

บทที่ 3 วิธีการทางวิทยาศาสตร์และการทดลองเกี่ยวกับ สิ่งแวดล้อม

ในประวัติศาสตร์มนุษย์ได้สังเกตและพยายามอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของธรรมชาติ แต่มนุษย์เพิ่งมีความรู้เกี่ยวกับธรรมชาติอย่างลึกซึ้งและกว้างขวางเมื่อสองสามศตวรรษที่ผ่านมาเอง เหตุผลสำคัญในเรื่องนี้คือมนุษย์เริ่มใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ (Scientific method) ทดลองพิสูจน์ข้อสังเกตทำให้ได้มาซึ่งทฤษฎีและข้อสรุปต่าง ๆ มากมาย

ปกติในการค้นหาความจริงเกี่ยวกับข้อสังเกตมนุษย์พยายามหาเหตุผลที่เป็นไปได้เพื่อนำมาใช้อธิบายสนับสนุนข้อสังเกต อย่างไรก็ตามเหตุผลดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะใช้อ้างอิงสนับสนุนข้อเท็จจริงเกี่ยวกับความรู้สาขาต่าง ๆ ได้ ลองมาพิจารณาวิธีการที่คนเราหาความรู้กันว่ามีกี่วิธีทาง M. Cohen (1934) นักปรัชญา ชาวอเมริกันได้เรียบเรียงวิธีการหาความรู้ของคนเราไว้ดังนี้

(1) The method of tenacity วิธีการนี้มีรากฐานอยู่บนความเชื่อที่ยึดถือและปฏิบัติสืบเนื่องกันมานาน เรายอมรับว่าสิ่งหนึ่งสิ่งใดถูกต้องเพราะเราเชื่อว่าควรเป็นเช่นนั้น คำถามเกี่ยวกับชาติ เผ่าพันธุ์ ภาษาและกีฬาที่คนชอบกันมากมักได้รับการสนับสนุนโดยวิธีการนี้ แต่โอกาสที่จะได้ความรู้ใหม่จากวิธีการนี้มีน้อย

(2) The method of authority วิธีการอีกวิธีหนึ่งที่คนเราใช้อ้างสนับสนุนความเชื่อของตนเองคือการอ้างถึงผู้นำ ความคิด ความเชื่อ ของผู้นำหรือผู้ที่มีอำนาจอิทธิพลเหนือตน เป็นสิ่งที่คนเชื่อว่าถูกและเป็นเหตุผลที่ควรยอมรับ มีคนจำนวนมากที่ใช้วิธีการนี้ดังจะเห็นได้จากการกล่าวถึง Marx, Che Guvera หนังสือปกแดงของเมาเซดุง คัมภีร์ไบเบิล คัมภีร์โบราณ ฯลฯ เรื่องเกี่ยวกับการเมือง ศาสนา และกิริยามรรยาทมักถูกอ้างอิงว่าถูกต้องโดยวิธีการนี้เช่นเดียวกัน

ถ้าพิจารณากันให้ลึกลงไปอีกจะพบว่าภาวะที่คนรับเอาวิธีการนี้มาใช้มีอยู่ 2 กรณีคือ

(ก) ผู้อ้างขาดความรู้เกี่ยวกับข้อเท็จจริง จึงยินดียอมรับความคิดหรือคำพูดของผู้นำหรือผู้มีตำแหน่งอำนาจหน้าที่เหนือกว่า

(ข) ผู้อ้างพยายามหลีกเลี่ยงความเห็นขัดแย้งโดยอ้างถึงกฎเกณฑ์ที่ผู้อื่นตั้งไว้ ซึ่งเป็นแรงผลักดันจูงใจให้เกิดความเห็นคล้อยตามนำไปสู่การยอมรับความคิดหรือข้อเสนอของผู้อ้าง ผู้ที่ไม่เห็นด้วยกับผู้อ้างอาจถูกกล่าวหาว่ามีความคิดแหกคอกหรือเป็นแกะดำ

แม้ว่าจุดมุ่งหมายของวิธีการทั้งสองมุ่งให้ได้มาซึ่งมติเอกฉันท์หรือความเป็นอันหนึ่งอันเดียวในความเชื่อมั่น แต่หลายครั้งที่เหตุการณ์ไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ผู้อ้าง เนื่องจากกฎเกณฑ์หรือความคิดที่ผู้นำเขียนไว้ขัดแย้งกันเอง เป็นผลให้มีผู้ไม่เห็นด้วยกับผู้อ้างเป็นจำนวนมากและพวกนี้ยังรวมตัวกันต่อต้านวิธีการอ้างแบบนี้

(3) The method of intuition บางครั้งกฎเกณฑ์หรือคำกล่าวหรือความคิดในยุคสมัยหรือช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งทำให้คนในยุคสมัยนั้น ๆ รู้สึกว่ามีหลักฐานในตัวเองอยู่แล้ว (self evident) ในสมัยก่อนถ้าพูดว่าโลกแบน ดวงอาทิตย์หมุนรอบโลก เชื่อราเกิดจากสิ่งเน่าเปื่อย ก็เป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นความจริง แต่ต่อมามีผู้ทดลองพิสูจน์ว่าเรื่องที่เคยเชื่อว่าเป็นจริงดังตัวอย่างที่กล่าวนั้นผิด โลกกลม โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์ ความคิดที่ว่าสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous generation) ถูกล้มล้างโดยหลุยส์ ปาสเจอร์ แม้แต่ความคิดของศาสตราจารย์ สมัยก่อนหลายท่านก็ผิดได้ เช่น ทฤษฎีของ Lamarck เกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะจากพ่อแม่ไปยังลูก สิ่งที่เราเชื่อว่าเป็น self evident ไม่เป็นเครื่องรับประกันใด ๆ สำหรับความจริง

(4) The method of science หรือ reflective inquiry วิธีการนี้เป็นวิธีการที่พยายามค้นหาคำตอบของปัญหาต่าง ๆ อย่างไรก็ดีคำตอบที่ได้มีสิทธิ์ผิดพลาดได้ วิธีการวิทยาศาสตร์ไม่ได้ให้คำตอบสุดท้ายที่เป็นการสิ้นสุดของปัญหาแต่เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ผลสนับสนุนข้อสังเกตได้ดีที่สุด วิธีการวิทยาศาสตร์มีรากฐานจากการสังเกตปรากฏการณ์ธรรมชาติ เมื่อได้ข้อสังเกตแล้วนักวิทยาศาสตร์จะพยายามหาคำอธิบายข้อสังเกตนั้น ๆ ซึ่งเป็นที่มาของคำถามที่ใช้ถามตัวเองว่า “ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น” แล้วจึงพยายามหาคำตอบที่มีเหตุผล คำตอบที่นักวิทยาศาสตร์คิดว่าควรเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของคำถามคือสมมติฐานที่ฝรั่งเรียกว่า hypothesis

แต่นักวิทยาศาสตร์หาได้หยุดเพียงแค่นี้ เขาต้องพิสูจน์คำตอบของตนเองว่าถูกหรือผิดโดยวิธีการทดลอง ผลการทดลองที่ออกมาถ้าเป็นไปตามสมมุติฐาน นักวิทยาศาสตร์ก็สามารถกล่าวได้ว่าสมมุติฐานที่ตนเองตั้งไว้ถูก และเขาอาจจะตั้งสมมุติฐานของตนเองเป็นทฤษฎีถ้าทำการทดลองพิสูจน์หลายครั้งในสภาพการณ์ต่าง ๆ แล้วได้ผลเหมือนเดิม การทดลองซ้ำอาจใช้สิ่งทดลองต่างชนิดไป หรืออาจเป็นการทดลองที่ใช้ปัจจัยควบคุมต่างกันไป วิธีการและขั้นตอนดังกล่าวทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อสังเกตเก่าและข้อสังเกตใหม่ได้ สามารถค้นพบข้อผิดพลาดของการทดลองเก่าในการทดลองใหม่ ทำให้สร้างทฤษฎีใหม่หรือขยายความทฤษฎีเก่าออกไปได้อีก และยังทำให้คิดต่อไปได้ว่าทัศนะทางวิทยาศาสตร์เป็นเรื่องไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามก็ดีขอให้ตระหนักว่าความไม่แน่นอนนี้ไม่ได้ปฏิเสธความก้าวหน้าทางวิชาการ แต่ในทางตรงข้ามวิธีวิทยาศาสตร์ทำให้เกิดความกระจ่างของปัญหาที่เราเข้าใจผิดกันในอดีต จริงอยู่ที่ความผิดพลาดในการทดลองมีสิทธิเกิดขึ้นได้เนื่องจากความตั้งใจจนเกินไปหรือความลำเอียงหรือตามอำเภอใจของผู้ทดลอง แต่เรื่องทำนองนี้เป็นปกติวิสัยของมนุษย์ที่เราถือว่าเป็น Human error

