จะได้ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในทุกมุมของตัวอย่างมาโดยแสดงผลเป็นกราฟ (Kanitpanyacharoen *et al.*, 2013)

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นสร้างกราฟจำลองขึ้นมาโดยใส่ตัวแปรต่าง ๆ เข้าไป เช่น ชนิดแร่ การเรียงตัวของแร่ และขนาดของผลึกแร่ เป็นต้น พอใส่ค่าหนึ่งเข้าไปแล้วโปรแกรมจะทำการสร้างกราฟจำลองของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ขึ้นมา โดยกราฟจำลองนี้เปรียบเสมือนว่าเรามีหินที่ประกอบด้วยแร่ชนิดที่เราใส่ค่าลงไปและมีลักษณะรูปร่างรวมถึงการเรียงตัวตามที่กำหนด นำไปยิงรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอนแล้วก็จะได้กราฟออกมา จะเห็นได้ว่าถ้าเราใส่ค่าตัวแปรที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงกราฟที่เราได้ออกมานั้นก็จะมีค่าใกล้เคียงกับกราฟที่เราได้จากการทดลอง พอปรับค่าจนใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุดแล้วจึงวัดปริมาณของแร่และแสดงค่าการเรียงตัวของแร่แบบโพลีเฟอร์ (Pole figure)

กฎของแบร็ก (Bragg's law) เป็นการใช้สมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อระบุชนิดของแร่ โดยแร่จะมีระนาบการเรียงตัวของอะตอมที่ซ้ำกัน เรียกว่า ระนาบแลตทิซ (Lattice plane) ซึ่งโครงสร้างผลึกของแร่เกิดจากการต่อกันของระนาบแลตทิซนี้จนเป็น 3 มิติ โดยที่แร่แต่ละชนิดจะมีระยะห่างของระนาบแลตทิซไม่เท่ากัน เมื่อยิงรังสีเอ็กซ์ตกลงบนระนาบแลตทิซจะทำให้รังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบน ด้วยระยะห่างของระนาบแลตทิซที่ไม่เท่ากันในแต่ละแร่ ทำให้มุมการเลี้ยวเบนในแต่ละแร่ไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อทราบมุมการเลี้ยวเบนก็จะทำให้ทราบได้ว่าหินประกอบไปด้วยแร่ชนิดใดบ้าง ทราบความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนก็จะทราบปริมาณของแร่ ทราบความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนในแต่ละองศาที่ยิงรังสีก็จะทราบการเรียงตัวของแร่ โดยหากแร่มีการเรียงตัวที่องศาใดมาก erson นั้นก็จะมีค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนมาก

โพลีเฟอร์ (Pole figure) คือการแสดงค่าการเรียงตัวของแร่บนพื้นที่ทรงกลม ซึ่งหลักการคล้ายกับสเตอริโอเน็ต โดยเริ่มจากการสะท้อนระนาบของแร่ขึ้นไปตกกระทบบนพื้นผิวทรงกลมสมมติ แล้วทำการฉายระนาบลงมาที่พื้นผิววงกลม จากนั้นนำค่าความหนาแน่นของข้อมูลที่ได้มาแสดงในรูปที่ของสี ถ้าบริเวณใดมีสีเข้มแสดงถึงการเรียงตัวในบริเวณนั้นมาก ซึ่งทำเช่นนี้กับทุก ๆ แกนของแร่ จึงสามารถทราบได้ว่าแร่แต่ละชนิดมีการเรียงตัวมากในแกนใด



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซิงโครตรอน (Kanitpanyacharoen *et al.*, 2013)

## บทที่ 4 ผลงานวิจัย

### 4.1 การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography)

สำหรับตัวอย่างหินดินดานในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นหินดินดานที่เชื่อว่าเป็นหินต้นกำเนิดปิโตรเลียม (Petroleum source rock) ในพื้นที่แอ่งพิบูลย์โลก ซึ่งก็คือหินดินดานจากหมวดหินชุมแสง (Chum Seang Formation) นั้นเอง จากการศึกษาหินดินดานด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ซึ่งเป็นการใช้สมบัติการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่ไม่เท่ากันของวัตถุแต่ละชนิดทำให้สามารถแยกแยะรูพรุน เคอโรเจน และแร่ชนิดต่าง ๆ ในแต่ละตัวอย่างได้ตามตารางที่ 4.1



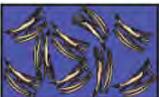
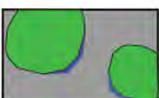









ตัวอย่าง	รูพรุน (%*)	เคอโรเจน (%*)	แร่ไพไรต์ (%*)	แร้ซีเดอไรต์ (%*)	แร่ดิน (%*)
1	0.31	1.51	0.26	2.81	-
2	0.52	1.44	0.01	-	-
3	17.02	-	0.03	-	-
4	7.17	-	0.02	-	0.33
5	1.75	1.76	0.07	-	-

\*เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Volume %)

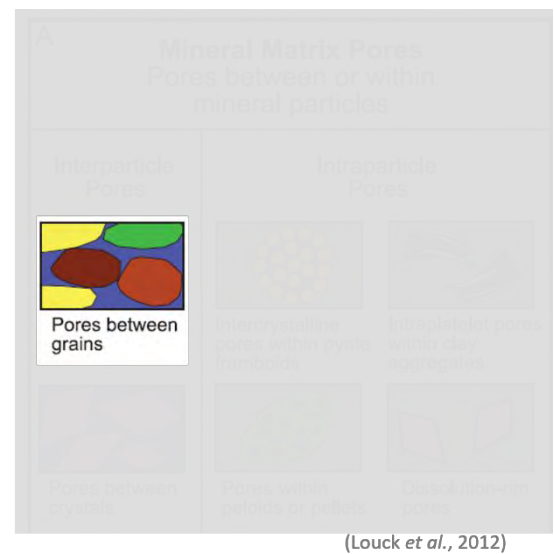
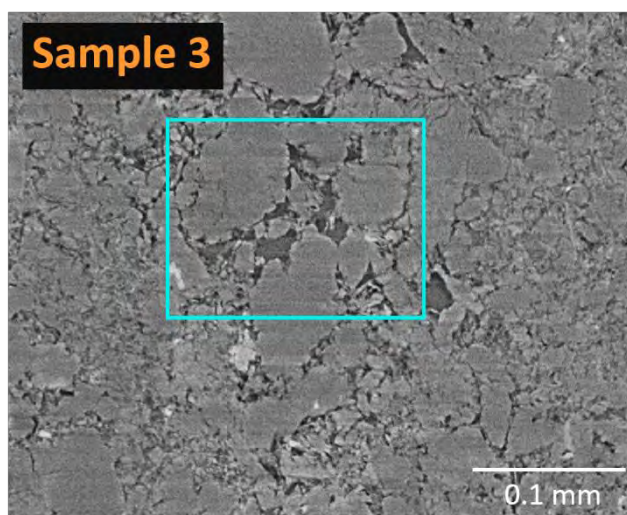
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาตัวอย่างด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography)

#### 4.1.1 ประเภทของรูพรุน

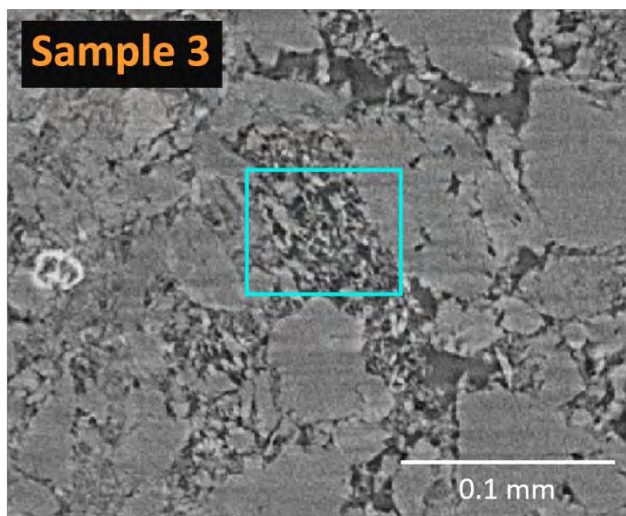
โดยหลังจากได้ทำการศึกษารูพรุนด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ทำให้ได้ค่าความพรุนแล้ว การใช้วิธีนี้ยังทำให้สามารถมองเห็นรูปร่างของรูพรุนและโครงสร้างภายในของตัวอย่างอีกด้วย จึงทำให้สามารถแบ่งแยกชนิดของรูพรุนตามการแบ่งชนิดของ Louck *et al.* (2012) ในรูปที่ 4.1 ซึ่งแบ่งแยกชนิดตามที่อยู่ของรูพรุนได้แก่ รูพรุนที่อยู่ในอนุภาคของแร่ รูพรุนที่อยู่ในอินทรียสาร และรูพรุนชนิดรอยแตก สำหรับการศึกษานี้ได้พบรูพรุนชนิดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ รูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) ดังรูปที่ 4.2 รูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelets) ดังรูปที่ 4.3 รูพรุนบริเวณขอบของเม็ด (Pores at the edge of rigid grains) ดังรูปที่ 4.4 รูพรุนระหว่างแร่ไพไรต์แบบแฟรมบอยดอล (Intercrystalline pore within pyrite framboids) ดังรูปที่ 4.5 รูพรุนในแผ่นแร่ดิน (Intraplatelet pores within aggregates) ดังรูปที่ 4.6 และรูพรุนชนิดรอยแตก (Fracture pore) ดังรูปที่ 4.7

A Mineral Matrix Pores Pores between or within mineral particles		Organic-Matter Pores Pores within organic matter	Fracture Pores Pores not controlled by individual particles
<p><b>Interparticle Pores</b></p>  <p>Pores between grains</p>  <p>Pores between crystals</p>  <p>Pores between clay platelets</p>  <p>Pores at the edge of rigid grains</p>	<p><b>Intraparticle Pores</b></p>  <p>Intercrystalline pores within pyrite framboids</p>  <p>Intraplatelet pores within clay aggregates</p>  <p>Pores within peloids or pellets</p>  <p>Dissolution-rim pores</p>  <p>Pores within fossil bodies</p>  <p>Moldic pores after a crystal</p>  <p>Moldic pores after a fossil</p>	<p>Organic-Matter Pores</p> 	<p>Fracture Pores</p> 
(Louck <i>et al.</i> , 2012)			

รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการแบ่งชนิดของรูพรุนตามการแบ่งชนิดของ Louck *et al.* 2012

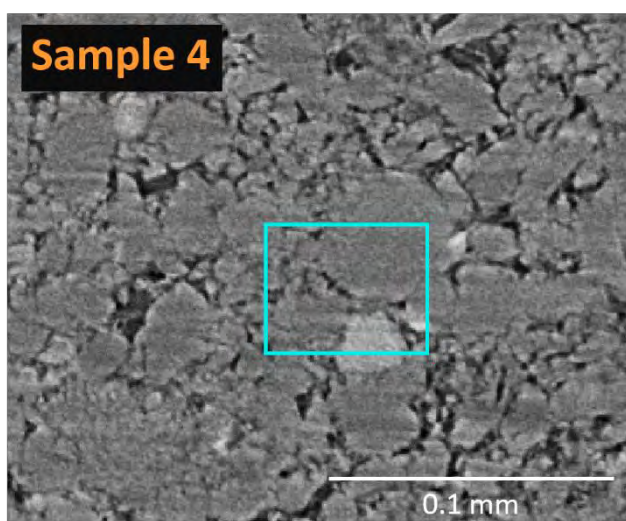


รูปที่ 4.2 รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) โดยลักษณะเด่นของรูพรุนชนิดนี้คือ มีขนาดใหญ่และมีการเชื่อมต่อกันดี (High connectivity)



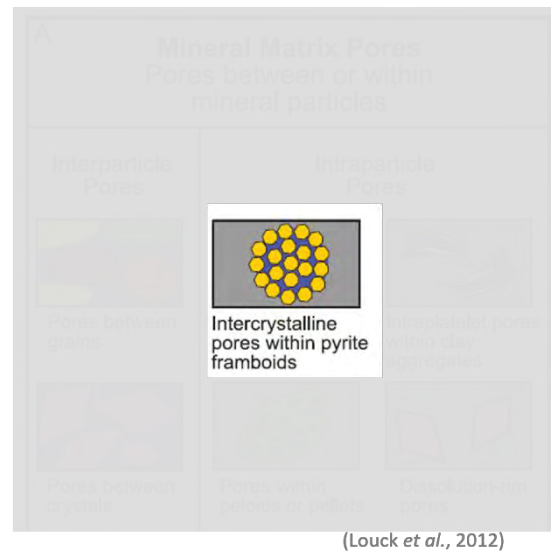
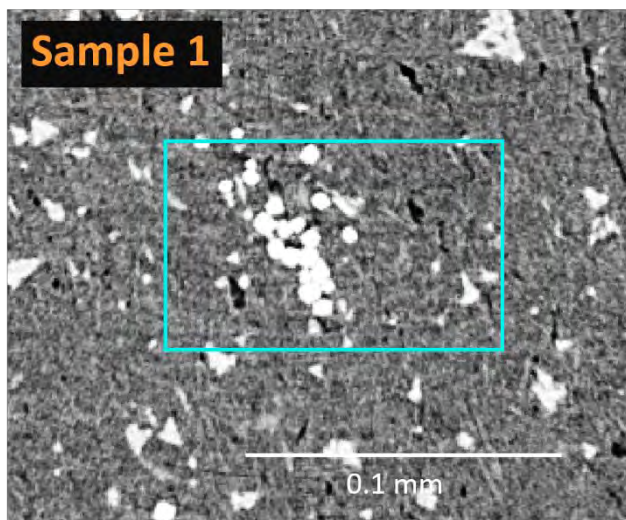
(Louck *et al.*, 2012)

รูปที่ 4.3 รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelets) ลักษณะเด่นของรูพรุนชนิดนี้คือ มีขนาดเล็กและการเชื่อมต่อกันต่ำ (Low connectivity)

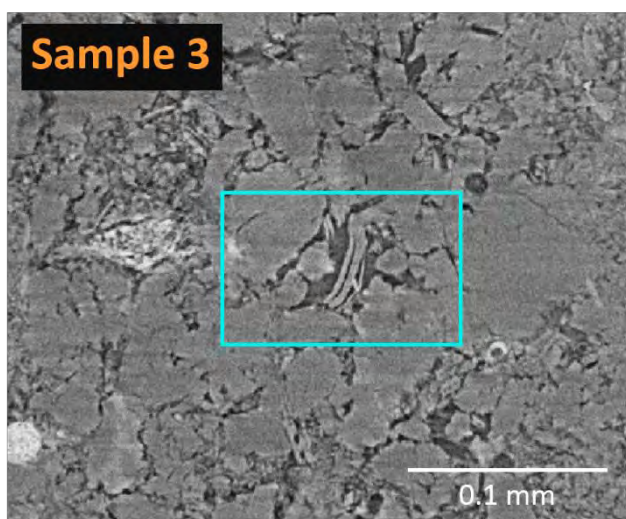


(Louck *et al.*, 2012)

