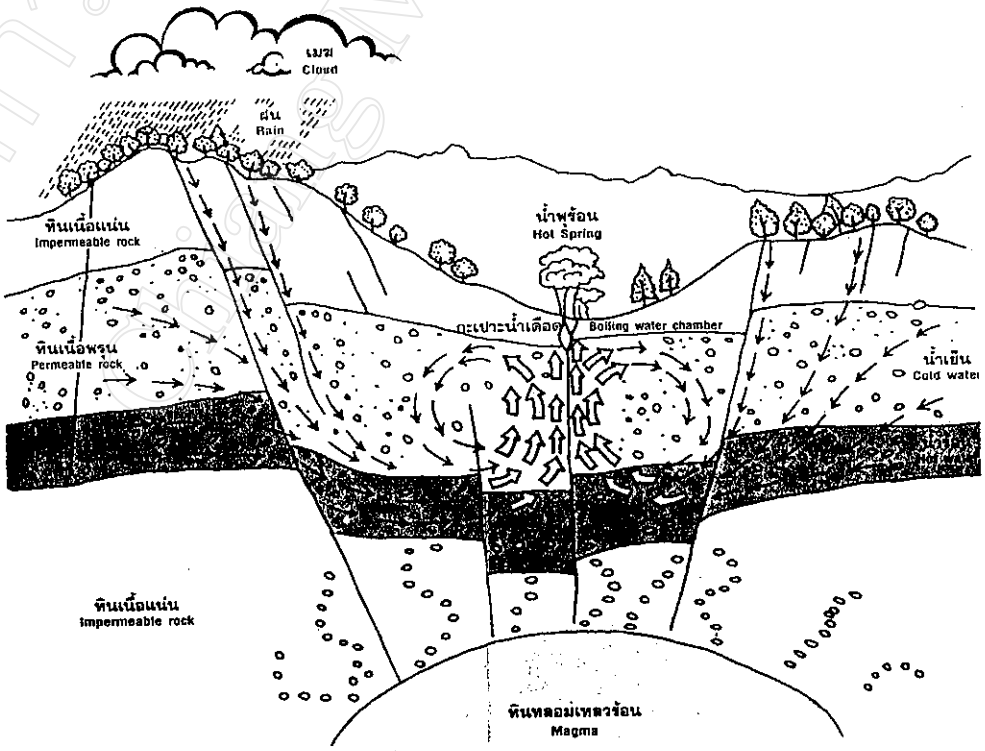
บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

น้ำพุร้อน (hot spring) เป็นแหล่งพลังงานใต้พิภพที่สำคัญ ซึ่งในปัจจุบันสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์แก่มนุษย์ได้มากมาย โดยสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า นำไปใช้กับเครื่องบ่มแห้งผลิตผลทางการเกษตร และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ในประเทศไทยมีแหล่งน้ำพุร้อนจำนวนมากและบริเวณที่มีน้ำพุร้อนมากที่สุดคือบริเวณภาคเหนือ จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณี (2530) รายงานว่าแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในภาคเหนือบางแห่งเกิดในบริเวณที่หินเกิดรอยเลื่อนและรอยแตกซึ่งมีขนาดใหญ่และมีการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการแผ่ความร้อนระหว่างรอยเลื่อนและรอยแตกของหิน จากนั้นเกิดการถ่ายเทความร้อนของหินหนืดร้อนใต้ผิวโลก ไปยังน้ำเย็นจากผิวดินซึ่งไหลซึมลงไปใต้ผิวโลก ทำให้น้ำเย็นเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำร้อนแล้วพุ่งขึ้นมาตามรอยแตก และรอยเลื่อนของหิน มักจะเกิดในบริเวณที่น้ำจะต้องไหลออกมาตามธรรมชาติ ปริมาณน้ำพุร้อนที่ไหลขึ้นมาหรือถูกปล่อยออกมาตามธรรมชาติจะมากหรือน้อยต่างกันในแต่ละบริเวณ (ภาพ 1) ปกติแล้วปริมาณของน้ำที่ไหลออกมาจะสม่ำเสมอไม่ขึ้นกับฤดูกาล อุณหภูมิของน้ำพุร้อนที่ขึ้นมาตามผิวดินมี ตั้งแต่ 45 – 100 ^{0}C (สระบุรี, 2523 อ้างถึง Castenholz, 1973)