โครงสร้างของวิธีการวิทยาศาสตร์

ขั้นตอนการสังเกต คิด ตั้งสมมุติฐาน และทดลองพิสูจน์เป็นขั้นตอนที่อยู่ในสมองของนักวิทยาศาสตร์โดยทั่วไป แต่หลายครั้งที่นักวิทยาศาสตร์หลายคนละเลยเรื่องโครงสร้างของวิธีการทางวิทยาศาสตร์ แน่แน่นอนนักปรัชญาและนักตรรกวิทยาอาจไม่เห็นด้วยกับโครงสร้างวิธีวิทยาศาสตร์ แต่นักวิทยาศาสตร์ที่ดีควรคำนึงถึงเรื่องนี้เป็นอย่างยิ่ง

จุดเริ่มต้นของการแสวงหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์อยู่ที่เรายอมรับว่า ความรู้ที่เรามีอยู่ไม่เพียงพอที่จะใช้อธิบายสนับสนุนปรากฏการณ์ธรรมชาติที่สังเกตพบ เป็นต้นว่าทำไมลูกจึงมีส่วคล้ายพ่อแม่ แต่ไม่เหมือนพ่อแม่และก็ไม่ใช่อุณหภูมิที่มีลักษณะของแม่และพ่อผสมกัน นี่คือนักวิทยาศาสตร์ต้องคิดและทดลองเพื่อหาคำอธิบายข้อสังเกตการทดลองที่นักวิทยาศาสตร์ปฏิบัติเพื่อนำไปสู่การอธิบายปัญหาต่าง ๆ นั้น บางครั้งบุคคล

ในวงการอื่นอาจคิดว่าไม่สำคัญเพราะให้ประโยชน์แก่มวลชนน้อย อาจเป็นด้วยเหตุผลนี้ก็ได้อันทำให้การทดลองพื้นฐานที่เรียกว่า basic research ในบ้านเราไม่ได้รับความสนใจและการสนับสนุนเท่าที่ควร ทั้งที่การทดลองพื้นฐานให้ข้อมูลที่นำไปสู่การทดลองประยุกต์ จริงอยู่ที่หลายท่านคิดว่าเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและเงินทองในการทดลองพื้นฐานเพราะการทดลองพื้นฐานเป็นการทดลองที่นักวิทยาศาสตร์ในประเทศพัฒนาทำได้มากแล้ว ในบ้านเราควรรวบรวมเอาข้อมูลที่ชาวต่างประเทศได้ทำไว้มาประยุกต์ใช้เลย แต่ขอให้คิดว่านักวิทยาศาสตร์ในประเทศพัฒนาทำการทดลองพื้นฐานโดยเลือกปัญหา วิธีการทดลอง และปัจจัยในการทดลองไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์หรือสิ่งทดลองที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศและภูมิศาสตร์บ้านเขาเท่านั้น สิ่งดังกล่าวนี้ต่างไปจากประเทศในเขตร้อน ผลการทดลองของเขานำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาบ้านเราได้บ้างไม่ได้บ้าง บางทีเทคโนโลยีที่เขาใช้ในการทดลองก็สูง บ้านเราซึ่งจนกว่าไม่สามารถใช้เทคโนโลยีของเขาได้ อาจเป็นด้วยเหตุนี้ก็อีกเหมือนกันที่ทำให้บุคคลในหลายวงการของบ้านเราพูดถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสม (appropriate technology) กันมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็ดีเชื่อว่าผู้ที่พูดถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสมก็ยังฝังความคิดกับการทดลองประยุกต์มากกว่าการทดลองพื้นฐาน เมื่อ Roentgen ทำการทดลองพื้นฐานเกี่ยวกับรังสี เขาพบว่า มีรังสีบางชนิดที่ไม่หักเหในสนามแม่เหล็ก การทดลองนี้เขาค้นพบรังสีเอกซ์เรย์ซึ่งปัจจุบันเรามาใช้ประโยชน์กันเกือบทุกวงการ การเลือกปัญหาศึกษาบางครั้งอาจดูไม่สำคัญและประโยชน์ที่คาดไว้ในตอนแรกอาจน้อย แต่เมื่อศึกษาเข้าจริงแล้วผลการศึกษานั้นมีประโยชน์มากมายดังตัวอย่างที่กล่าวในที่นี้

ขั้นตอนที่สองของวิธีวิทยาศาสตร์คือรวบรวมข้อมูลหรือข้อเท็จจริงที่เกี่ยวกับปัญหาที่เลือกศึกษา ข้อเท็จจริงนี้อาจเป็นข้อสังเกตอื่น ๆ หรือข้อคิด หรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผู้อื่นได้ศึกษาวิจัยไว้ แม้แต่การแลกเปลี่ยนข้อคิดกับเพื่อนร่วมงานก็เป็นสิ่งจำเป็นในการรวบรวมข้อเท็จจริง แน่หนอนที่เราไม่สามารถรวบรวมข้อเท็จจริงได้หมดทุกแง่มุม การศึกษาปัญหาจึงจำเป็นต้องเลือกศึกษาในแง่ใดแง่หนึ่งโดยเฉพาะในการศึกษาทางนิเวศวิทยา เป็นไปไม่ได้ที่จะศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต จึงจำเป็นต้องลดตัวแปรในการศึกษาให้น้อยลง เป็นต้นว่าการศึกษาความสามารถการเปลี่ยนน้ำเสียของผักตบชวา ถ้าศึกษากันในสภาพที่เป็นจริงไม่ว่าจะเป็นในบ่อ หนอง คลอง บึง เราไม่มีทางทราบอัตราการดูดธาตอาหารจากน้ำเสียในสถานที่ดังกล่าวได้แน่นอน เนื่องจากไม่ทราบ

ว่าปริมาณน้ำเสียที่ไหลเข้าและไหลออกว่าเป็นอย่างไร น้ำเสียที่ไหลเข้าอาจมีปริมาณในตรรก ฟอสเฟต และธาตุอื่น ๆ ไม่เท่ากันในแต่ละวันหรือแม้แต่ในทุกครึ่งชั่วโมง อุณหภูมิของน้ำและของอากาศก็เปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันในแต่ละวัน จำนวนสาหร่าย พืชน้ำ จุลชีพ และสัตว์น้ำที่สามารถดูดธาตุอาหารได้เช่นเดียวกับผักตบชวาก็ไม่ทราบจำนวนที่แน่นอน ดังนั้นการรวบรวมข้อมูลที่นักวิจัยสมัยปัจจุบันทำกันเป็นส่วนมาก คือรวบรวมศึกษาผลการวิจัยที่พิมพ์ออกเผยแพร่ในวารสารต่าง ๆ โดยพยายามเลือกเอาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่เราจะศึกษาให้มากที่สุด ข้อมูลต่าง ๆ ที่รวบรวมได้นี้ ฝรั่งเศสเรียกว่า Literature