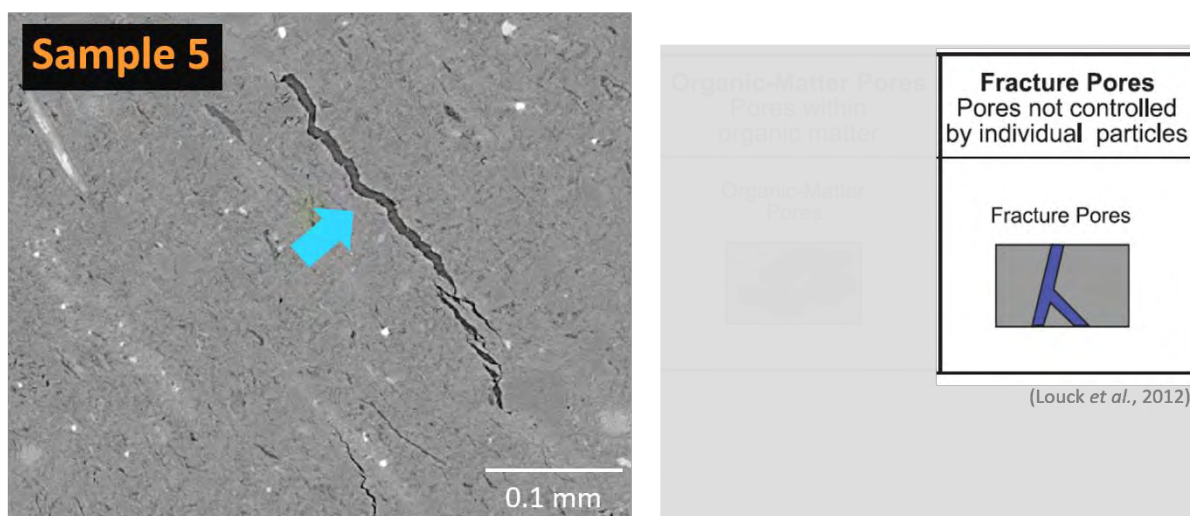
รูปที่ 4.4 รูพรุนชนิดรูพรุนบริเวณขอบของเม็ด (Pores at the edge of rigid grains) ซึ่งรูพรุนชนิดนี้จะพบได้น้อยมาก มีขนาดเล็กและการเชื่อมต่อกันต่ำ (Low connectivity)



รูปที่ 4.5 รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแร่ไพไรต์แบบแฟรมบอยดอล (Intercrystalline pore within pyrite framboids) โดยลักษณะเด่นของรูพรุนชนิดนี้จะมีขนาดเล็กและการเชื่อมต่อกันต่ำ (Low connectivity)



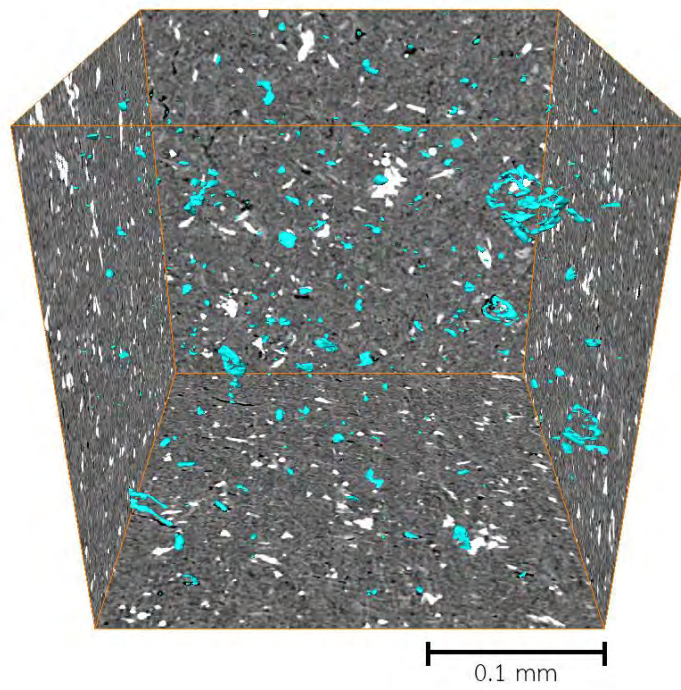
รูปที่ 4.6 รูพรุนชนิดรูพรุนในแผ่นแร่ดิน (Intraplatelet pores within aggregates) เป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กและมีการเชื่อมกันต่ำ (Low connectivity)



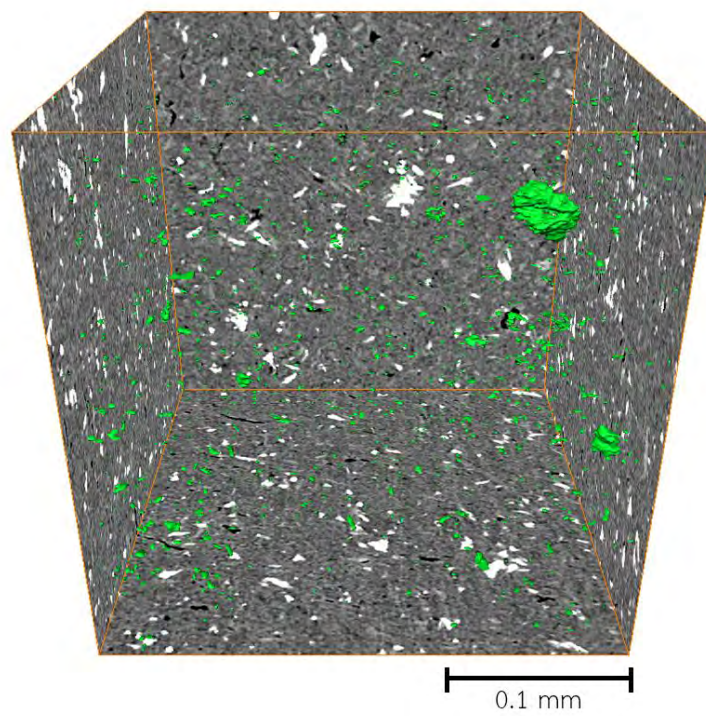
รูปที่ 4.7 รูพรุนชนิดรอยแตกในตัวอย่างที่ 5 ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ รูปร่างเป็นแนวตรง มีขนาดปานกลาง และการเชื่อมต่อกันสูง (High connectivity)

#### 4.1.2 การวิเคราะห์รูพรุนในหินดินดาน

ตัวอย่างหมายเลข 1 ประกอบไปด้วยรูพรุน 0.31 เปอร์เซ็นต์ กระจายตัวดังรูปที่ 4.8 เคอโรเจน 1.51 เปอร์เซ็นต์ กระจายตัวดังรูปที่ 4.9 แร่ซิงเคอไรต์ 2.81 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.11) และแร่ไพไรต์ 2.81 เปอร์เซ็นต์ โดยในตัวอย่างนี้จะประกอบไปด้วยรูพรุนระหว่างอนุภาค (Interparticle pore) ชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelet) และรูพรุนในอนุภาค (Intraparticle pore) ชนิดรูพรุนระหว่างแร่ไพไรต์แบบแพรมบอยดอล (Intercrystalline pore within pyrite framboids) ซึ่งเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก จึงทำให้ในตัวอย่างนี้มีค่าความพรุนต่ำ และมีเคอโรเจนแทรกอยู่ตามรูพรุน (รูปที่ 4.10) เนื่องจากเคอโรเจนเกิดจากการแปรสภาพของสารอินทรีย์ภายในหิน จากนั้นจึงมารวมตัวกันในช่องว่างของหินหรือในรูพรุน แล้วจึงเปลี่ยนสภาพเป็นเคอโรเจน นอกจากรูปร่างของรูพรุนแล้วการใช้ภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ซึ่งโคตรอนยังสามารถหาขนาดของรูพรุนและสร้างเป็นแผนภาพการกระจายตัวของรูพรุนได้อีกด้วย (รูปที่ 4.13) สำหรับในตัวอย่างนี้แร่ไพไรต์แสดงลักษณะแบบแพรมบอยดอล (framboidal pyrite) ซึ่งแสดงถึงการตกสะสมตัวในสภาวะไร้ออกซิเจนอีกด้วย (รูปที่ 4.12)

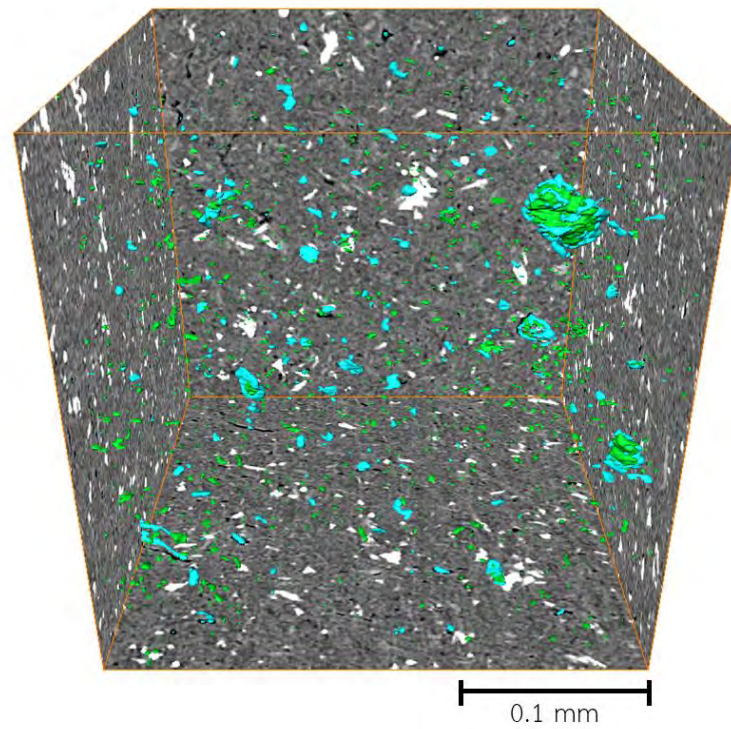


รูปที่ 4.8 การกระจายตัวและรูปร่างของรูพรุน (สีฟ้า) ในตัวอย่างหมายเลข 1

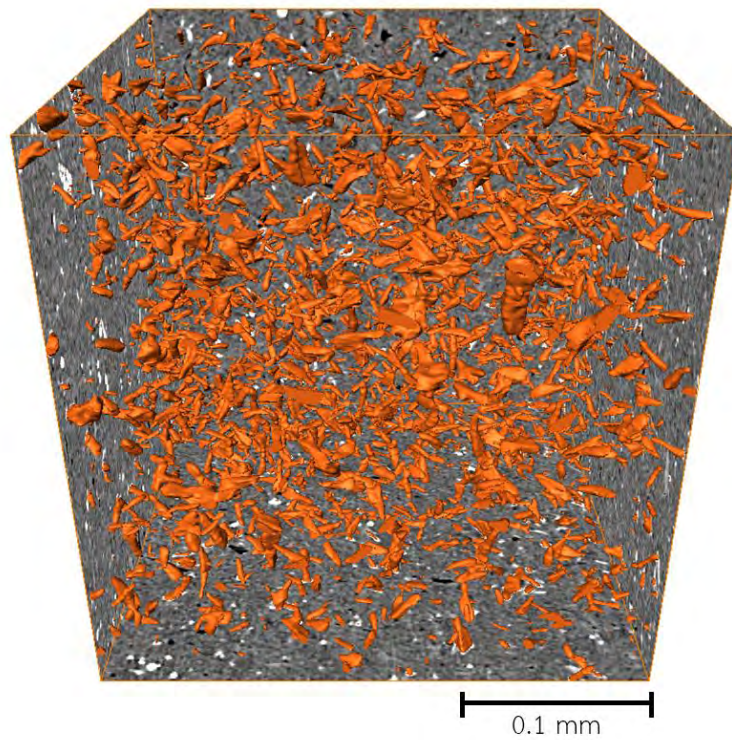


รูปที่ 4.9 การกระจายตัวและรูปร่างของเคอโรเจน (สีเขียว) ในตัวอย่างหมายเลข 1

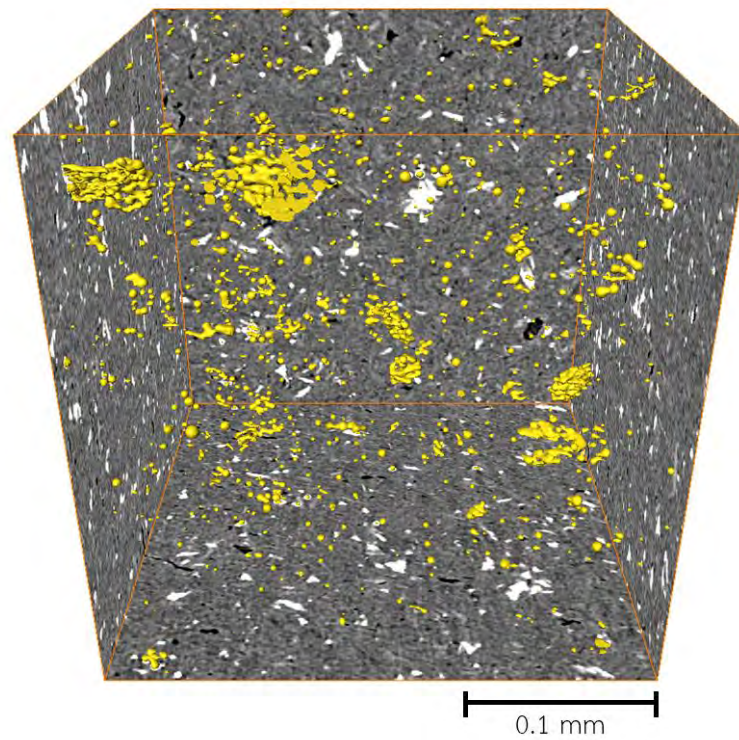




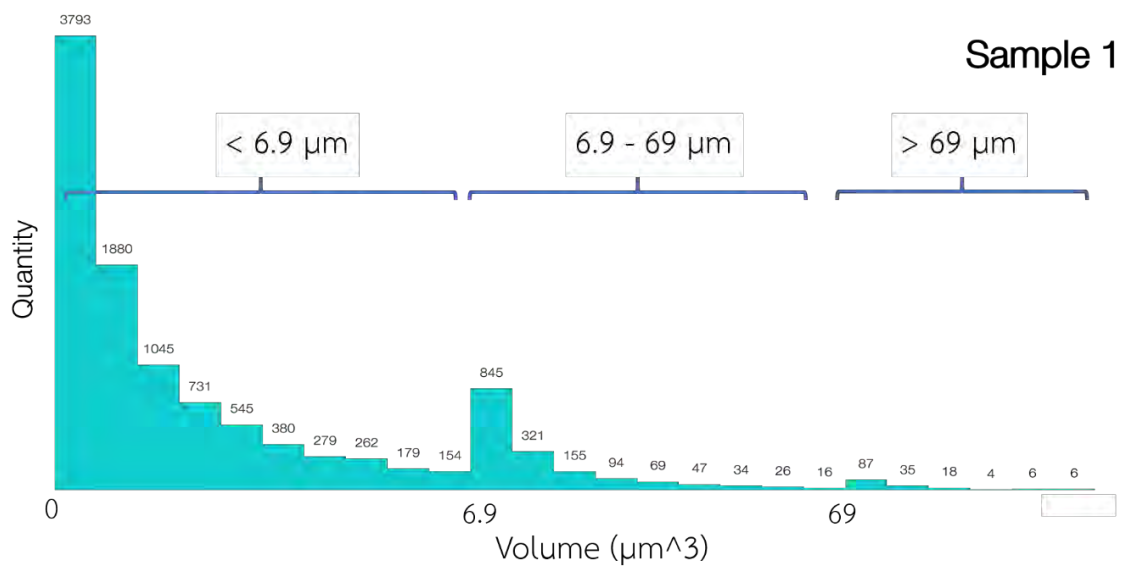
รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของเคโรเจน (สีเขียว) กับรูพรุน (สีฟ้า) โดยเคโรเจนสะสมตัวอยู่ในรูพรุน เนื่องจากเคโรเจนเกิดจากการแปรสภาพของสารอินทรีย์ภายหลังจากการกลายเป็นหิน เคโรเจนจึงมาสะสมบริเวณที่ว่างภายในหินซึ่งก็คือรูพรุน