ภาพ 1 การเกิดน้ำพุร้อนทางภาคเหนือของประเทศไทย

ทางด้านชีววิทยาได้มีผู้สนใจ และศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำพุร้อน ทั้งชนิด จำนวน และสรีรวิทยา เพื่อนำมาวิเคราะห์หาประโยชน์ และโทษจากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ สิ่งมีชีวิตที่สามารถเจริญได้ในบริเวณน้ำพุร้อน ซึ่งมีสภาพผิดปกติจากแหล่งน้ำธรรมชาติอื่น ๆ มีหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ได้แก่ สาหร่าย ซึ่งจะเป็นประเภททนต่อความร้อนซึ่งเรียกว่า thermophilic algae สาหร่ายประเภทนี้เกิดมาเป็นกลุ่มแรก ๆ คู่กับแบคทีเรียในยุคพรีแคมเบรียน จวบจนกระทั่งปัจจุบันสาหร่ายกลุ่มนี้ก็ยังคงลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบบเดิมอยู่มาก ไม่ได้วิวัฒนาการไปไกลเหมือนสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ (ยุวดี, 2542) ตามปกติจุลินทรีย์ที่เจริญในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะผลิต bioactive compound บางชนิด เช่นเอนไซม์ ซึ่งมีความสามารถในการทำงานที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติของการคงความสามารถในการทำงานที่อุณหภูมิสูง (thermostability) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเอนไซม์ที่จะวิจัยเพื่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะนักวิจัยสามารถเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง และสกัดเอนไซม์มาทำให้บริสุทธิ์ได้ที่อุณหภูมิห้องโดยที่เอนไซม์ไม่แปรสภาพพร้อมกับสูญเสียความสามารถในการทำงาน (denature) การเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงยังเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิต เพราะไม่ต้องใช้ระบบความเย็นควบคุมอุณหภูมิ (cooling system) และอุณหภูมิสูงยังป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดอื่น (กาญจนา และ สุทธิรักษ์, 2535)

สาหร่ายทนร้อนที่เจริญได้น้ำพุร้อนเหล่านี้ กลุ่มที่พบมากที่สุดทั้งชนิดและจำนวนคือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (cyanobacteria) ซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่น่าสนใจในด้านการนำมาใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรม เพราะจุลินทรีย์ประเภทนี้ทำการสังเคราะห์แสงเพื่อให้ได้พลังงานในการเจริญ และแพร่พันธุ์ ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในระดับอุตสาหกรรมจะลดต้นทุนการผลิตในส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อ เพราะสาหร่ายประเภทนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง (Round, 1975)

แหล่งกำเนิด และคุณสมบัติของน้ำพุร้อน และบ่อน้ำร้อนในประเทศไทย

กรมทรัพยากรธรณี (2530) ได้ทำการสำรวจแหล่งน้ำพุร้อนในภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ ในปี พ.ศ. 2526-2529 พบว่าประเทศไทยมีแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพมากกว่า 90 แหล่ง ซึ่งการเกิดน้ำพุร้อนโดยทั่วไปจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ แหล่งความร้อนใต้ดิน น้ำใต้ดิน และแหล่งเก็บกักหรือชั้นหินอุ้มน้ำในดิน แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพในภาคเหนือบางแหล่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของหินหนืดร้อนใต้ผิวโลกไปยังน้ำเย็นจากผิวดินซึ่งไหลซึมลงไปใต้โลก ทำให้น้ำเย็นเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำร้อน แล้วพุ่งขึ้นมาตามรอยแยก

และรอยเลื่อนของหิน แหล่งน้ำพุร้อนในภาคเหนือของประเทศไทย แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ ระบบแรกคือ ระบบน้ำพุร้อน (hot spring system) อุณหภูมิของน้ำพุอยู่ระหว่าง 50-100 ^{o}C และมีปริมาณสารละลายค่อนข้างสูง ได้แก่ แหล่งสันกำแพง ฝาง จังหวัดเชียงใหม่ เป็นต้น ระบบที่ 2 คือระบบน้ำพุอุ่น (warm spring system) คือระบบที่อุณหภูมิของน้ำพุร้อนต่ำกว่า 50^{o}C และมีปริมาณสารละลายค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับระบบแรก ได้แก่แหล่งบ้านแม่ยี และแหล่งบ้านแม่นะ อำเภอปาย จังหวัดแม่ฮ่องสอน เป็นต้น ระบบสุดท้ายคือ ระบบน้ำพุร้อนไกเซอร์ (Geyser System) คือระบบน้ำพุร้อนที่มีอุณหภูมิและแรงดันสูงมาก น้ำพุร้อนจะพุ่งขึ้นเหนือระดับพื้นดินตลอดเวลา หรือเป็นครั้งคราว แหล่งน้ำพุร้อนระบบนี้ได้แก่ แหล่งโป่งเดือด จังหวัดเชียงใหม่