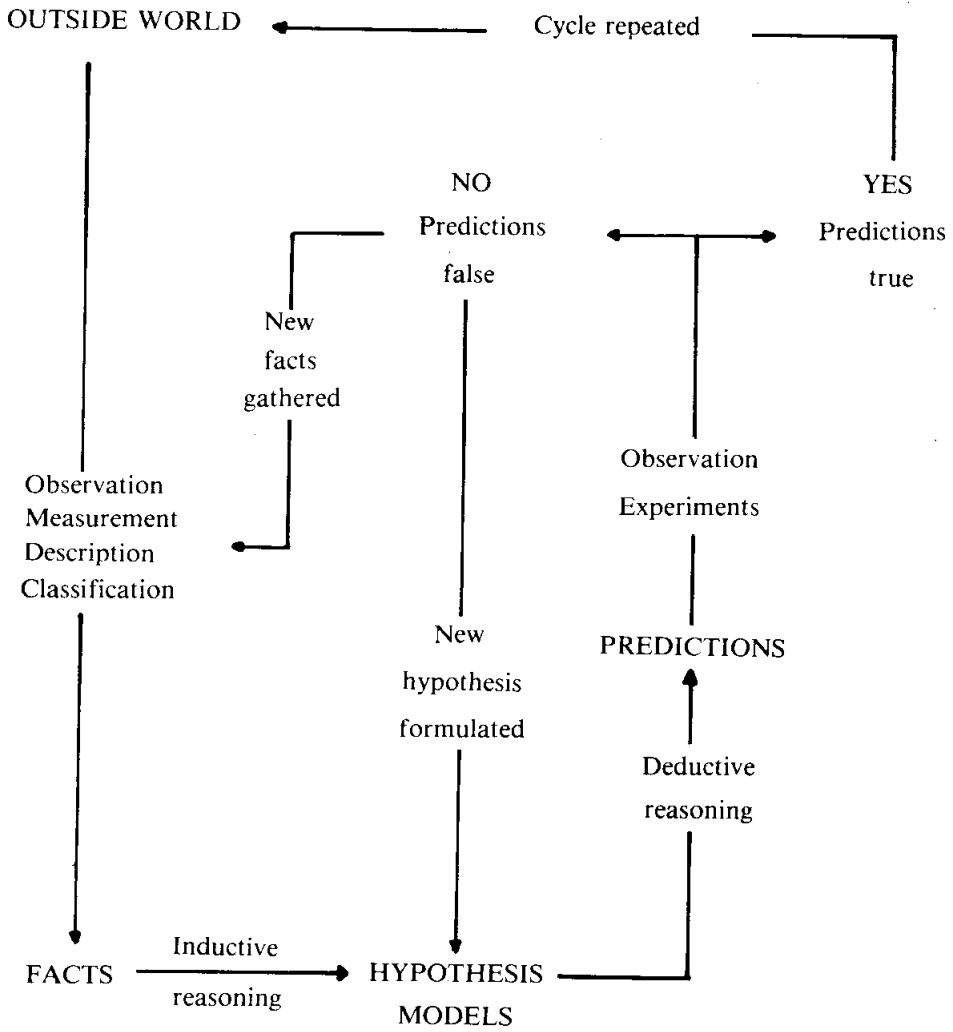
หลังจากเลือกปัญหา รวบรวมข้อมูลแล้ว ลำดับถัดมาคือสมมุติฐานซึ่งโดยทั่วไปมักใช้วิธีการที่เรียกว่า inductive reasoning วิธีการคือสร้างสมมุติฐานจากส่วนย่อยแล้วอ้างนำไปหาส่วนรวมทั่วไป สมมุติว่าจะศึกษาปัญหามลภาวะของอากาศ จากการรวบรวมศึกษาข้อมูลทราบว่าอากาศเป็นพิษ เพราะมีทั้งฝุ่นละอองและสารเคมีหลายชนิด ที่สำคัญคือซัลเฟอร์ออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ สารเคมีทั้งสองชนิดอยู่ในรูปของแก๊สซึ่งเมื่อละลายน้ำจะได้กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก ดังนั้นเราจึงตั้งสมมุติฐานได้ว่า ถ้าอากาศในเมืองมีแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ น้ำฝนที่ตกในเมืองหรือบริเวณชานเมืองจะมีคุณสมบัติเป็นกรด pH ปริมาณซัลเฟตและไนเตรทในน้ำฝนจึงเป็นดัชนีมลภาวะของอากาศในเมืองได้ ความเสียหายที่เกิดจากฝนกรดสามารถประเมินได้จากจำนวนพืชที่แสดงอาการโรค (symptom) ต่อพื้นที่ ความเป็นกรดของดินที่เพิ่มขึ้นต่อฤดูกาลเพาะปลูกก็สามารถประเมินได้จากปริมาณไนเตรทและซัลเฟต ความเสียหายอาจประเมินในรูปของผลผลิตที่ลดลงหรือในรูปของค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการแก้ไขไม่ให้นดินเป็นกรด สมมุติฐานที่สร้างขึ้นควรกล่าวถึงปัญหาที่จะศึกษาและควรสามารถทำนายผลของสมมุติฐานได้ การทำนายผลหรือคาดคะเนล่วงหน้านี้ฝรั่งใช้ศัพท์ prediction ผลที่คาดล่วงหน้านี้ควรพิสูจน์หรือประเมินได้จากการทดลอง การกล่าวว่าลูกมีส่วนเหมือนพ่อแม่เพราะว่าพ่อแม่และลูกมีความสัมพันธ์กันโดยสายเลือด ไม่ใช่สมมุติฐาน เพราะไม่สามารถทำนายและทดสอบค่ากล่าวได้ ถ้าจะให้เป็นสมมุติฐานควรกล่าวว่า ลูกที่เกิดมามีส่วนเหมือนพ่อแม่เนื่องจากพ่อแม่จะถ่ายทอด genes จำนวนหนึ่งให้ลูกโดยผ่านเซลล์สืบพันธุ์ ในการทำนายผลมักใช้การคิดแบบ deductive reasoning ซึ่งเป็นการคิดจากกฎทั่วไปไปหาตัวอย่างหรือส่วนย่อยที่จะทดลอง

การทดสอบสมมุติฐานเป็นขั้นตอนที่ต้องทำถัดไปในวิธีของวิทยาศาสตร์ ขั้นตอนนี้ ได้แก่การวางแผนการทดลองไม่ว่าจะเป็นในห้องปฏิบัติการหรือในห้องที่ธรรมชาติ แล้วดำเนินการทดลองตามแผน ตามที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าในการทดลองบางครั้งเราไม่สามารถศึกษาทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกันได้พร้อมกันทุกปัจจัยทำให้ต้องเลือกศึกษาเฉพาะด้านและจำเป็นต้องลดตัวแปรในการทดลอง ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมบางปัจจัยให้คงที่ได้ เช่น อุณหภูมิ แสง ความชื้น อากาศ ฯลฯ ขณะเดียวกันก็จำเป็นต้องละเลยอีกหลายปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยถือว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อสิ่งที่จะศึกษาน้อยมาก บางครั้งการศึกษาเชิงเปรียบเทียบก็จำเป็นในหลายแขนงของชีววิทยา เช่น วิวัฒนาการ เมื่อได้ทำการทดลองได้ตัวเลขแล้ว (data) เครื่องมือที่นักวิทยาศาสตร์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเลขข้อมูลคือสถิติ สถิติช่วยให้ผู้ทดลองอธิบายและตัดสินผลการทดลองว่าสนับสนุนสมมุติฐานผลการทดลองเป็นไปตามคำทำนายหรือไม่สนับสนุนสมมุติฐาน ถ้าไม่เป็นไปตามคำทำนายที่คิดไว้สมมุติฐานที่ตั้งไว้ตอนต้นก็ใช้ไม่ได้ ขั้นตอนที่ควรทำต่อไปคือกลับไปตั้งสมมุติฐานใหม่ ทำนายและทดลองใหม่

ขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้เป็น การแสดงให้เห็นว่าการดำเนินงานโดยวิธีของวิทยาศาสตร์เป็นอย่างไร ขั้นตอนนี้พอสรุปเป็นแผนภาพได้ดังในรูป 3.1 อย่างไรก็ตามในการทดลองทางวิทยาศาสตร์เราจำเป็นต้องเชื่อหรือสมมุติ (assume) ว่า

- (1) นักวิทยาศาสตร์ดำเนินการทุกขั้นตอนโดยไม่มีจิตลำเอียง
- (2) การรายงานผลการทดลองเป็นไปอย่างที่เป็นจริง
- (3) ข้อมูลหรือข้อเท็จจริงที่เรียกว่า Literature