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวและรูปร่างของแรซีไดอไรต์ (สีส้ม) ในตัวอย่างหมายเลข 1

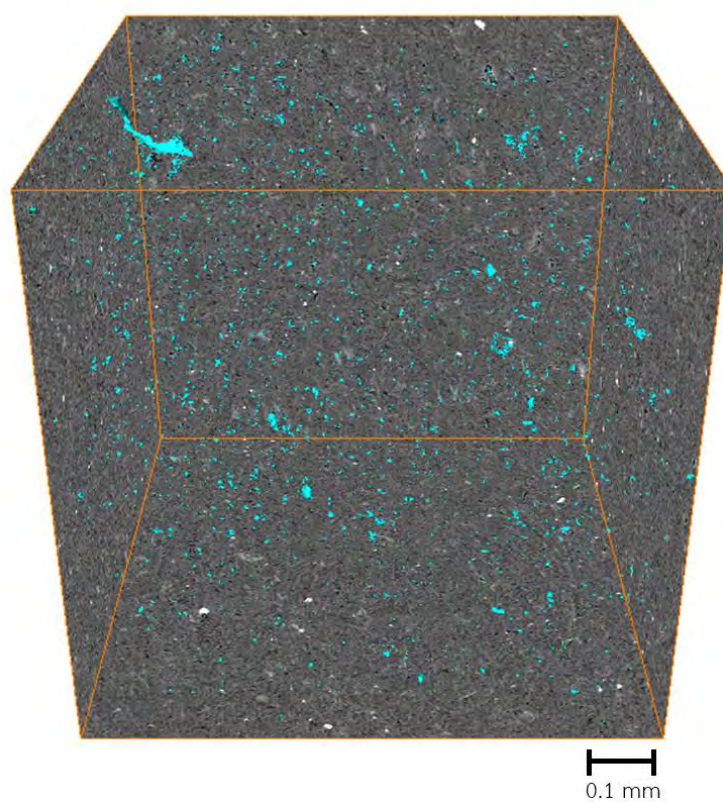


รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของแร่ไพไรต์ (สีเหลือง) ที่เกิดเป็นแบบแฟรมบอยดอล (Framboidal pyrite) ในตัวอย่างหมายเลข 1

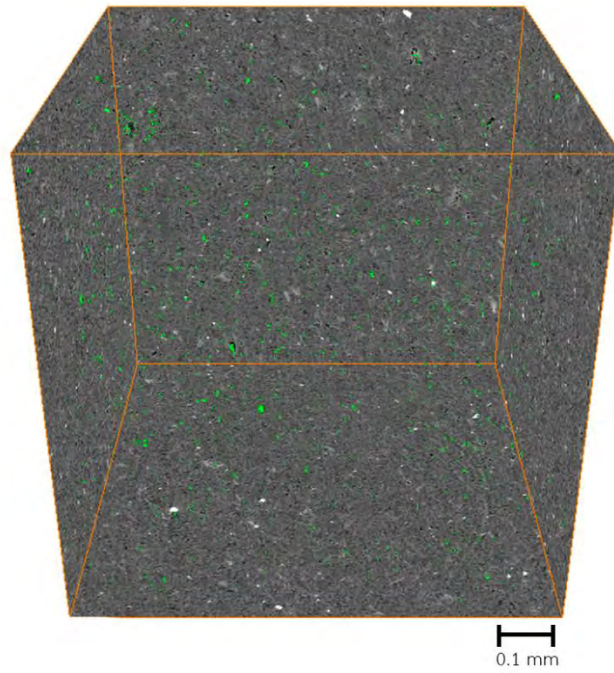


รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 1 จะสังเกตเห็นว่าประกอบตัวรูพรุนขนาดเล็ก (<6.9 ไมโครเมตร) เป็นจำนวนมาก และมีรูพรุนขนาดใหญ่ (>69 ไมโครเมตร) จำนวนน้อย

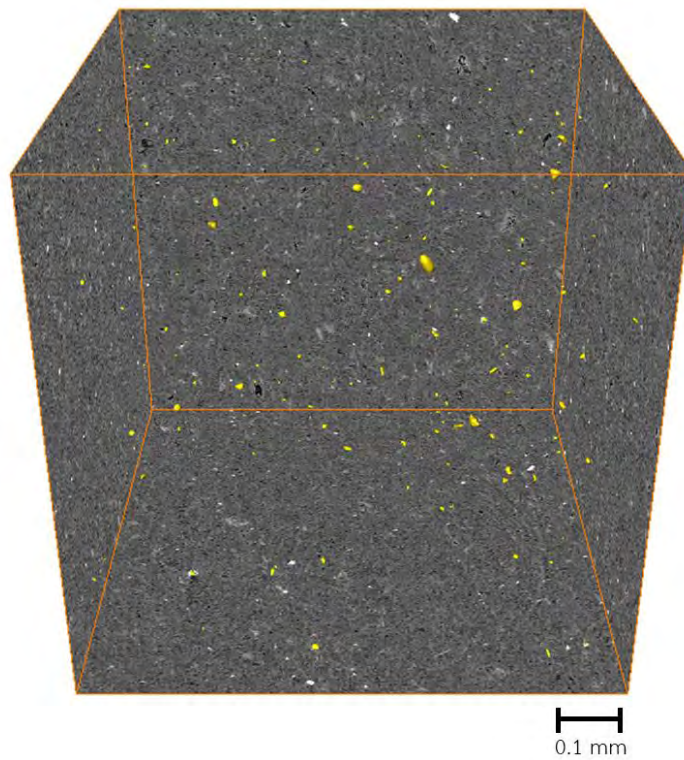
ตัวอย่างที่ 2 มีปริมาณรูพรุน 0.51 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.14) เคอร์โรเจน 1.44 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.15) และแร่ไพไรต์ 0.01 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.16) ในตัวอย่างที่ 2 นี้ มีลักษณะใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ 1 คือประกอบไปด้วยรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelet) จำนวนมาก และพบเคอร์โรเจนแทรกอยู่ตามรูพรุน แต่ในตัวอย่างนี้ไม่พบแร่ซิงเคอไรต์ ส่วนแร่ไพไรต์ในตัวอย่างนี้ไม่ได้เกิดเป็นลักษณะแบบแฟรมบอยดอล (framboidal pyrite) เพราะว่ามีปริมาณน้อยมาก จึงทำให้ไม่พบรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแร่ไพไรต์แบบแฟรมบอยดอล (Intercrystalline pore within pyrite framboids) สำหรับการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างนี้นั้นจะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าตัวอย่างที่ 1 (รูปที่ 4.17)



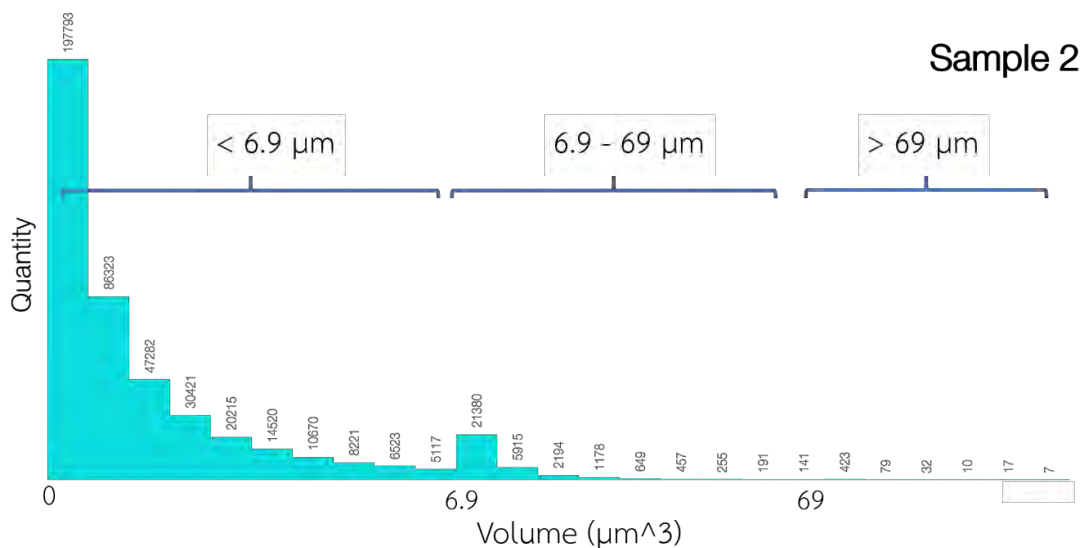
รูปที่ 4.14 รูพรุน (สีฟ้า) ในตัวอย่างที่ 2 จะสังเกตเห็นว่าประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 4.15 เคอโรเจน (สีเขียว) ในตัวอย่างที่ 2 โดยที่เคอโรเจนจะแทรกตัวอยู่ตามรูพรุน

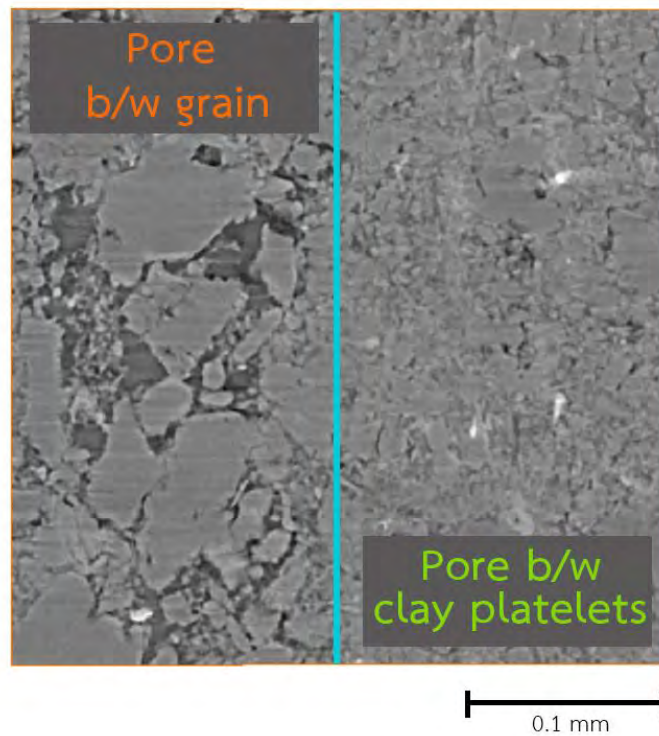


รูปที่ 4.16 แร่ไพไรต์ (สีเหลือง) ในตัวอย่างที่ 2 ซึ่งจะแตกต่างจากตัวอย่างที่ 1 ซึ่งสะสมตัวแบบแพรมบอยดอล (framboidal pyrite) แต่ในตัวอย่างนี้จะเป็นแบบทรงกลมแทน

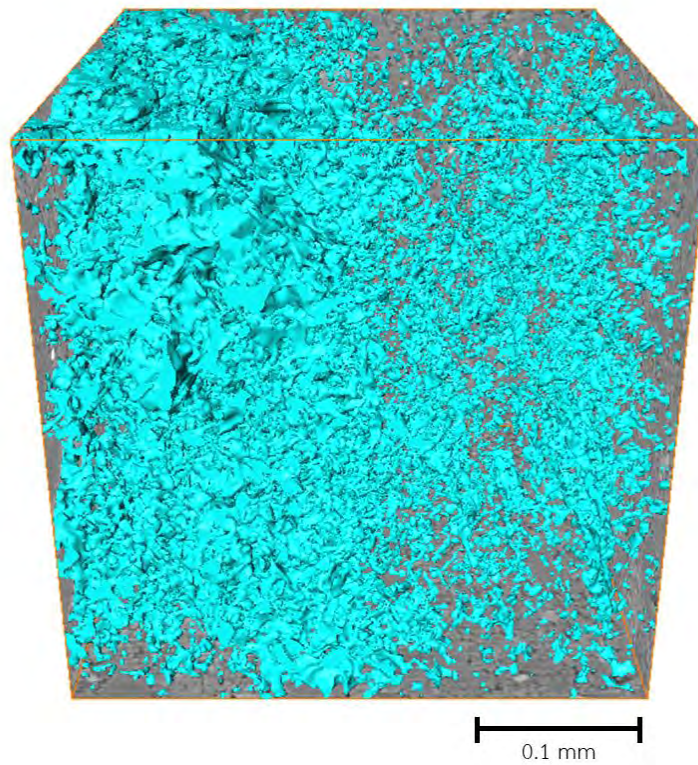


รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของตัวอย่างที่ 2 จะเห็นว่าประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (<6.9 ไมโครเมตร) จำนวนมาก และมีรูพรุนขนาดใหญ่ (>69 ไมโครเมตร) จำนวนน้อย จึงทำให้ในตัวอย่างนี้มีค่าความพรุนต่ำ