น้ำพุร้อนตามสภาพความเป็นกรด-ด่างและมวลชีวภาพของสาหร่ายแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 Alkaline springs pH ประมาณ 9 มวลชีวภาพของสาหร่ายมีมากที่สุด ประเภทที่ 2 Calcium carbonate springs มี calcium carbonate ทับถมเป็นชั้น ๆ มวลชีวภาพของสาหร่ายมีน้อยกว่าประเภทที่ 1 ประเภทสุดท้ายคือ Acid springs pH ตั้งแต่ 2.1 – 6.0 ไม่มีสาหร่าย สีเขียวแกมน้ำเงิน แต่มีสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น สาหร่ายสีแดง *Cyanidium* sp. เป็นจำนวนมาก Fogg, *et al.* (1973)

ส่วน Ramingwong, *et al.* (1980) ได้แบ่งน้ำพุร้อนตามลักษณะที่ปรากฏออกเป็น 3 ชนิดคือ ชนิดแรก Seep springs มีลักษณะเป็นอ่างน้ำเล็ก ๆ มีน้ำขังหรือเป็นร่องเล็ก ๆ ที่มีน้ำไหล ชนิดที่สอง Pool springs มีลักษณะเป็นบ่อหรือแอ่ง ซึ่งอาจเป็นบ่อที่มีน้ำใสหรือมีโคลนผสมอยู่ ชนิดที่สาม Geyser มีลักษณะเป็นบ่อหรือแอ่ง มีน้ำพุพุ่งขึ้นมาจากบริเวณเหนือผิวดินซึ่งน้ำพุร้อนบริเวณภาคเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแบบ alkaline springs และ แบบ pool springs อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 45 – 100 ^{o}C

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่ายทนร้อน

สาหร่ายทนร้อนมักเจริญอยู่ในบริเวณน้ำพุร้อนซึ่งจะมีการไหลของน้ำพุร้อนไปยังลำธารคลอง ทำให้มีระดับความร้อนแตกต่างกัน ปัจจัยต่างๆก็ย่อมแตกต่างกันไปด้วย สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำพุร้อนจึงมีการปรับตัว (adaptation) ให้สามารถอยู่ในที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ได้ รวมทั้งสาหร่ายเหล่านี้ด้วยซึ่งแต่ละชนิดจะเจริญได้ในแต่ละระดับของอุณหภูมิที่ต่างกัน และแต่ละชนิดย่อมมีความทนต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในปริมาณไม่เท่ากัน (ยุวดี, 2542)

การที่สิ่งมีชีวิตเหล่านี้สามารถเจริญได้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปัจจัยทางกายภาพ (physical factor) ปัจจัยทางเคมี (chemical factor) และปัจจัยทางชีวภาพ (biological factor)