เป็นที่ทราบกันในวงการนั้น ๆ แล้ว แต่ในชีวิตการทำงานของนักวิทยาศาสตร์แล้ว ข้อสมมุติ (assumptions) ทั้งสามข้อนี้เป็นไปได้ยาก สมมุติฐานที่มนุษย์สร้างขึ้นมีทางเอียงไปข้างใดข้างหนึ่งไม่มากนักน้อยคือมี bias ไม่มากนักน้อย ปกติแล้วสมมุติฐานมีรากฐานอยู่บนความรู้เกี่ยวกับธรรมชาติที่ไม่สมบูรณ์ มนุษย์ไม่รู้ไปเสียทุกอย่างยังมีอีกหลายสิ่งหลายอย่าง ที่มนุษย์ไม่ทราบ หลายสิ่งที่ยังค้นไม่พบและอาจคิดไม่ถึงด้วยในหลายกรณี ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้เมื่อนักวิทยาศาสตร์สร้างสมมุติฐานแล้ว เขาก็จะวางแผนการทดลองและทำการทดลองโดยหวังผลสนับสนุนสมมุติฐานที่ตนเองตั้งไว้ นอกจากนี้ถ้านักวิทยาศาสตร์ผู้นั้นมีชื่อเสียงอยู่



รูป 3.1 แผนภาพแสดงการทำงานของวิธีทางวิทยาศาสตร์

ในวงการ เขายังสามารถใช้ชื่อเสียงและเครดิตปกป้องรักษาสम्मุตฐานเขาไว้อีก ตัวอย่างในเรื่องนี้พบแล้วในประวัติการวิจัยทางพันธุศาสตร์ หลังจากเมนเดลทดลองศึกษาลักษณะของต้นถั่วและเมล็ดถั่ว เขาก็พิมพ์ผลงานทั้งหมดแล้วส่งไปให้นักพฤกษศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ Carl Nägeli ซึ่งเป็นผู้นำในวงการพฤกษศาสตร์สมัยนั้น Nägeli เป็นศาสตราจารย์อยู่ที่มหาวิทยาลัยแห่งเบอร์ลิน เขากลับมองข้ามผลงานของเมนเดลและไม่เข้าใจความสามารถของเมนเดลที่สามารถทดลองพิสูจน์สมมติฐานได้ด้วยวิธีการที่เข้าใจง่าย เขาเขียนจดหมายตอบเมนเดลไปว่า เขาจะเชื่อการค้นพบของเมนเดลว่าเป็นจริงถ้าเมนเดลสามารถทำการทดลองให้ได้ผลเช่นเดิมอีกโดยใช้เมล็ดพืช hawkweed ซึ่งเป็นพืชที่เขา กำลังศึกษาอยู่ในขณะนั้น เมนเดลทำการทดลองซ้ำกับ hawkweed แต่ไม่ได้ผลเหมือนกับต้นถั่ว สมัยนั้นนักวิทยาศาสตร์ทั้งสองท่านนี้ไม่ทราบเลยว่า hawkweed ให้เมล็ดโดยไม่มีการผสมเกสร แต่ที่เป็นไปแล้วคือ Nägeli ได้ก่อดความคิดและการค้นพบของเมนเดลไว้ไม่ให้เป็นที่ยอมรับกันในวงการพันธุศาสตร์ แม้ว่าวิธีการที่เขาขอร้องให้เมนเดลทำการทดลองซ้ำถูกต้องตามลักษณะนิสัยของนักวิทยาศาสตร์ แต่การขอร้องให้ทดลองซ้ำโดยใช้ hawkweed เป็นคำถามที่น่าคิดมาก

ปัญหาที่สำคัญอีกปัญหาหนึ่งในวิธีของวิทยาศาสตร์คือทฤษฎีแต่ละทฤษฎีไม่ได้เป็นอิสระขาดจากกัน การศึกษาปัญหาหนึ่งโดยใช้เพียงทฤษฎีเดียวช่วยในการอธิบายแก้ปัญหา เป็นเรื่องที่ไม่ถูกต้องนัก ทฤษฎีอื่น ๆ มีส่วนช่วยอธิบายปัญหาที่กำลังศึกษาอยู่ ทฤษฎีต่าง ๆ เป็นส่วนหนึ่งของกฎเกณฑ์ใหญ่ของโลก ดังนั้นทฤษฎีหนึ่งสามารถใช้สนับสนุนอีกทฤษฎีหนึ่งได้ พุดง่าย ๆ คือเป็นไปได้ที่ทฤษฎีใหม่เป็นส่วนย่อยของทฤษฎีใหญ่ เป็นไปได้ที่นักวิทยาศาสตร์รุ่นเก่าหรือรุ่นแก่ไม่ยอมรับความคิดใหม่ได้โดยง่าย ในขณะที่นักวิทยาศาสตร์รุ่นหนุ่มพยายามสร้างสังกัป สมมติฐาน และทฤษฎีใหม่ ๆ ผลคือการถกเถียงไม่ลงรอยกันระหว่างนักวิทยาศาสตร์ด้วยกัน การเปลี่ยนจาก Newtonian มาเป็น relativistic cosmology ในต้นศตวรรษที่ 20 นี้ทำให้เกิดการถกเถียงประจัญกันอย่างรุนแรงในกลุ่มนักฟิสิกส์ ตัวอย่างทางชีววิทยาได้แก่ทฤษฎีวิวัฒนาการของดาร์วินในช่วงปี 1860 - 1869 ซึ่งถือว่าเป็นการประจัญบานระหว่างความคิดใหม่กับความคิดเก่า ทางธรณีวิทยาก็มีทฤษฎี continental drift ที่อธิบายว่าทวีปทั้งหลายในโลกเคลื่อนที่จากที่เดิม ซึ่งเดิมเชื่อว่าทวีปหรือแผ่นดินใหญ่ ๆ นี้อยู่กับที่ ไม่มีทางเคลื่อนไปไหนได้

ทั้งหมดที่กล่าวมาเกี่ยวกับวิธีการวิทยาศาสตร์จะเห็นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำมาซึ่งความรู้ใหม่ ๆ แม้ว่าจะมีความบกพร่องในขั้นตอนอยู่บ้าง แต่นักวิทยาศาสตร์ทุกคนพยายามใช้วิธีการวิทยาศาสตร์ด้วยความบริสุทธิ์ใจ ความผิดพลาดนั้นเป็นไปได้ที่มีส่วนสืบเนื่องจากสังคมและวัฒนธรรม นักวิทยาศาสตร์ยังคงเป็นส่วนหนึ่งของสังคมและวัฒนธรรม เป็นเรื่องยากที่จะแยกตัวเองให้พ้นจากสังคมที่ตนอยู่ร่วมด้วยได้

กลับมาพิจารณาส่วนสำคัญของวิธีของวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะสมมุติฐาน สมมุติฐานที่ตั้งขึ้นทุกสมมุติฐานต้องทดสอบได้ด้วยการทดลอง ในประวัติของชีววิทยามีอยู่สมัยหนึ่งที่นักชีววิทยาเชื่อว่าสิ่งมีชีวิตมีวิญญาณที่เรียกว่า vital essence สิ่งมีชีวิตมีชีวิตอยู่ก็เพราะมีวิญญาณ แต่วิญญาณนี้ไม่มีตัวตน พูดอย่างฝรั่งคือเป็น immaterial จึงไม่สามารถทดลองหรือทำการทดลองกับวิญญาณได้ ด้วยเหตุนี้ทฤษฎี vitalism จึงเสื่อมความนิยมและไม่มีคนเชื่อมากในระยะหลังเนื่องจากไม่สามารถทดลองพิสูจน์ได้นั่นเอง ที่ยกตัวอย่างนี้ก็เพื่อให้เห็นว่าสมมุติฐานไม่มีความหมายใด ๆ เลยถ้าไม่สามารถทดสอบได้

ที่สำคัญเกี่ยวกับสมมุติฐานคือรูปแบบของสมมุติฐานควรเป็นแบบที่มีเหตุผล (logical form) สมมุติฐานที่ดีควรประกอบด้วย