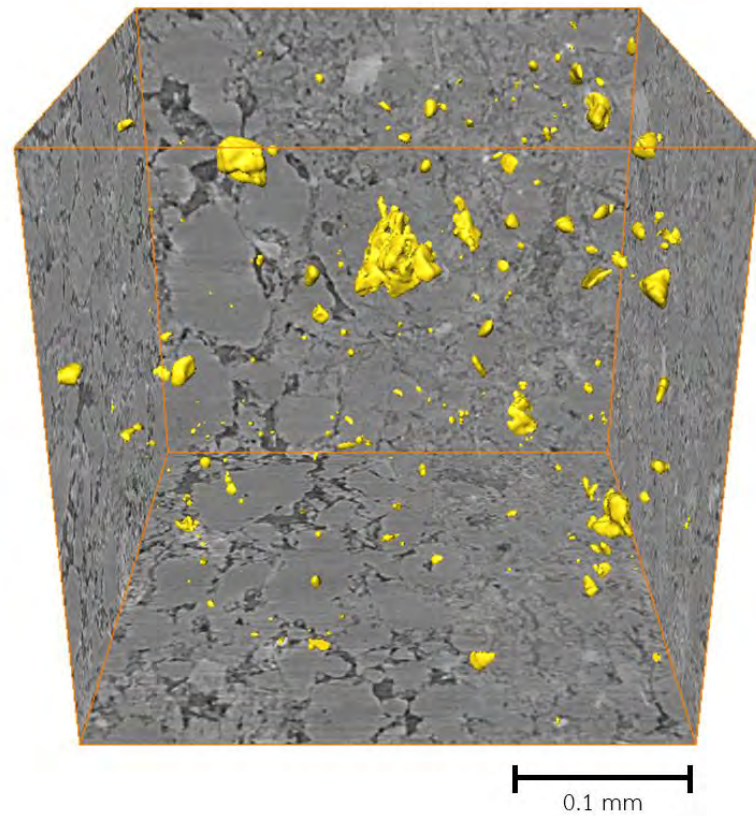
ตัวอย่างที่ 3 ประกอบไปด้วยรูพรุน 17.02 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.19) และแร่ไพไรต์ 0.03 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.20) ในตัวอย่างนี้ประกอบไปด้วยรูพรุน 2 ชนิดเป็นหลักคือรูพรุนระหว่างอนุภาค (Interparticle pore) ที่เป็นชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelet) และชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) ดังรูปที่ 4.18 แม้ว่าจะมีรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelet) ที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากก็ตาม แต่ก็มีรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) ซึ่งมีขนาดใหญ่มากตามไปด้วยดังการกระจายตัวของรูพรุนในรูปที่ 4.21 จึงทำให้ในตัวอย่างนี้มีค่าความพรุนสูงที่สุดจากทั้ง 5 ตัวอย่าง ในตัวอย่างนี้ไม่พบเคอโรเจนเป็นเพราะมีขนาดเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ (ขนาดทรายถึงทรายแป้ง) กว่า 2 ตัวอย่างที่ผ่านมาซึ่งแสดงถึงพลังงานตอนสะสมตัวมีพลังงานสูงจึงทำให้อินทรีย์สารตอนสะสมมีปริมาณน้อย



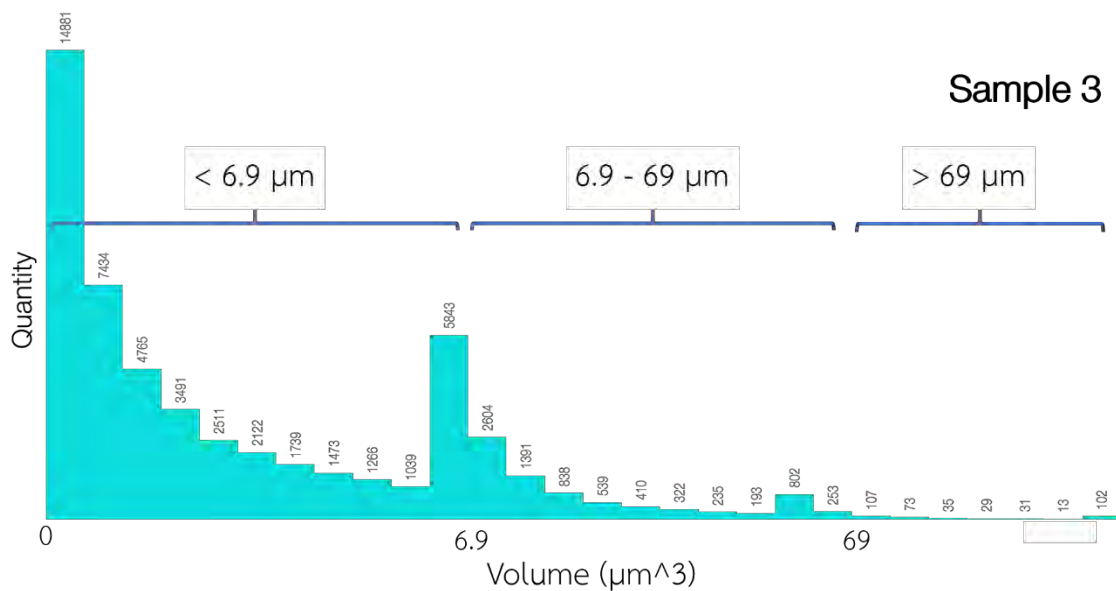
รูปที่ 4.18 ภาพตัดขวางของตัวอย่างที่ 3 ประกอบไปด้วยรูพรุน 2 ชนิด คือชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelet) และชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) ติดกันแบบแบ่งครึ่งชัดเจน



รูปที่ 4.19 รูพรุนของตัวอย่างที่ 3 จะเห็นได้ว่าประกอบไปด้วยรูพรุน (สีฟ้า) ขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก

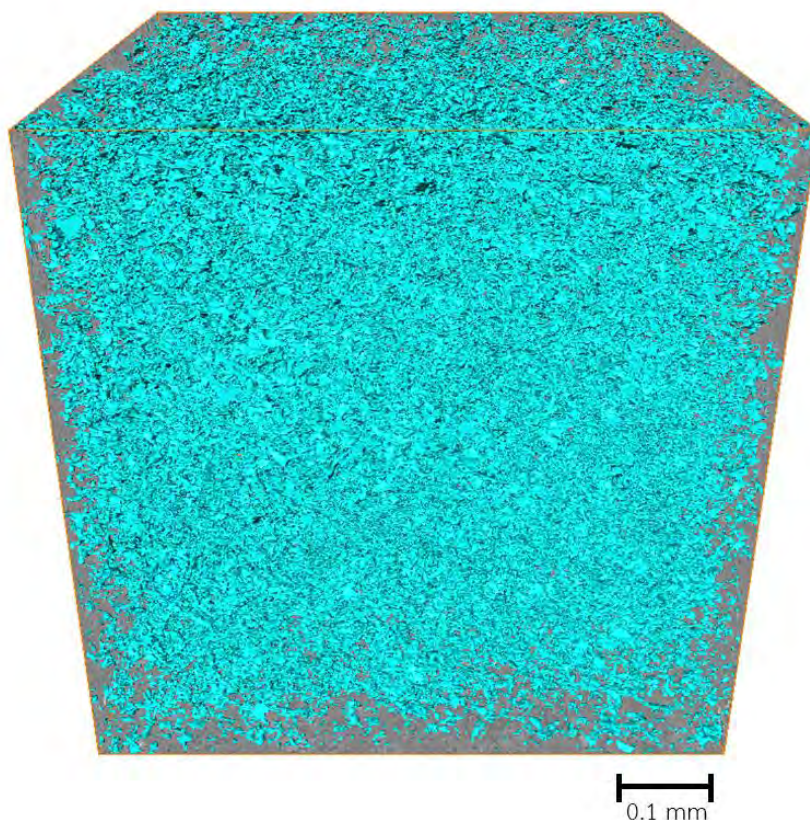


รูปที่ 4.20 ลักษณะของแร่ไฟไรต์ (สีเหลือง) ในตัวอย่างที่ 3 จะเห็นว่าบางส่วนนั้นมีลักษณะคล้ายกับเป็นรูปที่ผลึก



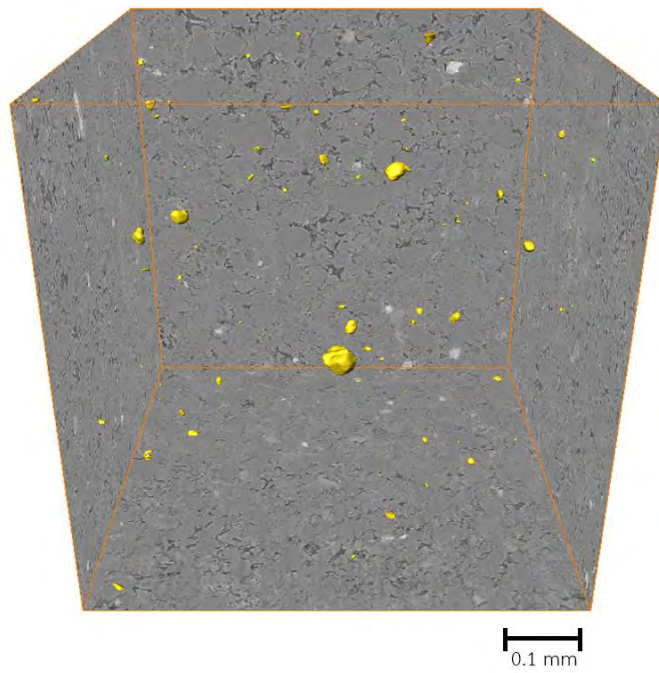
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของรูปพูนในตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีปริมาณรูปพูนขนาดใหญ่ (>69 ไมโครเมตร) มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านมา

ตัวอย่างที่ 4 ประกอบไปด้วยรูพรุน 7.17 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.22) ซึ่งเป็นรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) เป็นหลัก แต่สาเหตุที่มีค่าความพรุนน้อยกว่าตัวอย่างที่ 3 ที่ประกอบด้วยรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ดและรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดินนั้น เป็นเพราะขนาดของรูพรุนระหว่างเม็ดในตัวอย่างที่ 4 มีขนาดเล็กกว่าในตัวอย่างที่ 3 จึงส่งผลให้ค่าความพรุนมีค่าน้อยกว่า ส่วนสาเหตุที่ไม่มีเคอโรเจนก็เป็นเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 3 คือประกอบไปด้วยตะกอนขนาดทรายแป้ง ซึ่งแสดงถึงพลังงานตอนสะสมตัวมีพลังงานสูงจึงทำให้อินทรีย์สารสะสมตัวในปริมาณที่น้อย ในตัวอย่างนี้มีแร่ไพไรต์ 0.02 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.23) นอกจากนั้นยังพบแร่ดินในตัวอย่างนี้อีกด้วย มีปริมาณ 0.33 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.24) ส่วนการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างนี้จะพบรูพรุนขนาดเล็ก (<6.9 ไมโครเมตร) เป็นจำนวนมาก แต่ก็พบรูพรุนขนาดกลาง (6.9 – 69 ไมโครเมตร) และขนาดใหญ่ (>69 ไมโครเมตร) จำนวนมากเช่นกันดังรูปที่ 4.25

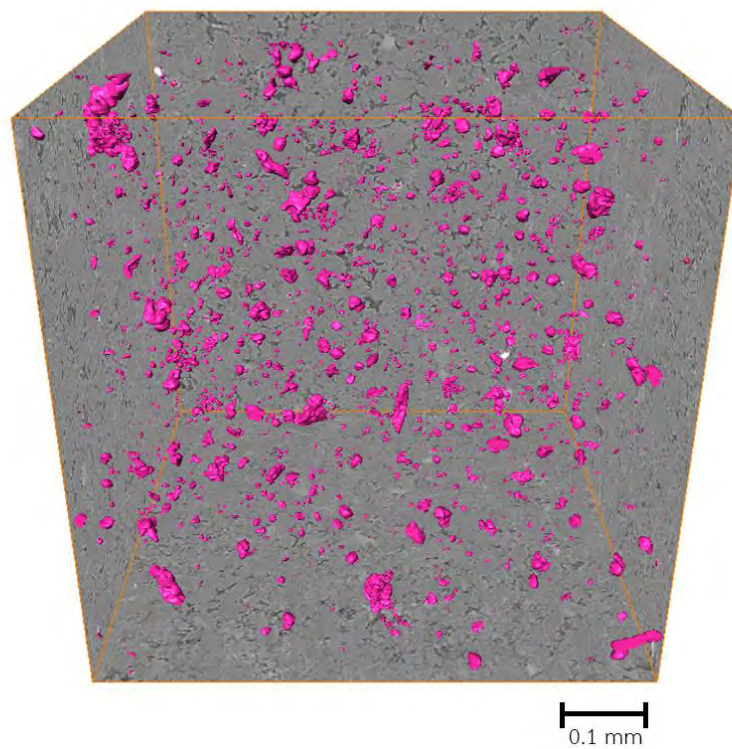


รูปที่ 4.22 รูพรุน (สีฟ้า) ในตัวอย่างที่ 4 ซึ่งเป็นชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) แต่ขนาดของรูพรุนจะเล็กกว่าในตัวอย่างที่ 3 จึงทำให้มีค่าความพรุนน้อยกว่า (7.17 เปอร์เซ็นต์)

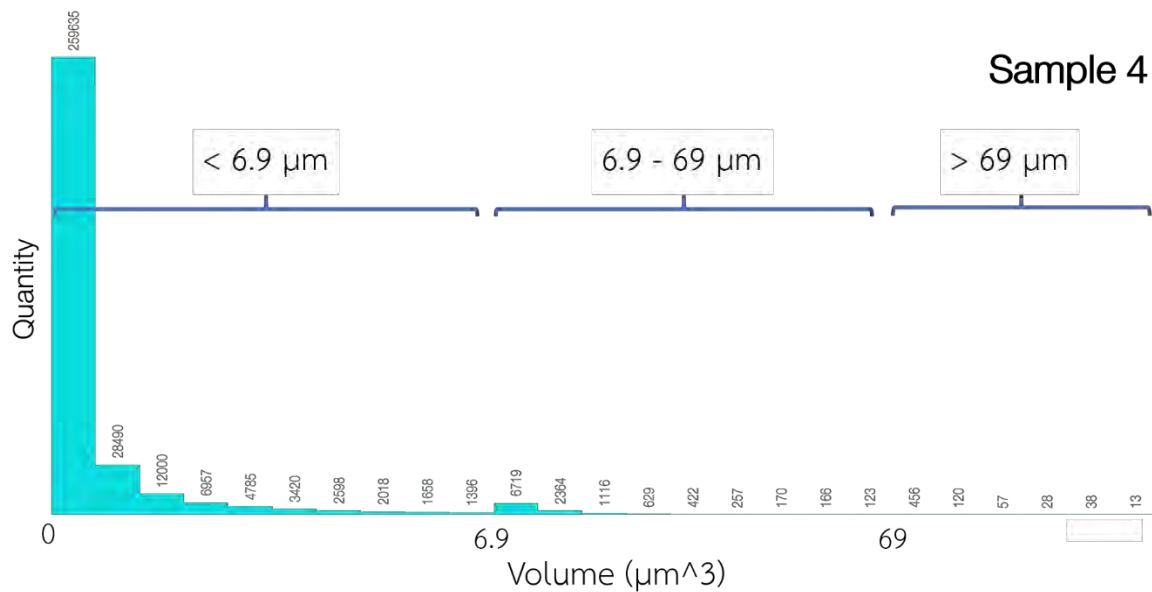




รูปที่ 4.23 รูปร่างของแร่ไฟไรต์ (สีเหลือง) ในตัวอย่างที่ 4 จะเห็นว่ามีรูปที่ร่างแบบทรงกลม