ซึ่งปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเจริญของสิ่งมีชีวิตในน้ำพุร้อนที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถปรับตัวให้ทนต่ออุณหภูมิและสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ดี บาง species สามารถตรึงไนโตรเจนได้ เช่น *Mastigocladus laminosus* ซึ่งจัดเป็นพวก polythermal organism (Odum , 1971) เมื่อวัดการเจริญของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำพุร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ปริมาณคลอโรฟิลล์ โปรตีน และ RNA เป็นเครื่องบ่งชี้โดยกำหนดให้สิ่งแวดล้อมอื่นๆ คงที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิเป็นตัวควบคุมการเจริญของสาหร่ายในน้ำพุร้อน และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญคือ 54 ^{o}C (Brock,1966) ปัจจัยต่อมาที่มีความสำคัญคือแสงสว่าง เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ควบคุมการผลิต ความเข้มของแสงสว่างจะมีผลต่อผู้ผลิตขั้นปฐมภูมิ (primary producer) Odum (1971) กล่าวว่าในน้ำพุร้อนขนาดใหญ่ที่มีอุณหภูมิคงที่เช่น น้ำพุร้อนที่ประเทศไอซ์แลนด์ที่มีอุณหภูมิคงที่ในช่วงฤดูหนาวซึ่งเหมาะแก่การเจริญของสาหร่าย แต่มีแสงสว่างเพียงเล็กน้อยในการสังเคราะห์ ทำให้สาหร่ายมีความหนาแน่นน้อยลง ปัจจัยสุดท้ายคือความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำพุร้อนจะถูกจำกัดด้วยค่าความเป็นกรดแก่หรือด่างแก่ ในน้ำพุร้อนที่มีสภาพเป็นกรดแก่จะมีการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟล์เป็นกรดกำมะถัน น้ำพุร้อนที่มีสภาพเป็นกรดแก่จะจำกัดการกระจายของสิ่งมีชีวิต สาหร่ายที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ เช่น สาหร่ายสีแดง *Cyanidium caldarium* พบในน้ำพุร้อนที่มีสภาพเป็นกรด (Castenholz, 1973) น้ำพุร้อนที่มีสภาพเป็นด่างซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง 51 – 56 ^{o}C จะพบ *Mastigocladus laminosus*, *Phormidium laminosum* และ *Synechococcus* spp. เป็นจำนวนมาก (Fogg, 1973)

ส่วนปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการเจริญของสิ่งมีชีวิตในน้ำพุร้อนซึ่งสระบุรี (2523) อ้างถึง Lynch and Poole (1979) ได้แก่การละลายของออกซิเจนในน้ำ ปริมาณการละลายของออกซิเจนในน้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณการละลายของออกซิเจนในน้ำจะลดลง ซึ่งมีผลต่อชนิดและจำนวนของสิ่งมีชีวิตในน้ำพุร้อน ปัจจัยที่สำคัญต่อมาคือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำพุร้อนส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำจึงเป็นปัจจัยจำกัดชนิดของจุลินทรีย์ แต่พบว่ามีผลต่อสาหร่ายน้อย

ปัจจัยทางชีวภาพที่มีผลต่อการเจริญของสิ่งมีชีวิตในน้ำพุร้อนนั้น Odum (1971) กล่าวว่าความสมดุลทางชีวภาพในน้ำพุร้อนขนาดใหญ่จะมีความสมดุลของมวลทางชีวภาพเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงการแทนที่ของสิ่งมีชีวิตอยู่เสมอ จึงทำให้สิ่งมีชีวิตอยู่ในสภาวะคงตัว ซึ่ง Campbell and Pace (1968) กล่าวว่าจุลินทรีย์พวก thermophile สามารถมีชีวิตอยู่รอดและเจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากประเภทแรกเอนไซม์ และโครงสร้างที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ มีคุณสมบัติทนต่อความร้อนสูง เอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูงแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มเอนไซม์ที่ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 55 – 60 ^{o}C เช่น malic dehydrogenase,

adenosine triphosphatase, inorganic pyrophosphatase, aldolase และ peptidase กลุ่มที่สองคือ กลุ่มเอนไซม์ที่จะทำงานเมื่อมีสารเริ่มต้นในปฏิกิริยาเท่านั้น เช่น asparagine deaminase, catalase, pyruvic acid oxidase และ isocitratelyase กลุ่มสุดท้ายคือ กลุ่มเอนไซม์และโปรตีนที่ต้านทานต่อความร้อนสูง เช่น α - amylase, protease, glyceraldehyde – 3 – phosphate dehydrogenase และเอนไซม์ที่กระตุ้นการทำงานของกรดอะมิโน

นอกจากนั้นจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีเยื่อหุ้มเซลล์คงตัวเมื่อความร้อนสูง เนื่องจากพวก thermophile จะมีลิปิด (lipid) ที่ละลายในกรดไขมัน (fatty acid) จำนวนมาก การที่ลิปิดละลายในกรดไขมันทำให้เยื่อหุ้มเซลล์คงตัวจึงสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ตรงข้ามกับพวก psychrophile ที่ลิปิดไม่ละลายในกรดไขมันจึงทำงานได้เฉพาะที่อุณหภูมิต่ำและไม่คงตัวในสภาพที่มีอุณหภูมิสูง นอกจากนี้จุดหลอมเหลวของลิปิดของพวก thermophile จะสูง เยื่อหุ้มเซลล์ยืดหยุ่นได้บ้างเมื่อได้รับความร้อน รูมีขนาดใหญ่ขึ้น และเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีจึงยอมให้สารผ่านได้และทนต่อ osmotic shock ทั้งยังสามารถสร้างส่วนประกอบของเซลล์ขึ้นใหม่ได้อย่างรวดเร็ว เซลล์จะมีอัตราเมตาโบลิซึมสูงในสภาพที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีการขนส่ง substrate และของเสียเข้าออกเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว

นอกจากนั้นยังสามารถปรับตัวทางสรีรวิทยาให้ทำงานได้ดีในอุณหภูมิสูง จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่อาศัยอยู่ในน้ำพุร้อนจะปรับตัวทางสรีรวิทยาให้ทำงานได้ดีในสิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่ และมีบางชนิดที่สามารถปรับตัวให้ทำงานได้ดีมากกว่าสิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่ เช่น สาหร่ายสีแดง *Cyanidium caldarium* โดย Roberts (1998) ศึกษาพบว่าสามารถอาศัยอยู่ได้ในอุณหภูมิสูง และในที่ๆมี pH ต่ำโดยอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 45 °C และสามารถอาศัยอยู่ได้ถึงอุณหภูมิ 57 °C

การศึกษาสาหร่ายในน้ำพุร้อนทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ

ในประเทศไทยมีนักวิจัยได้ทำการสำรวจความหลากหลายของสาหร่ายในน้ำพุร้อนไม่มากนัก สำหรับในภาคเหนือ สระบุรี (2523) ได้ทำการสำรวจจุลินทรีย์ในน้ำพุร้อนโป่งฮ่อม ตำบลออนหลวย อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ พบสาหร่าย 10 species ได้แก่ *Anacystis* sp., *Chroococcus turgidus*, *Anabaena* sp., *Navicula* sp., *Oscillatoria* spp., *Scenedesmus dimorphus*, *Closterium* sp., *Spirogyra* sp. และ *Stigeoclonium* sp. ต่อมากาญจนา และคณะ (2532) ได้ทำการสำรวจและศึกษาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำพุร้อนในภาคเหนือ ได้แก่ น้ำพุร้อนแม่ฝาง อำเภอฝาง น้ำพุร้อนโป่งฮ่อม อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ และน้ำพุร้อนบ้านท่าไม้แดง อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร พบสาหร่ายชนิดเด่น ได้แก่ *Calothrix* sp., *Oscillatoria*

terebriformis และ *Synechococcus* sp. ศึกษาโครงสร้างของเซลล์โดยทำการตรึงเซลล์ของ *Synechococcus* sp. และ *Oscillatoria terebriformis* ด้วยวิธีของ DeVecchi ก่อนนำมาตัด thin sections และศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน พบว่ามีการเรียงตัวของ thylakoids ติดกัน และเห็น nuclear fibrils ชัดเจน ต่อมาประวิทย์ (2533) ทำการศึกษาสาหร่ายในน้ำพุร้อนบ้านโป่งฮ่อม อ. สันกำแพง จ. เชียงใหม่ ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2530 ถึงเดือนเมษายน 2531 โดยศึกษาจากบ่อน้ำร้อนธรรมชาติ 5 บ่อ และธารน้ำร้อน 1 แห่ง พบว่ามีอุณหภูมิระหว่าง 31 - 77 ^{o}C พบสาหร่ายทั้งหมด 98 species เช่น *Oscillatoria* spp. , *Diploneis mauleri* , *Epithemia cistula* , *Synechococcus aeruginosus* และ *Navicula* spp. เป็นต้น โดยพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง และปริมาณแร่ธาตุ มีอิทธิพลต่อการกระจายของสาหร่ายในน้ำพุร้อน

ส่วนบริเวณภาคกลาง กาญจนา และ สุทธิรักษ์ (2535) ได้ทำการสำรวจชนิดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในบ่อน้ำร้อนหินดาด อ. ทองผาภูมิ จ. กาญจนบุรี และบ่อน้ำร้อนท่าไม้แดง จังหวัดกำแพงเพชร ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 40 –49 ^{o}C pH 6.0-8.0 พบ *Oscillatoria* spp. เป็นชนิดเด่น นอกจากนั้นยังพบ *Mastigocladus* sp., *Synechococcus* sp. และ *Calothrix* sp.