(1) ข้อความเกี่ยวกับปัญหาที่จะศึกษา ข้อความนี้เป็นข้อความนำ (antecedent) ของสมมุติฐาน อาจารย์เรื่องราวหรือผลการศึกษาที่มีมาก่อนที่จะถึงปัญหาที่จะเลือกศึกษา ในกรณีการทดลองของเมนเดลข้อความนำควรกล่าวถึงลักษณะสูง เตี้ย เมล็ดเรียบ เมล็ดย่น ที่พบในต้นถั่วชนิดเดียวกัน ควรกล่าวถึงการผสมเกสรในต้นถั่วว่าเป็นอย่างไร สรุปได้ว่าข้อความนำคือปรากฏการณ์ที่สังเกตพบเป็นปัญหาที่ต้องการคำอธิบาย

(2) ส่วนที่สองของสมมุติฐานเป็นหลักการและเหตุผลที่ใช้อธิบายความนำในข้อแรก ในตัวอย่างของเมนเดลที่ยกมาในข้อแรกข้อความตอนที่สองนี้ก็จะ เป็น Law of segregation หรือ Law of independent assortment ในส่วนที่สองนี้ควรรวมสิ่งที่คาดหวังหรือคำทำนายไว้ด้วย

ข้อควรคำนึงอีกข้อหนึ่งในการตั้งสมมุติฐานคือพิจารณาปัญหาให้รอบคอบแล้ว เลือกตั้งสมมุติฐานที่สามารถทดสอบได้ อย่างไรก็ตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ดีแล้วก็เป็นไปได้ที่ทดสอบแล้วผลไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ บางครั้งแม้ว่าผลการทดสอบจะเป็นไปตามสมมุติฐานก็อาจกล่าวได้เพียงว่าอาจเป็นจริงตามสมมุติฐานเท่านั้น เพราะแผนการทดลองและสิ่งทดลองที่เลือกอาจไม่เหมาะสมเท่าที่ควรก็เป็นได้ สมมุติฐานที่ถูกเมื่อทดสอบจะให้ผลการทดลองเหมือนกันไม่ว่าจะทดสอบสักกี่ครั้งก็ตาม ไม่ว่าจะทดสอบที่แห่งหนตำบลใดผลการทดสอบก็ไม่ต่างกัน การทดสอบสมมุติฐานที่ได้ผลเฉพาะในห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ เท่านั้นจะถือว่าสมมุติฐานนั้นถูกต้องไม่ได้

แผนการทดลองที่ใช้ทดสอบสมมุติฐานในหลายกรณีจำเป็นต้องมีตัวเปรียบเทียบที่เรียกว่า control เช่น จะทดสอบว่าแสงแดดจำเป็นในการสร้างคาร์โบไฮเดรตในพืชสีเขียว เราอาจใช้พืชชนิดเดียวกัน อายุเท่ากัน ปลูกในกระถางขนาดเดียวกันที่มีดินชนิดเดียวกันในปริมาณที่เท่ากัน แล้วยแยกกระถางกลุ่มหนึ่งไว้ในที่มีแสงแดดตามปกติ กลุ่มนี้เป็น controls ส่วนอีกกลุ่มเอาไว้ในที่มีมืด หลังจากนั้น 7 วัน ตัดเอาใบพืชจากทั้งสองกลุ่มมาวิเคราะห์หาปริมาณแป้ง การทดลองในห้องปฏิบัติการเหนือกว่าการทดลองในห้องที่ธรรมชาติตรงที่สามารถควบคุมตัวแปรในการทดลองได้เพราะเป็นการทดลองในสิ่งแวดล้อมเทียม (artificial environment) อย่างไรก็ตามสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการผิดจากที่เป็นจริงมาก ข้อนี้อาจทำให้สมมุติฐานที่ทดสอบใช้ไม่ได้

ที่ยุ่งยากเกี่ยวกับสมมุติฐานอีกเรื่องหนึ่งคือ หลายครั้งที่สมมุติฐานเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายปัญหาให้ชัดเจนได้ แต่สมมุติฐานสองสมมุติฐานอธิบายปรากฏการณ์ที่เป็นปัญหาได้ดีกว่า ปัญหาจะเกิดขึ้นถ้ารวมสองสมมุติฐานเข้าเป็นสมมุติฐานเดียวแล้วข้อความแย้งกัน บางครั้งอาจพบปัญหาในทางตรงข้ามคือมีสองสมมุติฐานหรือมากกว่าที่อธิบายปัญหาเดียวกันได้ ในกรณีเช่นนี้ให้เลือกสมมุติฐานที่สั้นเข้าใจง่ายและครอบคลุมเนื้อความได้ดีที่สุด มีภาษิตฝรั่งที่ใช้เตือนใจในเรื่องนี้ได้คืออยู่ภาษิตหนึ่งคือ It is vain to do with more what can be done with fewer.

การใช้คณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือช่วยสร้างสมมุติฐานเป็นเรื่องที่ควรคำนึงถึงอีกข้อหนึ่ง หลายสมมุติฐานใช้ข้อความยาวยืดซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวเลข คณิตศาสตร์เป็น deductive science ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ดีในการสร้างสมมุติฐานให้เข้าใจง่ายขึ้น ตัวอย่างที่ดีในเรื่องนี้ได้แก่ทฤษฎีประชากรในสาขา population biology อย่างไรก็ตามก็คิดคณิตศาสตร์เหมาะสมสำหรับสมมุติฐานเชิงปริมาณและในหลายกรณีไม่สามารถใช้แทนภาพพจน์ภายในของชีววิทยาได้

แผนการทดลอง (Experimental Design)

การวิจัยสิ่งแวดลอมจำเป็นต้องอาศัยสถิติและแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณที่วิเคราะห์ได้ โดยความหมายกว้าง ๆ แล้วสถิติหมายถึง การเก็บแจกแจง วิเคราะห์ และสรุปตัวเลขที่ได้จากการทดลอง ข้อสรุปที่ได้หลังจากวิเคราะห์ตัวเลข (statistical inference) เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทางวิทยาศาสตร์ ในการวิจัยนักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจกับพืชหรือสัตว์ที่ใช้ทดลอง แต่ความสนใจหลักจะอยู่ที่ข้อสรุปที่จะนำไปใช้กับ population ที่เก็บตัวอย่างมา สถิติจึงเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิจัย

ในระยะ 15-20 ปีที่ผ่านมาเทคนิคการวิจัยที่อาศัยสถิติเปลี่ยนไปมาก มีหลายสาเหตุที่ทำให้สามารถกล่าวเช่นนี้ได้

- (1) ความรู้เกี่ยวกับสิ่งแวดลอมมีมากขึ้น
- (2) สังเกตหรือมโนทัศน์สิ่งแวดลอมเปลี่ยนไปจากเดิม เดิมเข้าใจกันว่าทั้งสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตมีปฏิริยาสัมพันธ์กันรวมเป็นสิ่งแวดลอม สังเกตสิ่งแวดลอมใหม่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่หนึ่ง นอกจากนี้สิ่งแวดลอมตามความคิดใหม่เป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา
- (3) มีสังกัปใหม่อื่น ๆ เกิดขึ้นมากตลอดจนอุปกรณ์ใหม่ ๆ ที่มีเทคนิคในการวัดและบันทึกที่รวดเร็วและเที่ยงตรงมากขึ้น
- (4) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติพัฒนาขึ้นมาก ปัจจุบันเรามีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่วิเคราะห์ข้อมูลที่มีตัวแปรมากได้ในระยะเวลาสั้น

แผนการทดลองที่นักวิจัยเลือกใช้อาจดีหรือไม่ดีก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะและธรรมชาติของการทดลอง ถ้าเลือกแผนการทดลองที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้หมดโอกาสใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ อาจพลาดโอกาสที่จะทราบข้อผิดพลาดของการทดลองที่เรียกว่า experimental error นอกจากนี้คำอธิบายที่มีพื้นฐานอยู่บนแผนการทดลองที่ผิดก็เชื่อถือไม่ได้

โดยทั่วไปแผนการทดลองพอแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ systemic design และ randomized design ประเภทแรกสะดวกและง่าย ไม่มีขบวนการเก็บตัวอย่างแบบสุ่มเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่มีข้อเสียที่การประเมิน error variance ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาความแตกต่างระหว่าง treatment ได้ ประเภทที่สองต่างจากประเภทแรกที่ความแปรปรวน (variation) ที่ศึกษาจะกระจายอยู่ตลอด replications ของแต่ละ treatment ซึ่งเป็นการลด bias ในการทดลองให้น้อยลง ผู้ทดลองโดยใช้แผนการทดลองประเภทที่สองควรมีความรู้เกี่ยวกับความแปรปรวนของสิ่งทดลองและต้องทราบจำนวน replications ที่จะใช้ซึ่งทั้งสองข้อนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่าง treatment ที่ผู้ทดลองต้องการจะศึกษาแผนการทดลองที่มักใช้กันเสมอได้แก่

(1) Comparison of two samples แผนการทดลองแบบนี้ ประกอบด้วยกลุ่มตัวอย่าง (samples) 2 กลุ่ม กลุ่มทดลอง (experimental) และกลุ่มเปรียบเทียบ (control) เช่นทดลองยาฆ่าแมลง ดี ดี ที กับเปลี้ยหอย กลุ่มเปลี้ยหอยที่เป็นกลุ่มทดลองคือพวกที่ถูกพ่นด้วยดี ดี ที ที่ความเข้มข้นหนึ่ง พวกที่ไม่ถูกพ่นเป็นกลุ่มเปรียบเทียบ ในแผนการทดลองแบบนี้จะมีปัญหาถ้ามีตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่ม

(2) Completely randomized design ในกรณีที่ต้องการตัวอย่างในการทดลองมากกว่า 2 ตัวอย่างในกลุ่มประชากรที่ใหญ่ ปัญหา human bias ก็มากขึ้น การสุ่มตัวอย่างจึงมีความสำคัญ เป็นไปได้ที่ผู้ทดลองเก็บตัวอย่างต้นทานตะวันมักจะไม่เลือกเอาแต่ต้นที่สูงมีดอกใหญ่ ถ้าเป็นหนูตะเภาเขาก็จะเลือกเอาตัวที่จับได้ง่าย การสุ่มในกรณีแรกอาจทำได้โดยแบ่งพื้นที่เป็นตารางให้หมายเลขแก่ตารางแล้วจับสลากหมายเลข แล้วจึงสุ่มในแต่ละตารางอีกหนึ่ง ในกรณีหนูตะเภาอาจทำการสุ่มตัวอย่างได้โดยให้หมายเลขหนูแล้วจับสลากหมายเลข แผนการทดลองแบบ completely randomized design เป็นแผนการพื้นฐานในประเภท

randomized design ในแผนการทดลองแบบนี้การจัด treatment สำหรับสิ่งทดลองเป็นไปอย่างสุ่ม เหมาะสำหรับสิ่งทดลองที่มีความแตกต่างกันน้อย เช่นทดลองอาหารผสม 4 สูตรกับหมูพันธุ์ ก. เราถือว่าความแตกต่างระหว่างหมูแต่ละตัวในพันธุ์เดียวกันมีน้อยมาก หมูแต่ละกลุ่มที่จะนำมาทดลองอาหารแต่ละสูตรได้มาโดยการสุ่มอาจเป็นวิธีให้หมายเลขแล้วจับสลาก ถ้าเป็นการทดลองปุ๋ย 3 สูตรกับข้าวพันธุ์ ข. ก็ทำได้โดยแบ่งพื้นที่เป็นแปลง ๆ แล้วสุ่มแปลงที่จะใส่ปุ๋ยแต่ละสูตร แผนการทดลองแบบนี้ง่ายต่อการวิเคราะห์แม้ว่าจะมีจำนวน replications ของแต่ละ treatment ไม่เท่ากันก็ไม่เป็นปัญหาในการวิเคราะห์ นอกจากนี้แผนทดลองแบบนี้ยังให้ degrees of freedom สูงสุดสำหรับข้อผิดพลาด (error) อีกด้วย ข้อเสียของแผนทดลองแบบนี้คือใช้กับจำนวน treatments มากไม่ได้ เพราะถ้าเพิ่ม treatments มากขึ้นก็จำเป็นต้องเพิ่มสิ่งทดลองหรือหน่วยทดลอง (experimental unit) ให้มากขึ้นด้วย เป็นเหตุให้ความแปรปรวนหรือความแตกต่างระหว่างแต่ละสิ่งทดลองมากขึ้น กล่าวคือช่วยทำให้กลุ่มสิ่งทดลองที่สุ่มมามีลักษณะเป็น heterogeneous materials ผลที่ตามมาคืออาจทำให้ error variance มากขึ้น

(3) Randomized complete block design แผนการทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับสิ่งทดลองที่มีความแตกต่างกัน (heterogeneous materials) อาจลดความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองได้โดยแบ่งเป็นกลุ่มย่อย (subgroups) ที่มีลักษณะคล้ายกันหรือต่างกันน้อยที่สุด กลุ่มย่อยนี้อาจเรียกว่า block ก็ได้ แต่ละหน่วยทดลองหรือสิ่งทดลองในแต่ละ block จะได้รับ treatments แบบสุ่ม ถ้าให้อาหารผสม 4 สูตรแก่หมู 20 ตัว ปัจจัยสภาพแวดล้อมอาจมีผลต่อน้ำหนักของหมูที่เพิ่ม ขณะเดียวกันผู้ทดลองอาจไม่สามารถเลี้ยงหมูไว้ในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิแสง ความชื้น ฯลฯ เหมือนกันหมด เขาจึงแบ่งหมู 20 ตัว เป็น 5 กลุ่มย่อยกลุ่มละ 4 ตัว แต่ละตัวของแต่ละกลุ่มจะได้รับอาหาร 1 สูตรโดยการสุ่ม ดังนั้นหมู 4 ตัวในแต่ละกลุ่มจะได้รับอาหารต่างกันถึง 4 สูตร ในแผนการทดลองแบบนี้จึงต้องสมมุติว่าสภาพแวดล้อมของแต่ละกลุ่มย่อยเหมือนกันหมด นอกจากนี้ความแตกต่างของอายุและน้ำหนักหมู ก่อนการทดลองอาจมีส่วนในการเจริญเติบโตเมื่อได้รับอาหารต่างกัน การแบ่งหมูเป็นกลุ่มย่อยตามอายุหรือตามน้ำหนักช่วยลดปัญหาความแตกต่างภายในกลุ่มย่อยได้

แผนการทดลองนี้ใช้ได้ดีสำหรับงานวิจัยหลายประเภท การวิเคราะห์ทางสถิติ error mean square ลดเนื่องจากในการหา error sum square ต้องลบ block sum square ออกด้วย แม้ว่าแผนการทดลองแบบนี้ใช้กับการทดลองที่มีจำนวน treatments หรือ จำนวน replications มากกว่า completely randomized design แต่ถ้าจำนวน treatments มากเกินไปการแบ่งกลุ่มย่อยให้เป็นรูปแบบเดียวกันทุกกลุ่มเป็นไปได้ยาก

(4) Latin square design แผนการทดลองแบบนี้จัดกลุ่มย่อยเป็นสองทาง นอกจากจัดเป็นบล็อกแล้วยังจัดเป็นแถว (rows) อีก การจัดกลุ่มสองทาง (double grouping) ช่วยลดความแตกต่างในบล็อกหรือคอลัมน์และในแถวทำให้ลด error variance ลงได้อีกซึ่งเป็นข้อที่เหนือกว่า randomized complete block design ข้อเสียของ Latin square อยู่ที่จำนวนแถวและจำนวนคอลัมน์ต้องเท่ากัน ในกรณีที่มี treatments มากก็จะมีปัญหา ลองพิจารณาตัวอย่าง