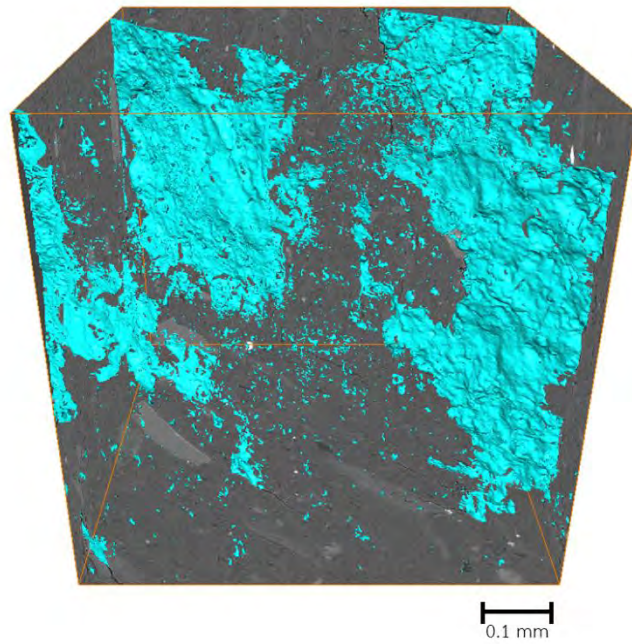


รูปที่ 4.24 แร่ดิน (สีชมพู) ในตัวอย่างที่ 4 มีปริมาณ 0.33 เปอร์เซ็นต์

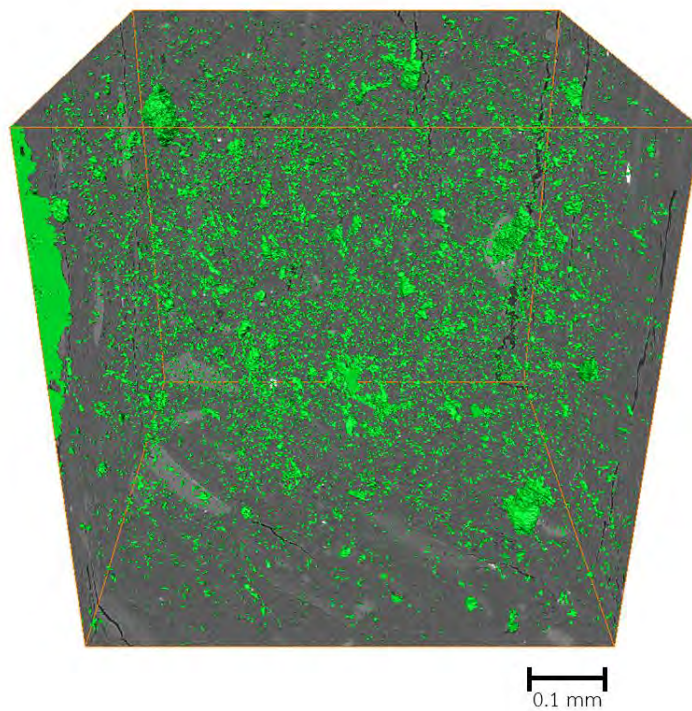


รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 4 แม้ว่าประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (<6.9 ไมโครเมตร) จำนวนมากเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 และ 2 แต่ก็ประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดกลาง (6.9 – 69 ไมโครเมตร) และรูพรุนขนาดใหญ่ (>69 ไมโครเมตร) เป็นจำนวนมากจึงทำให้มีค่าความพรุนสูงกว่าตัวอย่างที่ 1 และ 2

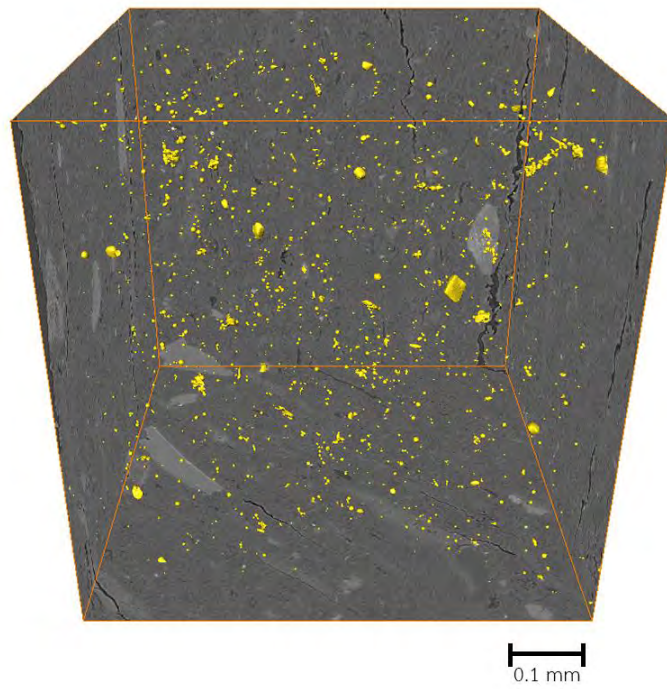
ตัวอย่างที่ 5 มีค่าความพรุน 1.75 เปอร์เซ็นต์ เคอโรเจน 1.76 เปอร์เซ็นต์ และแรไฟไรต์ 0.07 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ในตัวอย่างนี้จะประกอบไปด้วยรูพรุนชนิดรอยแตก (Fracture pore) และรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelets) เป็นหลัก (รูปที่ 4.26) เนื่องจากรูพรุนชนิดรอยแตกจะมีลักษณะเป็นแนวยาวดังนั้นจึงทำให้มีค่าความพรุนสูงกว่าตัวอย่างที่ 1 และ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดินเพียงอย่างเดียว ส่วนเคอโรเจนก็แทรกอยู่ตามรูพรุนเช่นเดียวกับตัวอย่างอื่น (รูปที่ 4.27) ส่วนแรไฟไรต์ในตัวอย่างนี้มีลักษณะเป็นทรงกลมตามรูปที่ 4.28 นอกจากนั้นการกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างนี้มีความหลากหลาย แต่มีรูพรุนชนิดรอยแตกเป็นหลัก (รูปที่ 4.29)



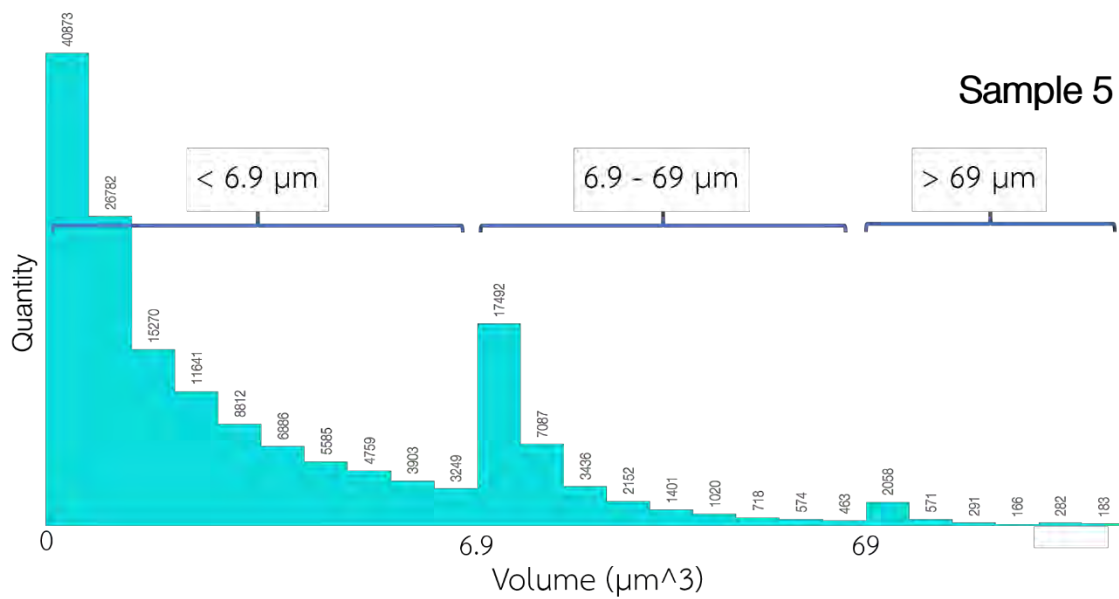
รูปที่ 4.26 รูพรุน (สีฟ้า) ในตัวอย่างที่ 5 จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะต่อกันเป็นแนวยาวคล้ายรอยแตก (Fracture) จึงเรียกรูพรุนชนิดนี้ว่ารูพรุนชนิดรอยแตก นอกจากรูพรุนชนิดรอยแตกแล้วในตัวอย่างนี้ก็ประกอบด้วยรูพรุนชนิดอื่นอีกด้วย



รูปที่ 4.27 เคอโรเจน (สีเขียว) ในตัวอย่างที่ 5 ซึ่งแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของหิน



รูปที่ 4.28 แร่ไพไรต์ (สีเหลือง) ในตัวอย่างที่ 5 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 2 ถึง 4



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของรูพรุนในตัวอย่างที่ 5 จะเห็นว่าในตัวอย่างนี้ประกอบไปด้วยรูพรุนหลากหลายขนาด แต่มีรูพรุนชนิดรอยแตกเป็นหลัก

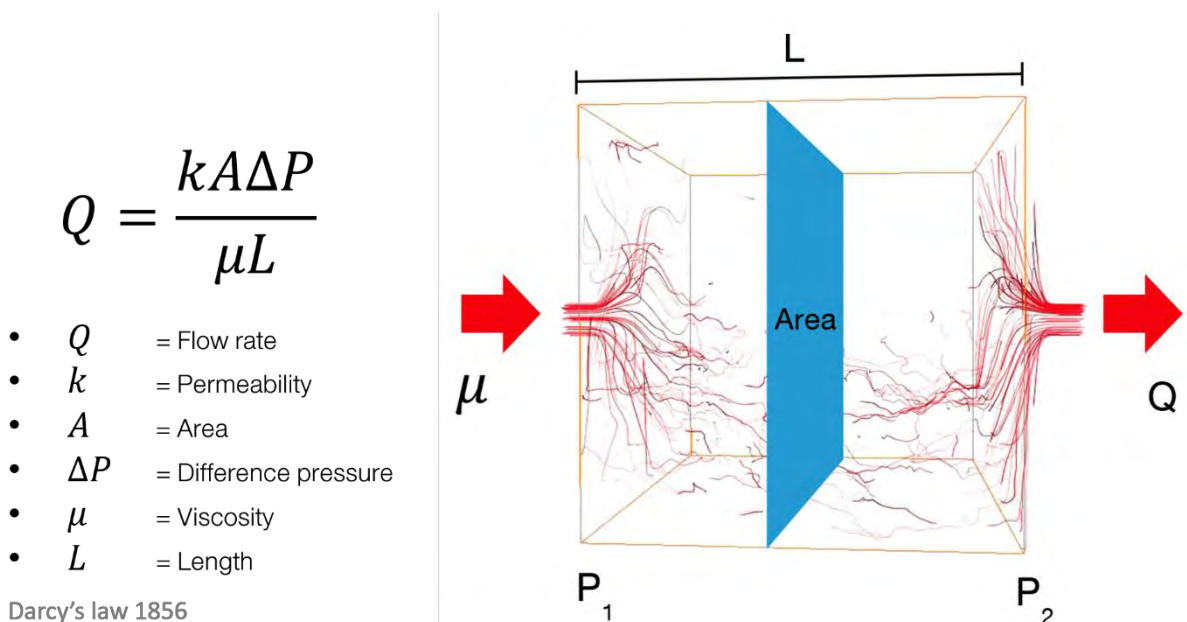
## 4.2 ค่าความซึมผ่านได้ (Permeability)

ภายหลังจากการศึกษารูพรุนด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ซึ่งทำให้ได้ค่าความพรุนออกมาแล้ว ยังได้รูปที่ร่างของรูพรุนออกมาอีกด้วย โดยสามารถนำพื้นที่ของรูพรุนที่ได้จากการศึกษามาทำการคำนวณหาค่าความซึมผ่านของหินดินดานจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการของดาร์ซีที่มีการปรับค่าตัวแปรบางชนิด เช่น ค่าความหนืดของของไหลเป็นค่าความหนืดของน้ำมัน และพื้นที่การไหลเป็นพื้นที่ของรูพรุน จากบจำลองนอกจากค่าความซึมผ่านได้แล้วยังสามารถดูได้อีกว่าบริเวณใดของตัวอย่างที่ของไหลสามารถไหลผ่านได้ดี และจากการคำนวณทำให้ได้ค่าความซึมผ่านได้ตามตารางที่ 4.2

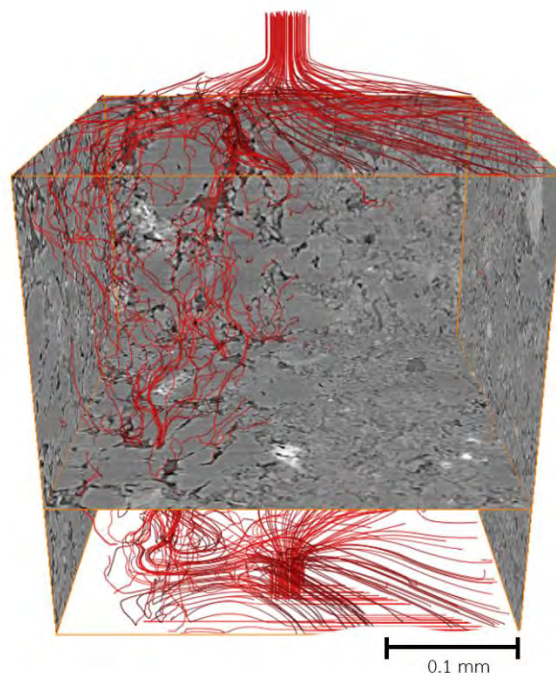
ตัวอย่าง	ค่าความพรุน (%*)	ค่าความซึมผ่าน (มิลลิดาซี)
1	0.31	0
2	0.52	0
3	17.02	25.9
4	7.17	10.5
5	1.75	27.5