ในระยะเวลาใกล้ๆกัน ได้มีการสำรวจสาหร่ายดังกล่าวในภาคใต้โดย วิรัชนีย์ (2534) ศึกษาชนิดและนิเวศวิทยาของสาหร่ายในน้ำพุร้อนที่ อ. เขาชัยสน จ. พัทลุง ระหว่างเดือนกรกฎาคม 2534 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2535 โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายที่ขึ้นตามขอบบ่อ ก้นบ่อและสาหร่ายที่ลอยอยู่ในน้ำ พบว่าน้ำพุร้อนมีอุณหภูมิ 53 - 59 ^{o}C มี pH เท่ากับ 7.3 พบสาหร่ายทั้งหมด 14 species ตัวอย่างเช่น *Synechococcus elongatus* , *Synechococcus aquatilis* , *Phormidium ambigum* , *Dermocarpa sphaerica* และ *Stigonema hormoides* เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการแยกตัวอย่างสาหร่ายที่พบ ซึ่งสามารถแยกได้ทั้งหมด 5 species ได้แก่ *Chroococcus* sp., *Phormidium ambigum*, *Stigonema hormoides*, *Synechococcus elongatus* และ *Synechocystis aquatilis*

ในต่างประเทศมีการศึกษากันในหลายภูมิภาค เริ่มจากเขตร้อนซึ่งมีภูมิอากาศคล้ายประเทศไทย โดย Round (1975) ได้ทำการสำรวจสาหร่ายในน้ำพุร้อน On Sunda ประเทศอินโดนีเซีย พบชนิดสาหร่ายแตกต่างกันตามช่วงระดับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 45-55^{o}C พบสาหร่าย *Mastigocladus laminosus*, *Phormidium laminosum*, *Pleurocapsa fluviatilis*, *Plectonema notatum* v. *africanum*, *Scytonema coactile* v. *thermale* ที่อุณหภูมิ 55-60 ^{o}C พบสาหร่าย *Synechococcus elongatus* f. *thermalis*, *Synechocystis aquatilis*, *Phormidium laminosum*, *Onconema thermale*, *O. compactum*, *Phormidium tenue*, *P. cebennese* f. *thermale*, *Mastigocladus laminosus* ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 ^{o}C พบสาหร่าย *Synechococcus elongatus* f. *thermalis*, *Synechosystis aquatilis*, *Phormidium*

laminosum ต่อมา Leghari and Thebo (1983) ศึกษาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำพุร้อน Laki Shah Sadar ประเทศปากีสถาน อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 32 –42 ^{0}C pH อยู่ในช่วง 6.6– 8.2 พบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินทั้งหมด 12 genera 21 species ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม Chroococcales และ Nostocales สาหร่ายชนิดที่เด่นคือ *Oscillatoria* spp., *Phormidium* spp. และ *Synechococcus* spp. ซึ่งพบทุกช่วงอุณหภูมิ และ Compére and Delmotte (1986) ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่างของสาหร่ายในน้ำพุร้อน 2 แหล่งในประเทศแซมเบีย ทวีปแอฟริกาซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 54 - 84 ^{o}C แตกต่างกันไปตามฤดูกาล พบไดอะตอม 120 species และ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลาย species ได้แก่ *Scytonema figuratum, Oscillatoria* spp. , *Lyngbya angustissima* , *Synechococcus lividus* , *Rhopalodia gibberula, Pinnularia appendiculata* , *Cocconeis pediculus* , *Cymbella minuta* และ *Navicula cuspidata* เป็นต้น