II	I	III
111	II	I
I	III	II

จะเห็นว่าจำนวนแถวและจำนวนคอลัมน์เป็น 3 เท่ากัน สมมุติว่าระดับของ treatment เป็น 3 สูตร การใส่ปุ๋ยทั้ง 3 สูตรในแต่ละแถวและแต่ละคอลัมน์เป็นไปแบบสุ่ม แผนการทดลองแบบ 3×3 นี้สามารถจัดเรียงได้ถึง 12 แบบ ถ้าจำนวน treatment เป็น 4 ก็สามารถจัดรูปแบบการทดลองได้ถึง 576 แบบ ถ้าเป็น Latin square 5×5 ก็จัดได้ 161,280 แบบโดยไม่ซ้ำกัน และจัดได้ 812,851,200 แบบ ในกรณีของ Latin square 6×6 อย่างไรก็ตาม Latin square ที่มีจำนวนแถวและจำนวนคอลัมน์น้อยจะมี degree of freedom น้อยซึ่งทำให้ค่า variance ลดลง

(5) Split plot design อาจเรียกแผนการทดลองแบบนี้ว่า incomplete block design ก็ได้ หลักการพื้นฐานของแผนการทดลองแบบนี้อยู่ที่ว่าสามารถแบ่ง plot ที่จะทดลองระดับของปัจจัยหนึ่งออกเป็น subplot เพื่อที่จะใช้ทดลองกับระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง ดังนั้นทั้ง plot จึงเป็นบล็อกหนึ่งของ subplot treatments แผนการทดลองนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่ระดับ

ของปัจจัยหนึ่งต้องการสิ่งทดลองจำนวนมากกว่าปัจจัยหนึ่ง นอกจากนี้แผนแบบนี้ยังให้ความเที่ยงตรงในการศึกษา subplot treatments อย่างไรก็ตามก็ตีความเที่ยงตรงของการศึกษาทั้ง plot มีข้อมูลไม่เพียงพอทำให้วิเคราะห์การทดลองลำบากขึ้น แผนการทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับ factorial experiments ปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยควรให้เป็น plot ใหญ่ ในการหาการตอบสนองของพืชต่อยุ่ ก. โดยการหาส่วนประกอบทางเคมีของส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี 5 วิธี วัตถุประสงค์ใหญ่ต้องการทราบ่วิธีวิเคราะห์ใดให้ผลดีกว่ากัน วิธีการวิเคราะห์จึงเป็นระดับของปัจจัยที่ต้องการข้อมูลมาก (subplot treatments) พืชทั้งต้นเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของสิ่งทดลองจึงเป็น plot ใหญ่ ในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีทำได้โดยบดพืชแห้งทั้งต้นแล้วแบ่งเป็น subsamples

(6) Split block design บางครั้งผู้ทดลองไม่สนใจ plot treatments และ subplot treatments มากนัก แต่ต้องการทราบปฏิกริยาร่วม (interaction) ระหว่าง plot และ subplot treatments ในกรณีเช่นนี้อาจใช้ randomized block หรือ Latin square เป็นพื้นฐาน เช่นทดลองระดับปัจจัย ก. ในแผนการทดลองพื้นฐาน แล้วใช้ปัจจัย ข. กับทุก treatments ของปัจจัย ก. แผนการทดลองแบบนี้ treatments ของ ก. และ ข. เป็น plot ใหญ่ทั้งหมด ปฏิกริยาร่วม ก. \times ข. เป็น subplot แม้ว่า plot จะใหญ่มาก ข้อมูลที่ได้ดีและแน่นอนโดยเฉพาะปฏิกริยาร่วมระหว่างสองปัจจัย แต่การวิเคราะห์ก็ซับซ้อนมากกว่าแผนแบบอื่น

ชนิดของการทดลอง (Types of Experiments)

การทดลองโดยทั่วไปแบ่งเป็นชนิดโดยอาศัยจำนวนปัจจัยที่จะศึกษาในการทดลองเป็นหลักในการแยกชนิด

(1) Simple experiments การทดลองชนิดนี้เราใช้ศึกษากันมาก ในการทดลองเราศึกษาตัวแปร (variable) ทีละตัวในแต่ละครั้งของการทดลอง ส่วนตัวแปรอื่น ๆ เราควบคุม

ให้คงที่ เช่น จะศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการหายใจของพืช ก. ในตู้ควบคุมสภาพแวดล้อม ก็ทำได้โดยควบคุมความเข้มของแสง ช่วงเวลาที่มีแสง ความชื้นให้คงที่

(2) Factorial experiments การทดลองชนิดนี้เราศึกษาผลของหลายปัจจัยในเวลาเดียวกัน แต่ละปัจจัยอาจมีหลายระดับ การทดลองชนิดนี้จำเป็นต้องเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง นอกจากใช้ศึกษาหลายปัจจัยได้แล้วยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับปฏิภณาร่วมระหว่างปัจจัยได้อีก ข้อเสียสำหรับการทดลองชนิดนี้คือถ้ามีหลายปัจจัยและแต่ละปัจจัยมีหลายระดับงานอาจมากเกินไปกำลังที่จะศึกษา

ข้อเสนอแนะในการวางแผนการทดลอง

ในการวิจัยโดยการทดลองในสาขาสิ่งแวดล้อมการหาตัวเลขข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุดไม่ใช่สิ่งที่ถูกและเหมาะสมมากนัก การวิจัยจะมีคุณค่าและความหมายถ้าการวิจัยนั้นเป็นการศึกษาปัญหาเฉพาะ จริงอยู่ที่ตัวเลขเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมทำให้ผู้วิจัยรู้สึกว่าได้ไปถึงประตูของการวิจัยที่มีนัยสำคัญ แต่นั่นเป็นสมัยที่สิบปีก่อนที่การวิจัยยังอยู่ในระบอบบุกเบิก ปัจจุบันคำถามที่นักวิจัยสิ่งแวดล้อมถามปัญหาเฉพาะได้เฉียบตรงมากเท่าใดโอกาสที่จะได้คำตอบที่ดีจากการวิจัยก็มากขึ้นเท่านั้น การวิจัยที่ดีไม่จำเป็นต้องอาศัยขบวนการซับซ้อนในการทดสอบสมมุติฐาน คำถามธรรมดา เช่น ความแตกต่างระหว่างความสามารถในการสืบพันธุ์ของ population หนึ่ง 2 populations คืออะไร ควรได้รับคำตอบโดยวิธีการทดลองที่ง่าย แต่ถ้าถามว่า ทำไมหนึ่ง 2 populations จึงมีความแตกต่างกันในศักยภาพการสืบพันธุ์ คำตอบที่จะได้จำเป็นต้องอาศัยวิธีการและแผนการทดลองที่ซับซ้อนกว่าทั้งในห้องทดลองและในธรรมชาติ จำเป็นต้องมีการทดลองมากกว่าหนึ่งการทดลอง อย่างไรก็ตามวิธีที่มีข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการวิจัยสิ่งแวดล้อมตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดลองพอสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

(1) ตัดสินใจเกี่ยวกับวัตถุประสงค์และสมมติฐานการทดลองให้แน่นอนและชัดเจน

(2) ตัดสินใจเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม

(3) ตัดสินใจเกี่ยวกับขั้นตอนและขบวนการทดลอง

(4) ตัดสินใจว่าต้องการทราบข้อมูลใดจากสิ่งทดลอง

(5) ตัดสินใจว่าตัวแปรใดของสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญมากกว่ากัน

(6) เนื่องจากเป็นไปได้ที่จะวัดตัวแปรสิ่งแวดล้อมทั้งหมด ดังนั้น ควรตัดสินใจว่าจะวัดตัวแปรใด สามารถวัดตัวแปรนั้นได้โดยตรงเพียงใด อุปกรณ์ที่จะใช้วัดโดยตรงเชื่อถือได้เพียงใด การทำงานของอุปกรณ์อาศัยพลังงานชนิดใด มีวิธีการป้องกันความผิดพลาดในการวัดตัวแปรอย่างไร

(7) ตัดสินใจเลือกสถานที่ทำการทดลอง

(8) ถ้าการศึกษาเป็นการศึกษาสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันมากขึ้นหรือน้อยลงโดยความแตกต่างเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปที่เรียกว่า gradient ควรตัดสินใจเลือกจำนวนจุด (stations) ที่จะวัดภายในพื้นที่ที่เลือกหรือสุ่มเลือกไว้ จำนวนจุดที่จะวัดนี้ควรมีน้อยที่สุดแต่ให้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของสิ่งที่จะศึกษาได้มากที่สุด อาจตัดสินใจได้โดยดูค่าสิ่งแวดล้อมที่จะวัดว่ามีค่าสูงสุดและต่ำสุดเท่าใด (environmental extremes)

(9) วางแผนและตัดสินใจเรื่องช่วงเวลา (time interval) ที่จะวัดตัวแปร ถ้าการวัดตัวแปรไม่จำเป็นต้องทำติดต่อกัน (discontinuous) ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการวัดแต่ละครั้งจำเป็นต้องคิดและวางแผนล่วงหน้า

(10) ตัดสินใจในเรื่องวิธีการประเมินตัวเลขข้อมูลโดยหลักสถิติ ข้อนี้ขึ้นอยู่กับแผนการทดลองที่ใช้

นอกจากข้อพึงสังวรเกี่ยวกับการวางแผนการทดลองเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีความจริงที่นักวิจัยสิ่งแวดล้อมที่ฝรั่งเรียกว่า axioms for environmental research ที่นักวิจัยควรระลึกไว้อยู่เสมอ คือ

(1) สิ่งแวดล้อมที่จุดใดจุดหนึ่งในพื้นที่การทดลองเป็นผลรวมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสิ่งแวดล้อมนั้น

(2) ปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลายปัจจัยเกิดร่วมกันโดยมีปฏิกริยาร่วมกัน

(3) ปัจจัยสิ่งแวดล้อมบางปัจจัยทำหน้าที่เป็นปัจจัยจำกัดหรือปัจจัยชดเชยหรือปัจจัยที่ทำให้เกิดผลติดตาม ปัจจัยหนึ่งอาจทำหน้าที่ดังกล่าวหรืออาจร่วมกับปัจจัยอื่นทำหน้าที่ดังกล่าว

(4) ปัจจัยสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งในด้านเวลาและสถานที่

(5) จุดสำคัญของการวิจัยสิ่งแวดล้อมอยู่ที่สิ่งทดลองหรือหน่วยทดลอง ไม่ใช่สิ่งแวดล้อม

(6) ตัวเลขข้อมูลที่ได้ในห้องที่หนึ่งไม่สามารถนำไปใช้อ้างหรืออธิบายสิ่งทดลองที่อยู่ไกลจากที่เดิม 50-60 กิโลเมตรได้โดยตรง

(7) สิ่งแวดล้อมมีมิติในเรื่องของเวลาและที่ (time and space)

(8) ตัวเลขข้อมูลที่ระดับเหนือดินระดับหนึ่งอาจใช้ไม่ได้สำหรับอีกระดับที่สูงกว่าหรือต่ำกว่า

(9) ผลของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อสิ่งทดลองควรรีใช้อ้างถึงในระดับ Population

(10) ตัวเลขที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการจะนำไปใช้โดยตรงกับสภาพธรรมชาติไม่ได้

(11) ควรพิจารณาสีงแวดล้อมทุกปัจจัยแม้ว่าไม่ได้วัดหรือศึกษาทุกปัจจัย

(12) ข้อสรุปและสหพันธ์ไม่ควรเกินขอบเขตของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

แม้ว่าเนื้อหาเกี่ยวกับวิธีของวิทยาศาสตร์ แผนการทดลอง ชนิดของการทดลอง และข้อควรตระหนักในการวิจัยสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาจะไม่ครอบคลุมปัญหาที่จะพบในการ

ศึกษาสาขานี้ทั้งหมด เชื่อว่าวิธีและแนวทางในการคิดที่กล่าวมาเพียงพอที่จะให้นักศึกษานำไปใช้ในการทดลองจริงได้ อย่างไรก็ตามข้อผิดพลาดในการทดลองอีกหลายข้อจะเรียนรู้ได้โดยประสบการณ์ซึ่งไม่มีในตำราและอาจพบเฉพาะในการทดลองนั้นเท่านั้น

สรุป

การค้นหาคำความรู้ของมนุษย์มีหลายวิธีตั้งแต่การยึดมั่นถือมั่น การอ้างถึง การสังหรณ์ใจ และวิธีการทางวิทยาศาสตร์ วิธีการทางวิทยาศาสตร์เป็นวิธีการหาคำตอบของปัญหาต่าง ๆ ด้วยการทดลองพิสูจน์ ปัจจุบันวิธีการนี้เป็นแนวทางในการวิจัยปัญหาต่าง ๆ ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ อย่างไรก็ตามผลการทดลองทางวิทยาศาสตร์ไม่สามารถจะเอาชนะวัฒนธรรมของมนุษย์ได้เสมอไป อำนาจการเมือง และความมีชื่อเสียงของบุคคลมีอิทธิพลต่อการยอมรับผลการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่เกิดจากหลายสาเหตุ และแต่ละสาเหตุต่างก็สัมพันธ์กันทั้งยังสัมพันธ์กับปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สาเหตุอีก ปกติการทดลองมักศึกษาแต่ละสาเหตุแยกกันทีละหนึ่งหรือสองสาเหตุ ไม่สามารถศึกษาตัวแปรทั้งหมดได้ในเวลาเดียวกัน การใช้ทฤษฎีอธิบายปัญหาเพียงทฤษฎีเดียวก็ไม่เหมาะกับปัญหาที่ซับซ้อน เหล่านี้เป็นข้อเสียของวิธีการทางวิทยาศาสตร์ การศึกษาหาคำรู้ด้วยวิธีการทางวิทยาศาสตร์ จำเป็นต้องมีการวางแผนการทดลอง ควรเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมกับปัญหาที่ศึกษา และที่แน่นอนคือผู้ทดลองต้องมีความรู้เรื่องสิ่งที่จะทดลองดี ตลอดจันต้องมีความรู้ทางสถิติเพื่อที่จะใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามข้อผิดพลาดและข้อควรระวังหลายอย่างเป็นสิ่งที่เรียนรู้ได้จากประสบการณ์

คำถาม

1. ทำไมนักวิทยาศาสตร์จึงต้องศึกษาวิจัยกันอยู่ตลอดเวลา ชั้นตอนในการศึกษา โดยวิธีการทางวิทยาศาสตร์มีอะไรบ้าง
2. ในแง่ของการแสวงหาความรู้ ท่านคิดว่าบุคคลเหล่านี้แสวงหาความรู้อย่างไร ผู้ก่อการร้ายคอมมิวนิสต์ นักบวช เม้าเซตุง เซลส์แมน นักศึกษา
3. ถ้าท่านคิดจะวิจัยเรื่องมลภาวะในมหาวิทยาลัย ท่านจะเลือกศึกษาเรื่องใด จะตั้งสมมุติฐานและวางแผนการทดลองอย่างไร
4. นักศึกษารุ่นน้องท่านลงทะเลเบียนกระบวนวิชาปัญหาพิเศษทางชีววิทยา ท่านคิดว่ามีอะไรจะเสนอแนะเขาในฐานะนักศึกษารุ่นพี่ที่มีประสบการณ์ เรื่องนี้มาแล้ว

บรรณานุกรมและเชิงอรรถ

- Platt, R.B. 1963. Axioms for biometeorological research. *Phytopathology* 53 : 1198-1 199.
- Platt, R.B., and J.F. Griffiths. 1972. *Environmental measurement and interpretation*. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York.
- Scheffler, W.C. 1969. *Statistics for the biological sciences*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- Senders, V.L. 1958. *Measurement and statistics*. Oxford University Press, New York.
- Solbrig, O.T., and D.J. Solbrig. 1979. *Population biology and evolution*, Addison-Wesley Publishing Company, Menlo Park, California.
- Stevens, S.S. 1968. Measurement, statistics, and the schemapiric view. *Science* 161 : 849-856.
- Zar, J.H. 1974. *Biostatistical analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, New Jersey.