\*เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Volum %)

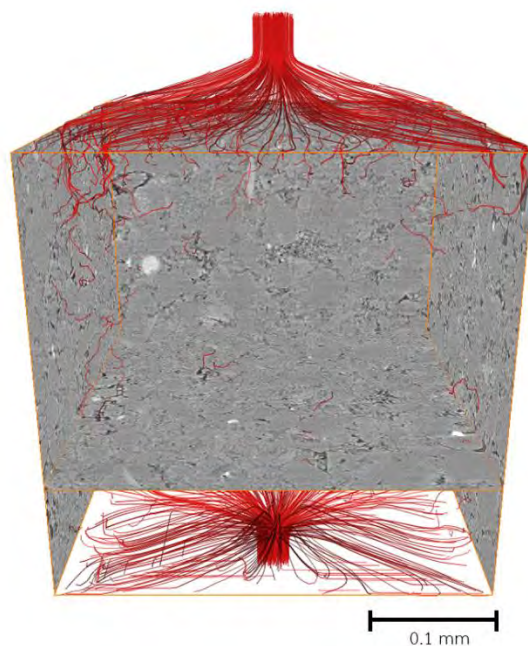
ตารางที่ 4.2 ค่าความพรุนและค่าความซึมผ่านของทั้ง 5 ตัวอย่าง



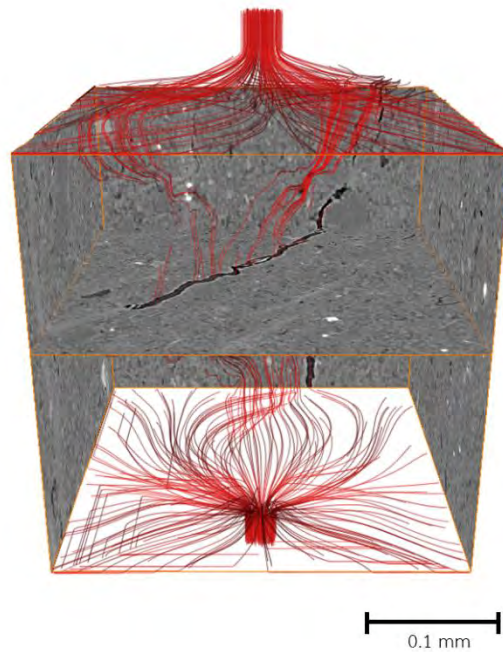
รูปที่ 4.30 สมการของดาร์ซีและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการ (Darcy, 1856)



รูปที่ 4.31 แบบจำลองการไหลของของไหล (เส้นสีแดง) ผ่านตัวอย่างที่ 3 จะเห็นว่าของไหลจะไหลแค่บางเส้นทางเท่านั้น ซึ่งเป็นเพราะว่าเส้นทางนี้เป็นรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ดที่มีการเชื่อมต่อกันสูง ซึ่งแตกต่างจากอีกเส้นทางที่เป็นชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแรดดินที่มีการเชื่อมต่อกันต่ำ

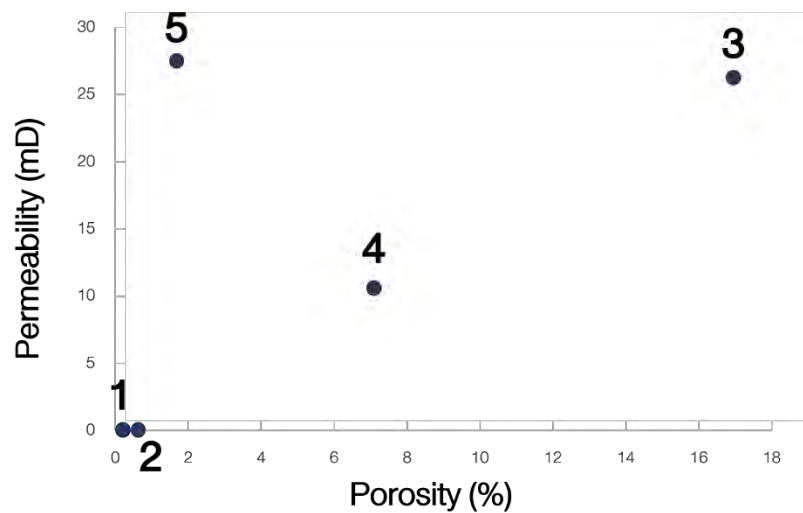


รูปที่ 4.32 แบบจำลองการไหลของของไหล (เส้นสีแดง) ผ่านตัวอย่างที่ 4 ถึงแม้ว่าตัวอย่างนี้จะประกอบด้วยรูพรุนแบบรูพรุนระหว่างเม็ดที่มีการเชื่อมต่อกันสูงเป็นหลัก แต่เนื่องจากขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กจึงทำให้ของไหลไหลผ่านได้ลำบาก จึงมีค่าความซึมผ่านได้ไม่สูงมาก



รูปที่ 4.33 แบบจำลองการไหลของของไหล (เส้นสีแดง) ผ่านตัวอย่างที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วยรูพรุนชนิดรอยแตกและชนิดอื่น ๆ แต่จะเห็นได้ว่าของไหลจะไหลเฉพาะในรอยแตกเท่านั้น เพราะว่าบริเวณรอยแตกจะมีการเชื่อมต่อกันสูง

นอกจากนั้นแล้วเมื่อทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนกับค่าความซึมผ่านจะพบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่ เมื่อมีค่าความพรุนสูงก็จะมีค่าความซึมผ่านสูงตามไปด้วย แต่ในตัวอย่างที่ 5 จะพบว่าถึงแม้จะมีค่าความพรุนต่ำก็ตามแต่กลับมีค่าความซึมผ่านสูงที่สุด



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนและค่าความซึมผ่าน

### 4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction)

จากการใช้สมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Diffraction) ทำให้ได้ปริมาณแร่และการเรียงตัวของแร่ดังนี้

ชนิดแร่	ตัวอย่างที่ 1 (%*)	ตัวอย่างที่ 2 (%*)	ตัวอย่างที่ 3 (%*)	ตัวอย่างที่ 4 (%*)	ตัวอย่างที่ 5 (%*)
แร่ควอตซ์	37.09	45.42	47.22	56.72	26.10
แร่อิลไรต์ - ไมก้า	30.58	21.77	22.87	17.55	24.36
แร่อิลไรต์ - สเมกไทต์	-	11.47	7.23	11.92	18.31
แร่เคโอลิไนต์	15.01	17.38	13.57	11.35	24.15
แร่คลอไรต์	10.44	3.92	4.42	2.43	3.34
แร่มอนต์โมริลโลไนต์	3.26	-	-	-	3.53
แร่ไฟไรต์	0.62	-	-	-	-
แร่ยิปซั่ม	-	-	-	-	0.17
แร่ซีเดอไรต์	2.96	-	-	-	-

\*เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

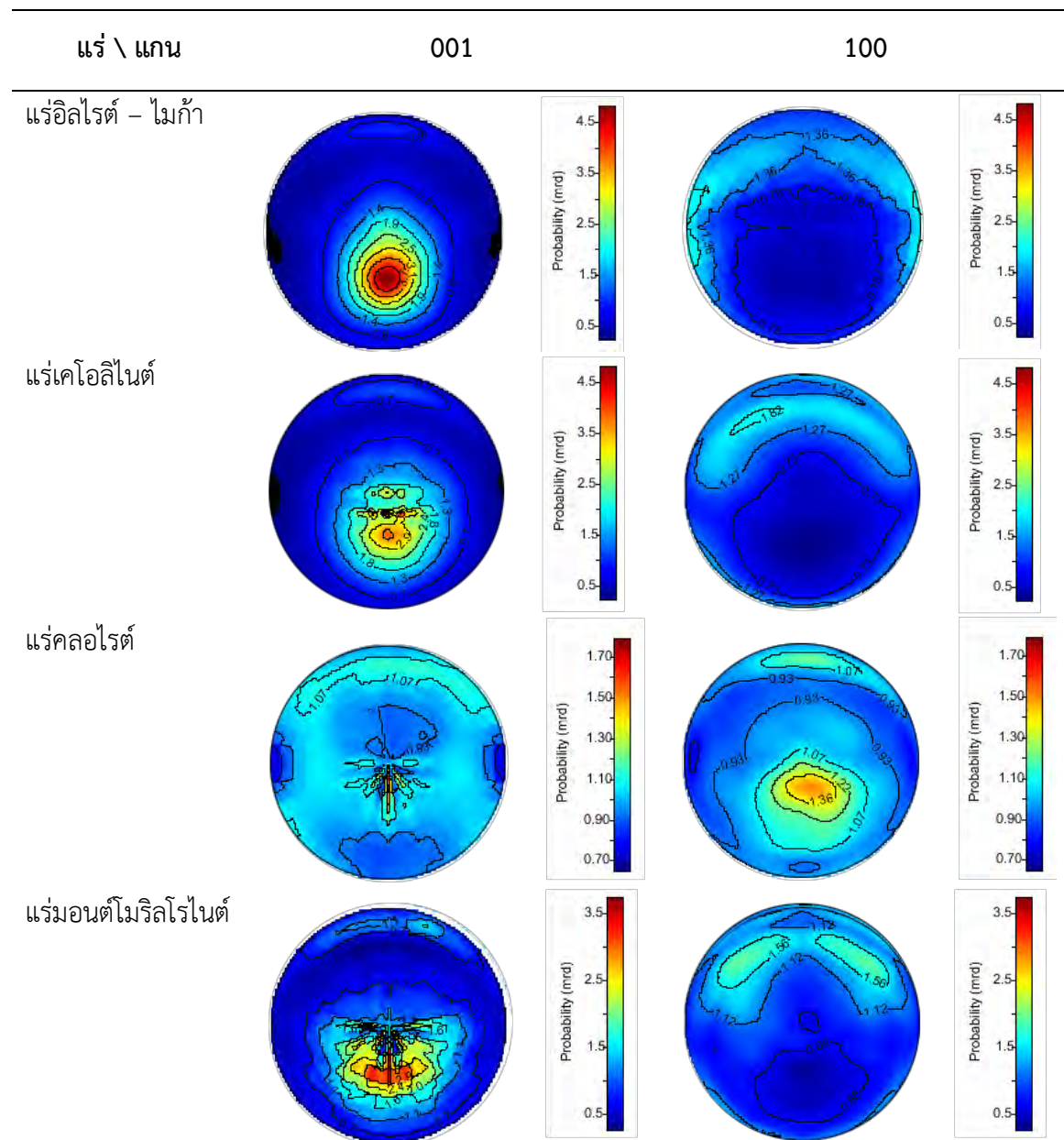
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณแร่องค์ประกอบของทั้ง 5 ตัวอย่าง

### 4.4 การจัดเรียงตัวของแร่ (Preferred - orientation)

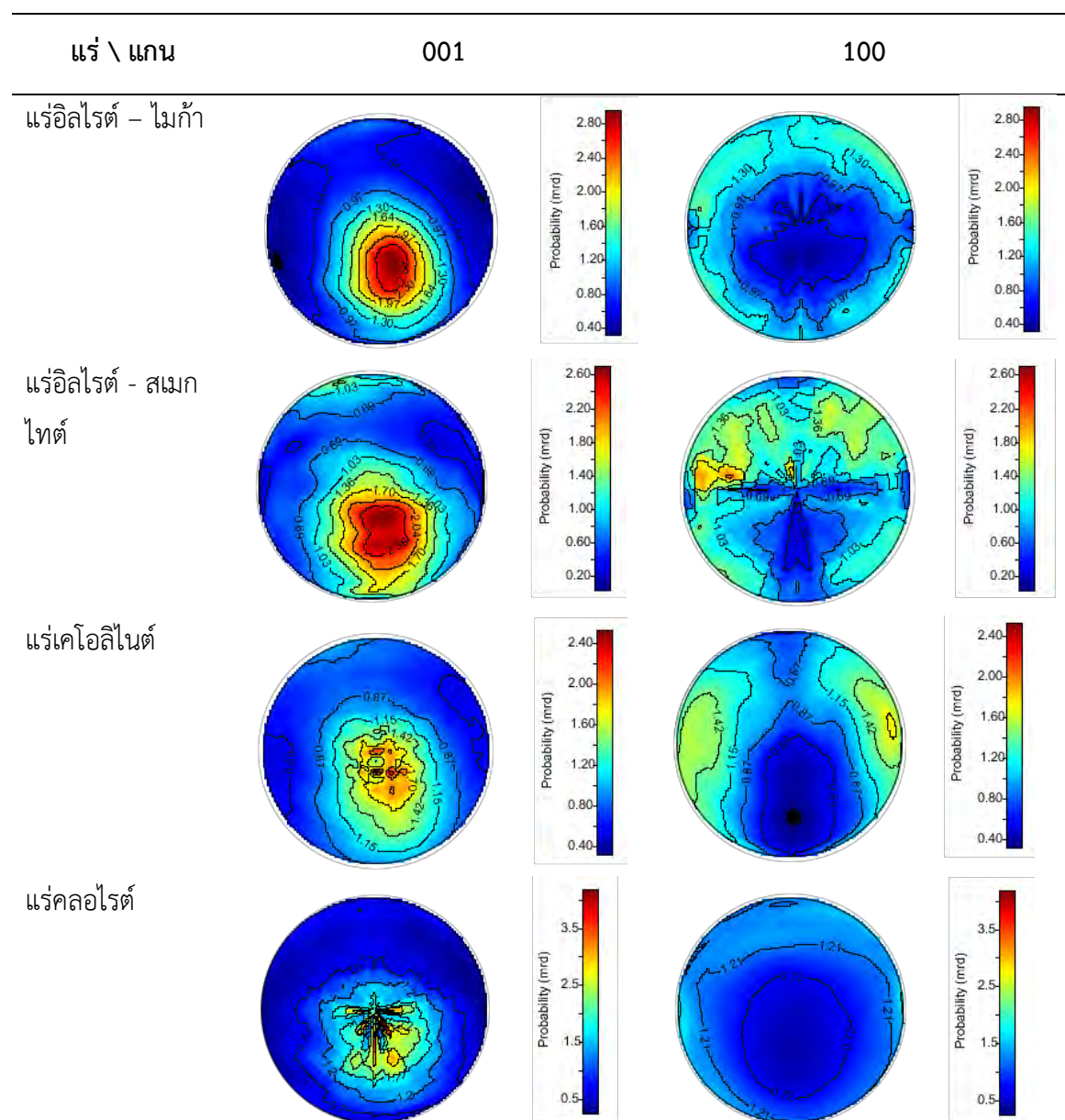
สำหรับการจัดเรียงตัวของแร่นั้นจะแสดงผลในรูปที่ของโพลีเกอร์ (Pole figure) มีหน่วยวัดการเรียงตัวของแร่เป็นหน่วยความหลากหลายของการเรียงตัว (Multiple-of a random distribution) โดยแสดงความหลากหลายของการเรียงตัวด้วยความเข้มสี ถ้าสีแดงแสดงถึงมีค่าความหลากหลายของการเรียงตัวมาก นั่นคือแร่มีการเรียงตัวสูงในบริเวณนั้น ส่วนสีฟ้าแสดงถึงมีค่าความหลากหลายของการเรียงตัวน้อย ซึ่งแสดงว่าข้อแร่มีการเรียงตัวน้อยในบริเวณนั้น ดังที่จะเห็นในตารางที่ต่อไป นี้ ซึ่งเป็นการแสดงการเรียงตัวของแร่แต่ละชนิดในตัวอย่างแต่ละหมายเลข (Kanitpanyacharoen *et al.*, 2013)