ในเขตอบอุ่นและเขตหนาวมีการศึกษามากกว่าภูมิภาคอื่นๆ โดย Castenholz (1973) ศึกษาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ในน้ำพุร้อน Hunter รัฐโอริกอน และน้ำพุร้อน Yellowstone ในสหรัฐอเมริกา พบ *Synechococcus lividus* ในน้ำที่อุณหภูมิ 73 - 74 ^{o}C และ *Oscillatoria terebriformis* ที่อุณหภูมิ 35 - 38 ^{o}C ศึกษาน้ำพุร้อนในประเทศ ไอซ์แลนด์ และนิวซีแลนด์ พบ *Mastigocladus laminosus* ที่อุณหภูมิ 63 - 64 ^{o}C สองปีต่อมา Sperling (1975) ศึกษาระบบนิเวศของสาหร่ายในน้ำพุร้อน โดยทำการสำรวจสาหร่ายในน้ำพุร้อนทางตอนใต้ของประเทศไอซ์แลนด์ ในช่วงฤดูหนาวระหว่างธันวาคม 1968 ถึงมกราคม 1969 ในขณะเดียวกันก็ทำการวัดผลผลิตเบื้องต้นโดยใช้ C -14 พบว่าผลผลิตเบื้องต้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยในน้ำนิ่ง พบ *Mastigocladus laminosus* ที่อุณหภูมิสูง 55 ^{0}C และในธารน้ำร้อนที่มีอัตราไหลปานกลางถึงแรงพบ *Phormidium corium* และ *Lyngbya martensiana* ที่อุณหภูมิ 31 – 41 ^{0}C หลังจากนั้น Brock (1978) ทำการศึกษาความหลากหลายของชนิด และจำนวนของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินตามระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 10 – 75 ^{o}C จากน้ำพุร้อนหลาย ๆ แหล่ง พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิ 30 – 35 ^{o}C มีจำนวนและชนิดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมากที่สุดถึง 90 species ช่วงอุณหภูมิ 65 – 70 ^{o}C และ 70 – 75 ^{o}C มีจำนวนและชนิดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินน้อยที่สุดคือ 1 species จากรายงานของ Brock (1978) ซึ่งได้อ้างถึง Peary and Castenholz (1964) ซึ่งศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่าย สีเขียวแกมน้ำเงิน *Synechococcus lividus* ที่เก็บมาจากอุณหภูมิต่าง ๆ ในน้ำพุร้อน Hunterรัฐโอริกอน พบว่าสามารถแบ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญได้เป็น 4 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็น species ที่เก็บมาจากอุณหภูมิ 45, 48 และ 53^{o}C อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญคือ 45^{o}C กลุ่มที่ 2 เป็น species ที่เก็บมาจากอุณหภูมิ 55 และ 60 ^{o}C อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญคือ

50 ^{o}C กลุ่มที่ 3 เป็น species ที่เก็บมาจากอุณหภูมิ 66 และ 71 ^{o}C อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญคือ 55 ^{o}C และกลุ่มสุดท้ายเป็น species ที่เก็บมาจากอุณหภูมิ 75 ^{o}C อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญคือ 65 ^{o}C

หลายปีต่อมา Dell'Uomo (1986) ทำการศึกษาไดอะตอมและสาหร่ายจากน้ำพุร้อน Triponzo เมืองเปรูเจีย ในตอนกลางของประเทศอิตาลี ซึ่งน้ำมาจากแหล่งอาบน้ำร้อนแบบโรมัน อุณหภูมิประมาณ 28 ^{o}C น้ำพุร้อนแห่งนี้มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์ในรูปคอลลอยด์มาก พบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิดเด่น คือ *Oscillatoria okenii* รองลงมาคือ *Phormidium* spp. และ *Aphanocapsa* spp. พบสาหร่ายไฟคือ *Chara vulgaris* พบไดอะตอม 44 ชนิด ชนิดเด่นคือ *Navicula cryptocephala* var. *veneta* และ *Navicula gregaria* ซึ่งเป็นชนิดที่เจริญในบริเวณที่มีความเค็มสูง (halophiles) โดยพบว่าไดอะตอมจะไวต่อปริมาณของ NaCl และ $MgCl_2$ นอกจากนั้นยังไวต่อปริมาณซัลไฟด์ งานวิจัยในเรื่องนี้ใช้ชนิดและปริมาณของไดอะตอมมาจัดคุณภาพของน้ำซึ่งจัดอยู่ในประเภท β– mesosaprobic