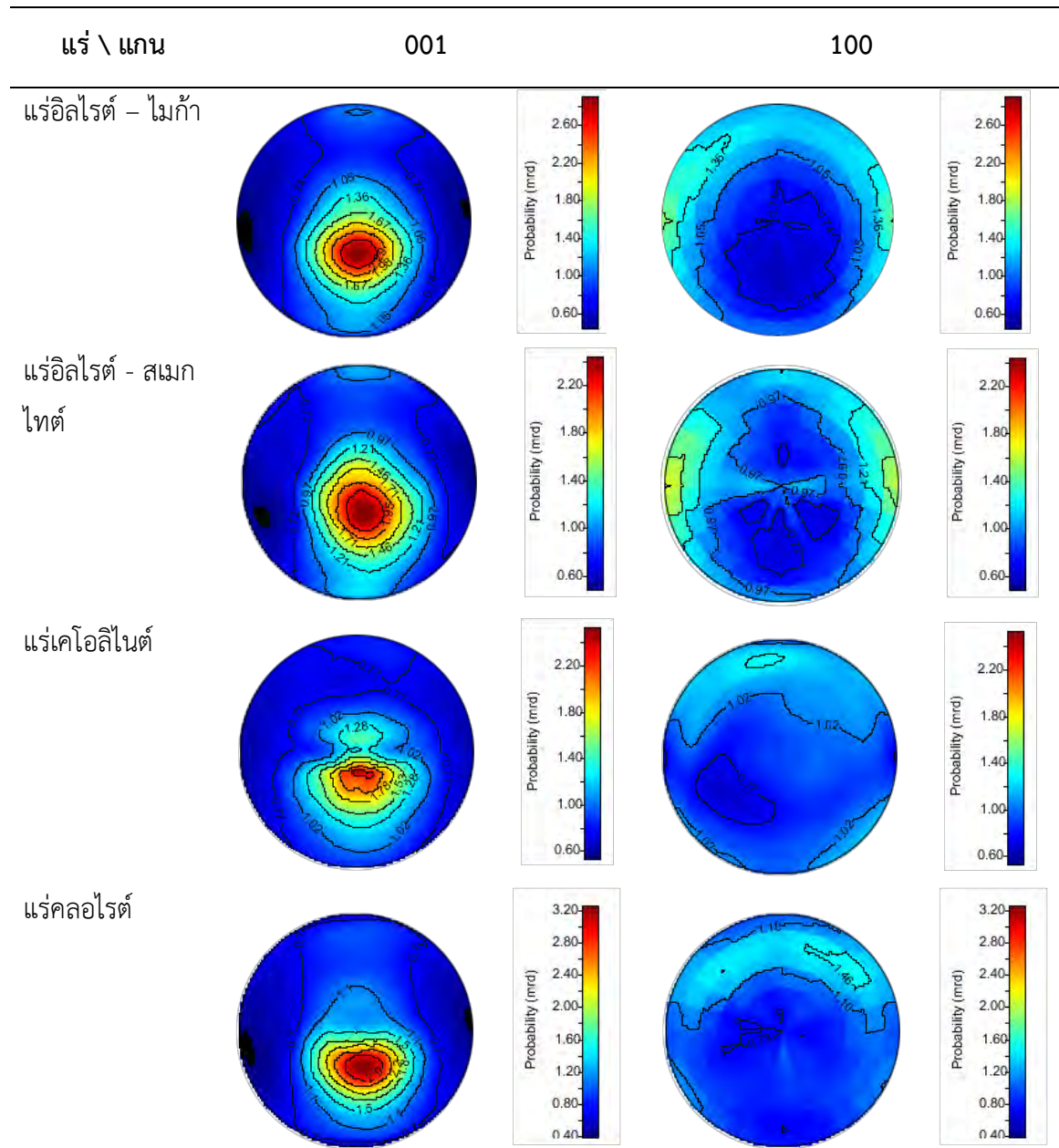
การจัดเรียงตัวของแร่ในตัวอย่างที่ 1



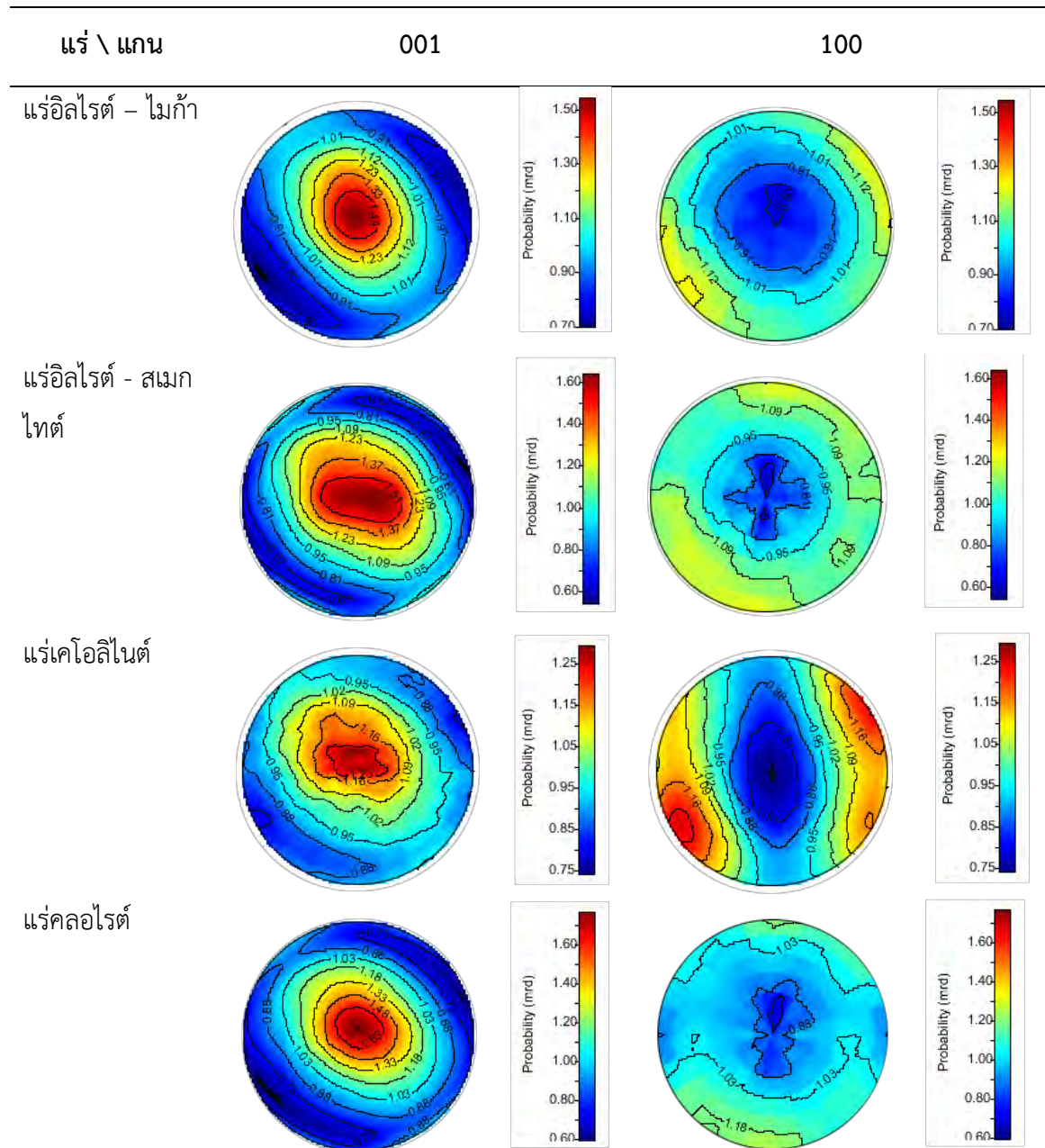
## การจัดเรียงตัวของแร่ในตัวอย่างที่ 2



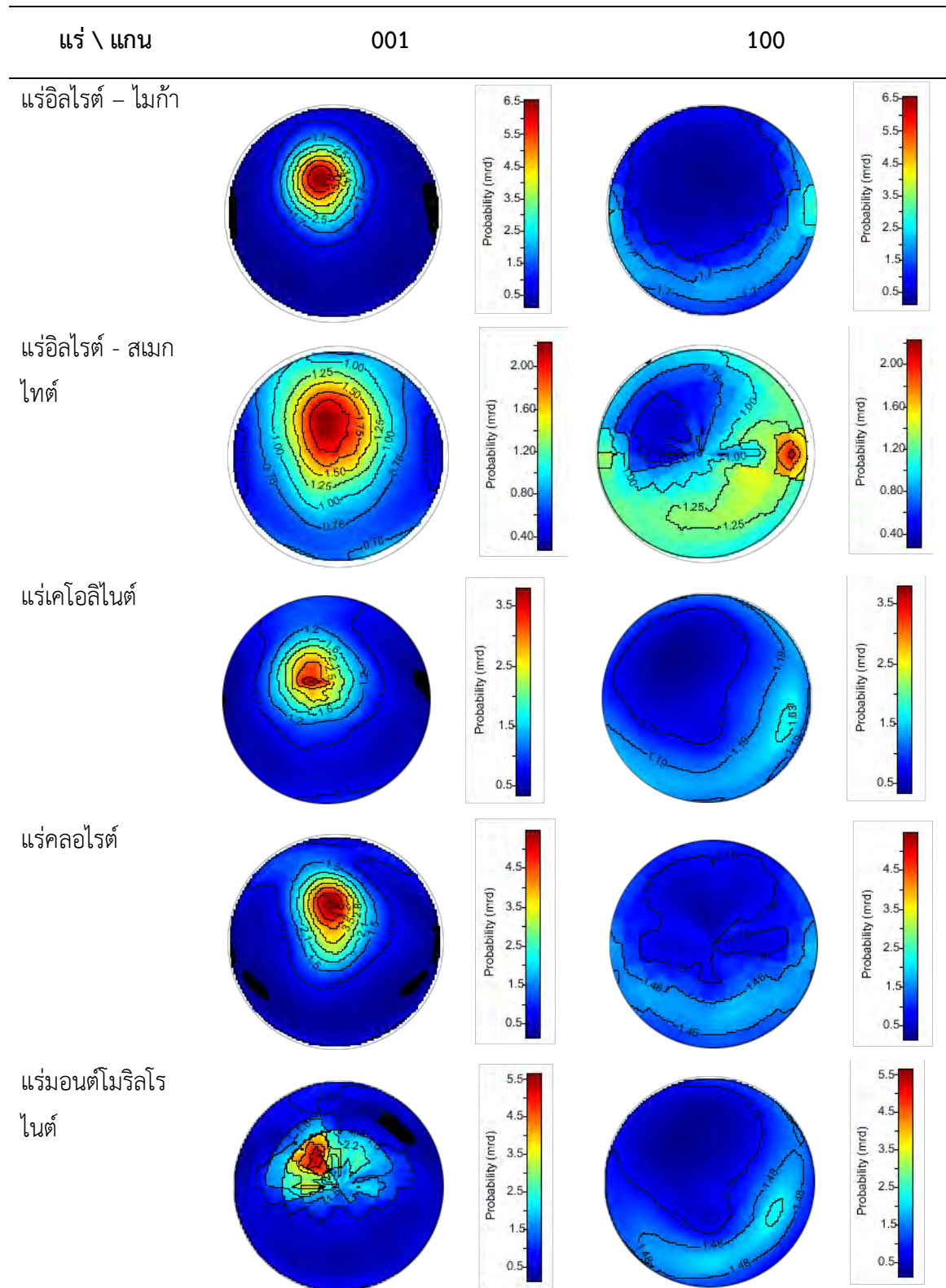
การจัดเรียงตัวของแร่ในตัวอย่างที่ 3



การจัดเรียงตัวของแร่ในตัวอย่างที่ 4



การจัดเรียงตัวของแร่ในตัวอย่างที่ 5



## บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล

### 5.1 อภิปรายผล

จากการศึกษารูพรุนของหินดินดานด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ซึ่งเป็นการใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงฉายผ่านตัวอย่างรอบด้าน จึงทำให้ได้ภาพโครงสร้างภายในตัวอย่างในแบบ 3 มิติ และวิธีการนี้ยังไม่ทำลายตัวอย่างอีกด้วย จากการศึกษาพบว่าทั้ง 5 ตัวอย่างนั้นมีค่าความพรุน รูปร่างของรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้ง 5 ตัวอย่าง แม้ว่าทั้ง 5 ตัวอย่างนี้จะถูกเก็บขึ้นมาจากหมวดหินเดียวกันจากหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียงกันก็ตาม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าหินดินดานเป็นหินที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ต่ำมาก ทำให้หินมีความแตกต่างกันในระดับไมโครเมตร ดังจะเห็นได้ในตัวอย่างที่ 3 ที่หินประกอบไปด้วยตะกอน 2 ขนาดแบบติดกันชัดเจน (Sharp contact) ระหว่างตะกอนขนาดทรายและทรายแป้ง

การกระจายตัวของรูพรุนในหินดินดานจะพบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากแล้วค่อย ๆ ลดหลั่นลงมาเมื่อมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในช่วงรูพรุนขนาดกลางก็จะมีรูพรุนบางขนาดที่มีปริมาณสูงผิดปกติขึ้นมาแล้วจึงค่อย ๆ ลดหลั่นลงไปอีก จนถึงรูพรุนขนาดใหญ่ก็จะมีบางขนาดที่มีจำนวนมากผิดปกติแล้วค่อย ๆ ลดจำนวนลงเช่นเดียวกัน ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้ว่ารูพรุนในหินดินดานนั้นอาจจะมียุทธศาสตร์ของรูพรุนที่เหมาะสมที่จะอยู่ในหินดินดานได้ โดยที่รูพรุนขนาดเล็กที่สุดของแต่ละกลุ่มจะมีจำนวนมากที่สุดก็เป็นได้

จากการศึกษาพบว่าปริมาณและชนิดของแร่องค์ประกอบไม่ได้เป็นตัวกำหนดค่าความพรุน จะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ 2 และ 3 ในตัวอย่างที่ 2 ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ 45.42 เปอร์เซ็นต์และแร่ดิน 54.54 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความพรุน 0.52 เปอร์เซ็นต์และรูพรุนเป็นชนิดรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน ส่วนตัวอย่างที่ 3 ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ 47.88 เปอร์เซ็นต์และแร่ดิน 52.09 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความพรุน 17.02 เปอร์เซ็นต์และรูพรุนเป็นชนิดรูพรุนระหว่างเม็ดกับรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดินแบ่งครึ่งกัน จะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าแร่องค์ประกอบจะใกล้เคียงกัน แต่ค่าความพรุนและชนิดของรูพรุนกับแตกต่างกันมาก ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อรูพรุนนั้นคือการคัดขนาดและรูปร่างของตะกอนเวลาสะสมตัว แต่อย่างไรก็ตามชนิดของแร่เองก็เป็นตัวควบคุมการคัดขนาดและรูปร่างของเม็ดเช่นกัน

สำหรับปัจจัยหลักที่เป็นตัวควบคุมค่าความซึมผ่านได้นั้นคือรูปร่างของรูพรุนและการเชื่อมต่อกันของรูพรุน ซึ่งรูพรุนแต่ละชนิดก็จะมีรูปร่างและการเชื่อมต่อกันที่ไม่เท่ากัน โดยชนิดที่มีการเชื่อมต่อกันสูงที่สุดคือรูพรุนแบบรอยแตก รองลงมาคือชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด และชนิดอื่น ๆ ที่เหลือจะมีการเชื่อมต่อกันต่ำมาก ดังที่เห็นในตัวอย่างที่ 5 ที่มีรูพรุนชนิดรอยแตกเป็นหลักจึงมีค่าความซึมผ่านได้สูงถึง 27.5 มิลลิดาซี ในตัวอย่างที่ 3 มีค่าความซึมผ่านได้ 25.9 มิลลิดาซี ประกอบด้วยรูพรุน 2 ชนิดและของ

ไหลไหลผ่านรูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ดได้ดีกว่า ดังนั้นการคำนวณค่าความซึมผ่านได้จากค่าความพรุนจึงมีโอกาสดลาดเคลื่อนสูง เนื่องมาจากว่าปัจจัยหลักที่ควบคุมค่าความซึมผ่านได้ไม่ใช่ค่าความพรุน แต่เป็นรูปร่างและการเชื่อมต่อกันของรูพรุน

PTTEP (2009) ได้ทำการศึกษาค่าความพรุนและความซึมผ่านของดินดานจากแอ่งพิชญ์โลกในหมวดหินขุมแสงด้วยวิธีการหยั่งธรณีหลุมเจาะ ได้ค่าความพรุนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์และค่าความซึมผ่านไม่เกิน 0.01 มิลลิดาซี แต่จากการศึกษาใหม่โดยการใช้การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ความละเอียดของข้อมูลมากกว่าและสามารถมองเห็นรูพรุนได้ถึงในระดับไมโครเมตรพบว่ามี 2 ตัวอย่างที่มีค่าความพรุนเกิน 5 เปอร์เซ็นต์คือตัวอย่างที่ 3 และ 4 มีค่าความพรุน 17.02 และ 7.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนค่าความซึมผ่านได้พบว่ามีถึง 3 ตัวอย่างที่มีค่าความพรุนสูงกว่า 0.01 มิลลิดาซี ได้แก่ตัวอย่างที่ 3 4 และ 5 มีค่าความซึมผ่าน 25.9 10.5 และ 27.5 มิลลิดาซีตามลำดับ การศึกษาหินดินดานด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นแม้จะให้ความละเอียดสูง แต่เป็นการศึกษาตัวอย่างในขนาดเล็ก ซึ่งแตกต่างกับการหยั่งธรณีหลุมเจาะที่ศึกษาตัวอย่างในขนาดใหญ่ ดังนั้นในการศึกษาหินที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง (High heterogeneity) จึงควรทำการศึกษาทั้ง 2 วิธีควบคู่กันไป เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

Sun *et al.* (2016) ได้ทำการศึกษาค่าความพรุนของหินดินดานในหมวดหินลองมาซีจากแอ่งเสฉวนบริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศจีน (Longmaxi formation of the Sichuan basin, southwest of China) ที่เป็นหินดินดานให้แก๊ส (Gas shale) โดยวิธีการเก็บตัวอย่างขึ้นมาทำการวิเคราะห์โดยวิธีการอัดแก๊สเข้าไปในตัวอย่าง (Gas Injection Porosimetry, GIP) พบว่าค่าความพรุนที่ได้อยู่ในช่วง 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ โดยการใช้วิธีอัดแก๊สเข้าไปในตัวอย่างนั้นจะคล้ายกับวิธีอัดปรอทเข้าไปในตัวอย่าง แต่จะมีข้อดีคือสามารถหาความสะอาดแล้วนำไปวิเคราะห์อย่างอื่นต่อไปได้ จะเห็นได้ว่าค่าความพรุนของดินดานที่วัดด้วยวิธีนี้มีความใกล้เคียงกับการวัดค่าด้วยการหยั่งธรณีหลุมเจาะ ซึ่งอาจเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ หินดินดานจากแอ่งเสฉวนมีค่าความพรุนใกล้เคียงกับแอ่งพิชญ์โลก กับขีดจำกัดของเครื่องมือมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากแก๊สที่อัดเข้าไปในตัวอย่างนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด 0.26 มิลลิเมตร ดังนั้นรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.26 มิลลิเมตรจะไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการนี้ ซึ่งหากนำตัวอย่างจากแอ่งเสฉวนมาตรวจวัดใหม่ด้วยวิธีการถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอนก็อาจจะได้ค่าความพรุนที่มากขึ้นกว่าเดิมก็เป็นได้ เหมือนกับกรณีของแอ่งพิชญ์โลก

Abouelresh (2017) ได้ทำการศึกษาค่าความพรุนของหินดินดานจากหินดินดานคูไซบา (Qusaiba Shale, Saudi Arabia) ที่เป็นหินดินดานให้แก๊ส (Gas shale) เช่นเดียวกัน แต่การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำการวิเคราะห์ธรณีเคมี (Geochemistry) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM-EDS) เพื่อศึกษารูปร่างของรูพรุน และใช้การสั่นพ้องของคลื่นสนามแม่เหล็กนิวเคลียร์ (Nuclear magnetic resonance) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของรูพรุนและวัดค่าความพรุน

จากการศึกษาแร่องค์ประกอบพบว่าหินดินดานคูไชยะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกับหินดินดานในแอ่งพิชญ์โลก หินดินดานคูไชยะมีแร่ควอตซ์ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ แร่ดิน 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แร่แคลเฟลสปาร์ 3 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ แร่แอลไบต์ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ และในบางตัวอย่างจะพบแร่กลุ่มคาร์บอเนตด้วย ซึ่งแตกต่างจากหินดินดานจากแอ่งพิชญ์โลกที่พบแร่ควอตซ์ (26 – 56 เปอร์เซ็นต์) และแร่ดิน (70 – 40 เปอร์เซ็นต์) เป็นหลัก ไม่พบแร่แคลเฟลสปาร์และแร่แอลไบต์เหมือนกับที่คูไชยะ และเนื่องจากการศึกษานี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM-EDS) ในการศึกษาจึงสามารถมองเห็นรูพรุนได้ในระดับนาโนเมตร และในหินดินดานคูไชยะนี้พบรูพรุนตามการแบ่งชนิดรูพรุนของ Louck *et al.* (2012) (รูปที่ 4.1) ที่เหมือนกับที่พบในแอ่งพิชญ์โลก ได้แก่ รูพรุนชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) รูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelets) รูพรุนบริเวณขอบของเม็ด (Pores at the edge of rigid grains) รูพรุนระหว่างแร่ไฟไรต์แบบแพรมบอยดอล (Intercrystalline pore within pyrite framboids) รูพรุนชนิดรูพรุนในแผ่นแร่ดิน (Intraplatelet pores within aggregates) และยิ่งไปกว่านั้น หินดินดานคูไชยะยังพบรูพรุนชนิดอื่นอีก ได้แก่ รูพรุนในอินทรีย์สาร (Organic Matter pore) และรูพรุนในแร่ควอตซ์ที่แตกหัก (broken silica particle) อีกด้วย แต่หินดินดานจากคูไชยะจะไม่พบรูพรุนชนิดรอยแตก (Fracture pore) เหมือนที่พบในตัวอย่างที่ 5 (รูปที่ 4.7) ส่วนค่าความพรุนของหินดินดานคูไชยะนั้นอยู่ในช่วง 1 ถึง 2.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่างจากหินดินดานจากแอ่งพิชญ์โลกที่มีค่าความพรุนอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์

## 5.2 สรุปผล

จากการศึกษาค่าความพรุนและความซึมผ่านของหินดินดานจากแอ่งพิชญ์โลกด้วยวิธีการใช้ การถ่ายภาพตัดขวางรังสีเอ็กซ์ซินโครตรอน (Synchrotron X-ray Tomography) พบว่าค่าความพรุนของหินดินดานจากแอ่งพิชญ์โลกอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์ โดยประกอบไปด้วยรูพรุนแบบรูพรุนระหว่างอนุภาค (Interparticle pore) ชนิดรูพรุนระหว่างเม็ด (Pore between grain) และรูพรุนระหว่างแผ่นแร่ดิน (Pore between clay platelets) และรูพรุนแบบรอยแตก (Fracture pore) เป็นหลัก ซึ่งรูพรุนแต่ละชนิดจะมีรูปร่างและการเชื่อมต่อกันที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นชนิดของรูพรุนจึงเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมค่าความซึมผ่านได้ของหินดินดาน

ค่าความซึมผ่านได้ของหินดินดานอยู่ในช่วง 10 ถึง 27 มิลลิดาซี จากแบบจำลองการไหลพบว่าของไหลจะไหลผ่านตัวอย่างได้ดีในทิศทางขนานกับระนาบของชั้นหิน (Bedding plane) โดยการที่สามารถวัดค่าความซึมผ่านของหินดินดานได้มากกว่า 0.01 มิลลิดาซีนั้นแสดงให้เห็นว่าปิโตรเลียมสามารถไหลออกจากหินดินดานได้ถ้าทิศทางการไหลขนานกับระนาบของชั้นหิน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้ยังเป็นการศึกษาในเบื้องต้นและตัวอย่างยังมีจำนวนน้อย ดังนั้นในอนาคตจึงควรเพิ่มตัวอย่างหรือศึกษาเพิ่มเติมในพื้นที่ข้างเคียง และควรมีการศึกษาค่าความพรุนที่ได้ควบคุมไปกับข้อมูลจากการหยังธรณีหลุมเจาะในบริเวณเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและครอบคลุมยิ่งขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- Topór, T., Derkowski, A., Kuila, U., Fischer, T., and McCarty, D. 2016. Dual liquid porosimetry: A porosity measurement technique for oil- and gas-bearing shales. Fuel 183 (July 2016) : 537 – 549
- Abouelresh, M. 2016. An integrated characterization of the porosity in Qusaiba Shale, Saudi Arabia. Journal of Petroleum Science and Engineering 149 (October 2016) : 75 – 87
- Sun, J. *et al.* 2016. Measurement of total porosity for gas shales by gas injection porosimetry (GIP) method. Fuel 186 (September 2016) : 694 – 707
- Hemes, S. , Desbois, G. , Urai, J. , Schroppel, B. ,and Schwarz, J. 2015. Multi- scale characterization of porosity in Boom Clay (HADES-level, Mol, Belgium) using a combination of X-ray m-CT, 2D BIB-SEM and FIB-SEM tomography. Microporous and Mesoporous Materials 208 (January 2015) : 1 – 20
- USGS 2014. Assessment of Potential Unconventional Lacustrine Shale-Oil and Shale-Gas Resources, Phitsanulok Basin, Thailand, 2014. National and Global Petroleum Assessment (April 2014).
- Heller, R. , Vermynen, J. ,and Zoback M. 2014. Experimental investigation of matrix permeability of gas shales. The American Association of Petroleum Geologists (May 2014) : 975 – 995.
- Kanitpanyacharoen, W. *et al.* 2012. A comparative study of X-ray tomographic microscopy on shales at different synchrotron facilities: ALS, APS and SLS. Journal of Synchrotron Radiation 1 (January 2013) : 172 – 180.
- Kuila, U. , McCarty, D. , Derkowski, A. , Fischer, T. ,and Prasad, M. 2013. Total porosity measurement in gas shales by the water immersion porosimetry (WIP) method. Fuel 117 (October 2013) : 1115 – 1129.
- Pubellier, M. and Morley, C.K. 2013. The basins of Sundaland (SE Asia): Evolution and boundary conditions. Marine and Petroleum Geology 58 (December 2013) : 555 – 578.
- Loucks, R. , Reed, R. , Ruppel, S. ,and Hammes, U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. The American Association of Petroleum Geologists 6 (June 2012) : 1071– 1098.

- Pinyo and Komon 2011. Unconventional petroleum system evaluation of the Chum Saeng Formation, Phitsanulok Basin, Thailand. International Conference on Geology, Geotechnology, and Mineral Resources of Indochina [GEOINDO]: 11th Conference Proceedings, Khon Kaen University, Department of Geotechnology, Khon Kaen, Thailand. December 1–3 (2011) : 267–280.
- PTTEP. 2009. Sao Thian production license application, Bangkok, Thailand. 32.
- Punya Charusiri and Somchai Pum-Im 2009. Cenozoic Tectonic Evolution of Major Sedimentary Basins in Central, Northern, and the Gulf of Thailand. BEST Vol.2, No.1&2 (2009) : 40 – 62.
- Olson, R. and Murray, G. 2008. Mercury Injection Capillary Pressure (MICP) A Useful Tool for Improved Understanding of Porosity and Matrix Permeability Distributions in Shale Reservoirs. Search and Discovery Article (April 2008)
- Brown, G. 2002. Henry Darcy and the making of a law. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 38 (July 2002) : 11 – 23.
- Bowers, G. and Katsube, T. 2002. The Role of Shale Pore Structure on the Sensitivity of Wire-Line Logs to Overpressure. Pressure regimes in sedimentary basins and their prediction (2002) : 43 – 60.