สำหรับปัจจัยจำกัดเกี่ยวกับอุณหภูมิต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำพุร้อนนั้น Brock (1994) ทำการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของ จุลินทรีย์ ซึ่งระดับอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการเจริญของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน พบว่าสิ่งมีชีวิตประเภท eucaryotes จะมีความทนต่ออุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าสิ่งมีชีวิตพวก procaryotes โดยแบคทีเรียมีระดับความทนต่ออุณหภูมิสูงที่สุดคือ ประมาณ 115^{o}C รองลงมาเป็นกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและแบคทีเรียสังเคราะห์แสง ในช่วงอุณหภูมิ 70-73 ^{o}C ปีต่อมา Pentecost (1995) ทำการศึกษาสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำพุร้อน 3 แหล่ง ในประเทศอังกฤษ พบว่าที่น้ำพุร้อน Bath Spa พบจำนวนชนิดของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมากที่สุด สาหร่ายชนิดที่เด่นคือ *Phormidium* spp. เมื่อทำการศึกษาการใช้ C-14 เปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิ พบว่า *P. luridum* และ *P. ambiguum* มีช่วงอุณหภูมิที่เจริญเติบโตดีที่ 30 และ 40 ^{o}C ตามลำดับ แต่ไม่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิเกิน 47 ^{o}C การศึกษาได้ผลเช่นเดียวกับ Brock (1978) ซึ่งศึกษาความหลากหลายของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบว่ามีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 30 – 35 ^{o}C มีจำนวนและชนิดของสาหร่ายมากและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 70 – 75 ^{o}C มีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพียงชนิดเดียวคือ *Synechococcus* sp. ที่สามารถเจริญได้

มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางกายภาพและเคมีบางประการที่มีผลต่อการเจริญของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เช่น Castenholz (1976) ศึกษาผลกระทบของซัลไฟด์ที่มีต่อสาหร่าย สีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำพุร้อนประเทศนิวซีแลนด์ และไอซ์แลนด์ พบว่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ละลายน้ำจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสาหร่าย นอกจากนี้ยังมีผลต่อปัจจัยทางเคมีในน้ำ

ยกเว้นค่า pH การศึกษา *Mastigocladus laminosus* ในประเทศนิวซีแลนด์พบว่าสาหร่าย species นี้จะไวต่อปริมาณซัลไฟด์เกิน 0.15 mg/l ส่วนในประเทศไอซ์แลนด์จะไวต่อปริมาณซัลไฟด์เกิน 0.25 mg/l และพบว่าไม่สามารถพบสาหร่ายชนิดนี้ในน้ำที่มีซัลไฟด์สูงมากๆ

ในแง่ของการเพาะเลี้ยงที่ต้องการผลผลิตต่าง ๆ และการประยุกต์เพื่อนำไปใช้มีการวิจัยกันมากมาย ซึ่ง Hayashi *et al.* (1994) ทำการแยกสายพันธุ์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน 3 สายพันธุ์ จากน้ำพุร้อนบ้านโป่งฮ่อม อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า *Chroococcidiopsis* sp. สายพันธุ์ TS - 821 สามารถเจริญได้ในอาหารเพาะเลี้ยงในสภาพอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 50°C , pH ประมาณ 8 พบว่าสามารถตรึงไนโตรเจนได้ ทนต่อไนไตรท์ ซัลไฟต์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ได้ ปีเดียวกันนั้นFish and Codd (1994) ศึกษาการผลิตสารต่อต้านแบคทีเรียซึ่งผลิตจาก สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินทนร้อน *Phormidium* sp. โดยเลี้ยงแบบ batch culture โดยสามารถยับยั้งการเจริญของ heterotrophic bacteria ชนิดกรัมบวก และกรัมลบหลายชนิดพร้อมกันนั้นยังสามรถยับยั้งเชื้อยีสต์และรา เช่น *Candida albicans* และ *Cladosporium resinae* ปีต่อมา Sakamoto *et. al.* (1995) ศึกษาสาหร่ายสีเขียว *Chlorella* จากน้ำพุร้อนในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิ และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงๆได้ โดยสาหร่ายชนิดนี้สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 42°C และสามารถเจริญได้ดีในชุดการทดลองที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 40%ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายชนิดนี้มีความเหมาะสมในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมได้ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Hefley (2000) รายงานว่าทีมวิศวกรจากมหาวิทยาลัย Ohio ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้สร้างตัวกรองแบบใหม่ที่ทำจากสิ่งมีชีวิต (new living filter) ซึ่งทำมาจาก culture ของสาหร่ายในน้ำพุร้อน Yellowstone National Park ซึ่งมีคุณสมบัติในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานได้ โดยตัวกรองจะยึดติดกับระบบเผาไหม้ของโรงงานเผาถ่านหิน สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 20% ซึ่งมีความเหมาะสมในการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับหนึ่งและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยในแนวทางเดียวกันเกี่ยวกับงานวิจัยที่มุ่งแก้ไขสภาพแวดล้อมดังที่กล่าวมาโดย Miyake *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป