# บทที่ 2

## วิธีการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการพัฒนาแหล่งน้ำ

(Simulation Methods In Water Resources Development)

### 2.1 บทนำ

เนื่องจากการทำวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในขั้นแรกที่จะทำความเข้าใจในหลักการของเทคนิคการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วจึงจะทำการประยุกต์เอาเทคนิคนี้มาใช้ในการศึกษากับระบบแหล่งน้ำที่เป็นจริงของอ่างเก็บน้ำสิรินธร ดังนั้นเพื่อสร้างความเข้าใจในหลักการของเทคนิคดังกล่าว ในบทนี้จึงจะเสนอเรื่องราวโดยสังเขปของการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (simulation) และโดยเฉพาะเรื่องที่เกี่ยวกับการพัฒนาแหล่งน้ำ ซึ่งจะมีเนื้อหาสาระต่าง ๆ เกี่ยวกับประวัติความเป็นมา หลักการทั่ว ๆ ไป องค์ประกอบต่าง ๆ ขั้นตอนการสร้างหรือพัฒนาและลักษณะการนำไปใช้งานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเนื้อหาสาระส่วนใหญ่ที่จะกล่าวถึงนั้นได้มาจากหนังสือรายงานเรื่อง "Simulation Methods In Water Development ของ FAO, 1974" [4] และจากหนังสือเรื่อง "Simulation Techniques for Design of Water-Resource Systems โดย Hufschmidt และ Fiering" [1] นอกจากนี้ในตอนท้ายของบทได้แสดงตัวอย่างของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำต่าง ๆ ภายในประเทศที่ได้ใช้เทคนิคการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วย

### 2.2 ความเป็นมาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แต่เดิมนั้นก่อนที่จะมีการศึกษาแบบวิเคราะห์ระบบ วิธีการศึกษาค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์มีวิวัฒนาการขึ้นมาจากการมุ่งความสนใจลงไปบนปัญหาในลักษณะที่จำเพาะเจาะจง โดยการแยกปัญหานั้นออกมาจากสิ่งเกี่ยวข้องต่าง ๆ ที่แวดล้อมอยู่ ต่อมาแม้จะมีวิศวกรรมแผนใหม่แต่ก็ได้เจริญวัฒนาขึ้นมาบนพื้นฐานของวิธีการดั้งเดิมนี้ จนกระทั่งไม่กี่ปีมานี้ได้เริ่มมีการยอมรับกันมากขึ้นว่ามีอยู่หลาย ๆ ปัญหาที่มนุษย์ต้องการเทคนิคสักอย่างหนึ่งที่จะนำมาใช้วิเคราะห์แนวทางเผื่อเลือก (an alternative analytical technique) เทคนิคที่จะเอื้ออำนวยให้สามารถพิจารณาทุก ๆ ส่วนประกอบของปัญหาและความสัมพันธ์ระหว่างกันของปัญหาต่าง ๆ ในหลายมิติหรือหลายรูปแบบ

(multidimensional interactions) ที่มีอยู่สภาพแวดล้อมนั้น หรือในขอบเขต (boundary) ของการพิจารณานั้น จึงทำให้เกิดทัศนะเกี่ยวกับระบบขึ้นและมีการพัฒนากรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว ทำให้เกิดแขนงวิชาใหม่ขึ้นมาเรียกว่า วิศวกรรมระบบ(systems engineering) ซึ่ง Hall และ Dracup, 1970 (4) ได้กล่าวถึงวิชาวิศวกรรมระบบไว้ว่า เป็นวิชาที่เข้าไปเกี่ยวข้องกับเรื่องของการตัดสินใจ จากการพิจารณาระบบในแง่มุมต่าง ๆ จากขนาดของการควบคุม (degree of control) เพื่อที่จะให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

เทคนิคที่ใช้อย่างกว้างขวางในวิศวกรรมระบบอันหนึ่งก็คือ เทคนิคการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (simulation) ถ้าพิจารณาจากทัศนะของการจัดการด้านแหล่งน้ำ เทคนิคการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะหมายถึงกรรมวิธีในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของระบบแหล่งน้ำใด ๆ ที่ประกอบไปด้วยโครงการต่าง ๆ และศึกษาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตัวกำหนดต่าง ๆ (parameters) เช่น ความจุของอ่างเก็บน้ำ ขนาดของทางน้ำล้นหรือขนาดของพื้นที่เพาะปลูกเป็นต้น โดยมีข้อมูลหรือสิ่งที่ป้อนเข้าได้แก่ ปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น

ทัศนะของระบบไม่ใช่ของใหม่ วิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ไม่ใช่แนวความคิดที่เกิดขึ้นใหม่ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ วิธีการศึกษาเมื่อมีปริมาณน้ำหลากไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแห่งหนึ่งและถูกระบายผ่านออกไปทางท้ายน้ำ (วิธี Flood routing) แล้วทำการทำนายหาอัตราการลดลงของยอดน้ำหลากนั้น เป็นตัวอย่างของวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง ที่มีมาเนิ่นนานและรู้จักกันดีในวิชาของอุทกวิทยาประยุกต์ ความแปลกใหม่ของการจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ที่ความพยายามที่จะนำเทคนิคนี้ไปทดแทนพฤติกรรมอันสลับซับซ้อนในระบบแหล่งน้ำ ประวัติความเป็นมาในตอนต้น ๆ ของการนำวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้กับงานพัฒนาแหล่งน้ำมีขึ้นเมื่อประมาณ 30 ปีมาแล้ว ซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้เคียงกับการประดิษฐ์เครื่องคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้งานได้สำเร็จ โดยในปี ค.ศ. 1953 โดยหน่วยราชการในสหรัฐอเมริกา คือ U.S. Army Corps of Engineers ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการศึกษาโครงการแม่น้ำมิสซูรี่ และในปี ค.ศ. 1955 วิศวกรชาวอังกฤษ 2 คน คือ Morrice และ Allan ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาลุ่มแม่น้ำไนล์ เพื่อหาลักษณะของโครงการที่จะให้ประโยชน์มากที่สุดจากการใช้น้ำเพื่อการชลประทาน ต่อจากนั้นมาก็ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์อย่างกว้างขวางและแพร่หลาย

ในที่นี้ใคร่จะขอเน้นว่า เทคนิคของการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานพัฒนาแหล่งน้ำนั้นจำเป็นอย่างยิ่งต้องอาศัยเครื่องคำนวณที่มีประสิทธิภาพ ยิ่งงานนั้นเกี่ยวกับระบบที่ใหญ่และสลับซับซ้อนมากหรือต้องการความละเอียดถี่ถ้วนในการศึกษามากยิ่งต้องการเครื่องคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นและมีหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้นไปด้วย จึงกล่าวได้ว่า วิวัฒนาการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นควบคู่มากับวิวัฒนาการของเครื่องคำนวณไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง ยิ่งในขณะที่ความก้าวหน้าทางอีเลคโทรนิคส์รุดหน้าอย่างรวดเร็วเช่นที่ผ่านมานี้ ทำให้สามารถเปลี่ยนวงจรที่ใช้หลอดสูญญากาศในยุคแรกมาเป็นวงจรที่ประกอบด้วยหลอดทรานซิสเตอร์และมาเป็นวงจรแบบรวม (Integrated Circuit) จนกระทั่งเป็นวงจรขนาดจิ๋วที่เรียกว่าไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocesser) ทำให้มีเครื่องคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูงใช้แพร่หลายในปัจจุบันและนั่นคือ ขีดความสามารถของการใช้เทคนิคการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากมาย

ในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาปัญหาการพัฒนาแหล่งน้ำในโครงการต่าง ๆ มากมาย โดยจะแสดงอยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (computer program) โปรแกรมดังกล่าวมีทั้งที่เขียนขึ้นเพื่อศึกษาเฉพาะโครงการและโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้งานทั่วไป เช่น ชุดโปรแกรม SSARR และชุดโปรแกรม HEC เป็นต้น ความนิยมในเทคนิคการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวางแผนพัฒนาแหล่งน้ำมีสูงมากในปัจจุบันจนอาจกล่าวได้ว่า การศึกษาการพัฒนาแหล่งน้ำในประเทศในขนาดของโครงการขนาดใหญ่แทบทุกโครงการได้ใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ปัญหาตลอดจนวางแผนงานทั้งสิ้น

## 2.3 หลักการเบื้องต้น (Basic Concepts)

เนื่องจากเรื่องของการจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวข้องกับเรื่องของระบบ (system) และการวิเคราะห์ระบบ (systems analysis) ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจถึงเรื่องระบบและการวิเคราะห์ระบบเสียก่อนอื่น ถ้าหากจะสังเกตหรือพิจารณาแล้วจะเห็นว่า เรื่องเกี่ยวกับระบบนั้นเป็นสิ่งที่ได้พบเห็นกันอยู่เสมอในชีวิตประจำวัน ระบบก็คือการประกอบกันขึ้นมาของส่วนต่าง ๆ

ที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันรวมกันขึ้นเป็นสิ่งเดียว ตัวอย่างเช่น ระบบต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น ระบบหมุนเวียนของโลหิต ระบบการย่อยอาหารหรือระบบประสาท ระบบนิเวศน์ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ กับสภาพแวดล้อม ระบบอุทกวิทยาและอื่น ๆ ระบบเหล่านี้เป็นระบบที่มีอยู่ในธรรมชาติ ระบบที่มนุษย์สร้างขึ้นมาก็มี เช่น ระบบการขนส่ง ระบบการสื่อสาร ระบบการจ่ายไฟฟ้า ระบบประปาและระบบการพัฒนาแหล่งน้ำ เป็นต้น สำหรับระบบการพัฒนาแหล่งน้ำนั้น ในการศึกษานี้จะหมายถึงระบบที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เพื่อสนองความต้องการใช้น้ำในด้านต่าง ๆ ของมนุษย์ ระบบการพัฒนาแหล่งน้ำจึงมีได้ทั้งในรูปแบบที่ง่าย ๆ ธรรมดา โดยการขุดคลอง เพื่อนำน้ำจากแม่น้ำไปใช้ทำการเพาะปลูกหรืออาจเป็นในรูปแบบที่สลับซับซ้อนขึ้นมา ระบบนั้นก็จะประกอบด้วยส่วนประกอบจำนวนมาก เช่น อ่างเก็บน้ำ อุโมงค์ผันน้ำและเขื่อนทดน้ำจำนวนหลาย ๆ แห่ง เพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์การใช้น้ำหลาย ๆ แบบ เช่นการผลิตไฟฟ้า การคมนาคม การอุปโภค-บริโภค การเพาะปลูก การควบคุมคุณภาพน้ำ การควบคุมอุทกภัย และอื่น ๆ ดร. สุรวุฒิ ประดิษฐานนท์ (2524) ได้กล่าวเกี่ยวกับระบบไว้ในบทความเรื่องการจำลองสภาพในการวางแผนพัฒนาทรัพยากรแหล่งน้ำ [2] ไว้ว่า สิ่งสำคัญของระบบใด ๆ ก็คือส่วนประกอบของระบบและความสัมพันธ์ที่มีต่อกัน ซึ่งถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นกับส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบจะยังผลสะท้อนไปถึงส่วนอื่น ๆ เป็นเหตุให้ระบบต้องปรับตัวให้เกิดสมดุลย์ใหม่ขึ้น

เมื่อได้ทราบเกี่ยวกับระบบบ้างแล้ว ต่อไปจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ระบบบ้าง ซึ่ง ดร. สุรวุฒิ ประดิษฐานนท์ [2] ก็ได้กล่าวไว้ว่า การวิเคราะห์ระบบหมายถึง ความเข้าใจถึงลักษณะขององค์ประกอบของระบบและความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเหล่านี้ที่รวมกันขึ้นเป็นระบบ ความเข้าใจถึงการปฏิบัติงานของระบบ ทำให้เราสามารถทำนายผลที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่มีต่อระบบได้ และ Beard (1973) [4] ได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ระบบไว้ว่า เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การปรับปรุง เปลี่ยนแปลง คุณลักษณะต่าง ๆ ของระบบในวิถีทางที่จะให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากระบบนั้น

การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ระบบในลักษณะของเครื่องมือชิ้นหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเข้าไปช่วยแก้ปัญหาในการเลือก

รูปแบบของระบบที่ดีที่สุดจากรูปแบบของระบบที่เป็นไปได้หลาย ๆ รูปแบบ ถ้าหากว่าเรามีข้อมูล (ในรูปตัวเลข) ขององค์ประกอบและความสัมพันธ์ต่าง ๆ อย่างเพียงพอที่จะนำมาสร้างขึ้นเป็นแบบจำลองของระบบได้แล้ว เราจะสามารถทำการทดสอบรูปแบบที่เป็นไปได้ต่าง ๆ จนกระทั่งพบรูปแบบหนึ่งที่ทำให้ได้ผลออกมาใกล้เคียงกับเป้าหมาย (goal) ที่ตั้งไว้ที่สุด หรือให้ผลตอบแทนสูงที่สุดตามแต่กฎเกณฑ์ (criteria) ที่ตั้งไว้ (4)

เมื่อได้ทราบทัศนะเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้แล้ว ต่อไปจะได้กล่าวลงในรายละเอียดถึงความหมายของการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (simulation) จะหมายถึงการจำลองโดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมา เพื่อเป็นตัวแทนของลำดับเหตุการณ์อันอาจเกิดขึ้นได้ในสภาพที่เป็นจริง และเพื่อให้ถูกต้องชัดเจนยิ่งขึ้นอาจเรียกว่าเป็นการจำลองตามลำดับเหตุการณ์ด้วยคณิตศาสตร์ (numerical sequential simulation) เหตุที่ต้องระบุว่าเป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพราะว่ายังมีการจำลองสภาพในรูปแบบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การจำลองทางกายภาพ (physical model) ของการศึกษาทางชลศาสตร์ (Hydraulics) เป็นต้น และที่ต้องระบุว่าเป็นตามลำดับของเหตุการณ์ เพราะว่าองค์ประกอบสำคัญในการศึกษาทางด้านอุทกวิทยานั้น ผันแปรไปตามเวลา เพราะฉะนั้น การจำลองของระบบในการศึกษานี้จึงจำเป็นต้องมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยการใช้ข้อมูลทางอุทกวิทยาที่ได้จากการวัดหรือการสำรวจจริงอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ หรืออาจใช้ข้อมูลที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา (synthetic inputs) โดยกรรมวิธีต่าง ๆ ที่สามารถเชื่อถือได้ (4)

เมื่อทราบความหมายของการจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว ลำดับต่อไปจึงควรจะกล่าวถึงกรรมวิธีการสร้างหรือพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใช้งาน สิ่งที่ควรทราบคือในแบบจำลองของระบบจะประกอบขึ้นมาด้วยอะไรบ้าง และข้อมูลที่จะใช้ป้อนเข้าสู่แบบจำลองมีลักษณะอย่างไร ซึ่งเรื่องต่าง ๆ เหล่านี้จะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

2.4 องค์ประกอบของระบบในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Elements of a Simulation Study)

Fiering, Harrington และ de Lucia, 1971[4] ได้จำแนกองค์ประกอบของระบบออกเป็น 4 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนประกอบ (components) ความสัมพันธ์ (relationships) ตัวแปร (variables) และช่วงเวลา (time interval) ซึ่งแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 ส่วนประกอบ (components)

ส่วนประกอบของแบบจำลองจะหมายถึง อาคารหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ตัวอย่างเช่น ตัวเขื่อน อุโมงค์ผันน้ำ ทางน้ำล้น โรงสูบน้ำ คลองส่งน้ำ และอื่น ๆ

2.4.2 ความสัมพันธ์ ( relationships)

ความสัมพันธ์ที่กล่าวถึงในที่นี้หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างกันในรูปแบบต่าง ๆ ภายในระบบ ซึ่งแสดงลักษณะพฤติกรรมของแต่ละส่วนประกอบของระบบ รูปแบบของความสัมพันธ์มีอยู่หลายรูปแบบ แต่ที่สำคัญคือ ความสัมพันธ์ในรูปแบบของวิธีดำเนินการ (operating procedure) ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้จะต้องถูกกำหนดออกมาเป็นขนาดและถือเป็นตัวแปรหนึ่งซึ่งผู้วางแผนสามารถควบคุมได้ ลักษณะของความสัมพันธ์ในรูปแบบของวิธีดำเนินการสามารถจินตนาการจากการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำให้สอดคล้องกับความต้องการต่าง ๆ ด้านท้ายน้ำและขณะเดียวกันก็ต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่จะต้องคงไว้ในอ่างเก็บน้ำ ดังนั้นวิธีการดำเนินการจะต้องคำนึงถึงความผันแปรต่าง ๆ ที่มีในแต่ละฤดูกาลและรวมถึงการให้ลำดับความสำคัญของแต่ละวัตถุประสงค์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ด้วย เมื่อเกิดการขัดแย้งกันในการใช้น้ำขึ้น

2.4.3 ตัวแปร (variables)

ตัวแปรในระบบอาจแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ ตัวแปรสภาวะของระบบ (state variables) ตัวแปรกำหนด (model parameters) และตัวแปรผลลัพธ์ที่ออกมา (output variables) ซึ่งสรุปได้ดังนี้

010601

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. ตัวแปรสภาวะของระบบ (state variables)

ตัวแปรสภาวะของระบบเป็นตัวแปรต่าง ๆ ที่บ่งชี้สภาวะการณ์ของส่วนประกอบต่าง ๆ ตัวแปรนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างที่ดำเนินการศึกษา ตัวอย่างของตัวแปรประเภทนี้ได้แก่ ระดับน้ำและปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำ หัวน้ำ (head) ของเครื่องผลิตไฟฟ้าหรือปริมาณความชื้นในดินของพื้นที่ชลประทาน เป็นต้น

2. ตัวแปรสิ่งที่เข้าระบบ (model input variables)

ตัวแปรชนิดนี้ยังจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ประเภทหนึ่งเป็นตัวแปรที่มีลักษณะทางกายภาพ (physical inputs) ของระบบที่เป็นจริงตามธรรมชาติและเป็นตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ ตัวอย่างเช่น ปริมาณน้ำท่าตามธรรมชาติ ปรากฏการณ์ทางอุตุนิยมวิทยา ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำฝนและการระเหย เป็นต้น ตัวแปรอีกประการหนึ่งจะไม่มีลักษณะทางกายภาพ (exogenous variables) เป็นตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นต่างหากในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายพฤติกรรมหรือสภาพซึ่งผู้วางแผนไม่สามารถเข้าไปมีอิทธิพลได้โดยตรง ตัวอย่างเช่น นโยบายทางการเมือง กฎหมายหรือข้อบังคับต่าง ๆ ในสังคมที่กำหนดการใช้น้ำอย่างไม่ถูกต้อง การผันน้ำเข้าหรือออกจากลุ่มน้ำ หรือปริมาณของเสียที่ปล่อยลงน้ำ เป็นต้น

3. ตัวแปรกำหนด (model parameters)

ตัวแปรกำหนดหมายถึง คุณลักษณะหรือคุณสมบัติของระบบที่สามารถแสดงหรือกำหนดได้อย่างชัดเจนและจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณแต่ละครั้ง ตัวแปรกำหนดเป็นตัวแปรในทัศนะที่ว่า ค่าของตัวกำหนดนั้นอาจเปลี่ยนแปลงได้โดยผู้ควบคุมการทำงานของแบบจำลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการณ์ต่าง ๆ แต่เมื่อได้เลือกค่าตัวกำหนดใด ๆ ขึ้นแล้วก็จะใช้ค่านั้นตลอดการคำนวณของกรณีนั้น ๆ ตัวอย่างของตัวกำหนดได้แก่ ความจุของอ่างเก็บน้ำ ตัวแปรบ่งสภาพหรือลักษณะของลำน้ำ ขนาดของคลองส่งน้ำ เป็นต้น

ตัวกำหนดอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ตัวกำหนดที่รู้ค่าแน่นอน (design parameters or decision variables) ตัวกำหนดชนิดนี้เป็นตัวแปรซึ่งแสดง

ให้เห็นการออกแบบของระบบ และผู้วางแผนสามารถที่จะควบคุมค่าของตัวแปรเหล่านี้ได้ ตัวอย่างของตัวแปรชนิดนี้ได้แก่ ความจุของอ่างเก็บน้ำ จำนวนหน่วยของโครงการเอนกประสงค์ ขนาดของพื้นที่ชลประทาน เป็นต้น ตัวกำหนดอีกชนิดหนึ่งคือ ตัวกำหนดที่ไม่รู้ค่าแน่นอน (exogenous parameters) ตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การสูญเสียน้ำจากการซึมของอ่างเก็บน้ำหรือคลองส่งน้ำ ประสิทธิภาพของระบบชลประทาน เป็นต้น ตัวกำหนดชนิดนี้ไม่อาจกำหนดได้แน่นอนในช่วงเวลาที่ออกแบบหรือทำการศึกษาแบบจำลอง แต่สามารถคาดหมายค่าของตัวกำหนดชนิดนี้ว่าควรจะอยู่ระหว่างค่า (range) เท่าไร ถ้าหากทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวกำหนดต่าง ๆ เหล่านี้แล้วสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากระบบ วิธีการนี้ช่วยให้ตรวจสอบความผิดพลาดจากการสมมติค่าตัวแปรชนิดนี้ได้และทำให้ทราบว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลมากหรือน้อยกับระบบอย่างไร วิธีการนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis)

4. ตัวแปรผลลัพธ์ที่ออกมา (model output variables)

เมื่อเราป้อนข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองใด ๆ แบบจำลองนั้นก็จะตอบสนองด้วยการให้ผลลัพธ์ออกมา ผลลัพธ์ที่ได้ออกมานี้ถือเป็นตัวแปรอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งอาจแสดงออกมาเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ปริมาณน้ำล้นหรือปริมาณน้ำที่ขาดแคลน เป็นต้น และอาจแสดงเป็นผลทางเศรษฐกิจก็ได้ เช่น ผลประโยชน์ตอบแทนหรือผลผลิตในแต่ละปี

### 2.4.4 ช่วงเวลา (Time interval)

องค์ประกอบตัวสุดท้ายที่แสดงลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษา ในการเลือกค่าช่วงเวลานั้นต้องพิจารณาเช่นกันจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ประการแรกคือ ความต้องการที่จะแทนพฤติกรรมที่เป็นจริงให้ใกล้เคียงเพียงใด ถ้าหากต้องการให้ใกล้เคียงมาก ช่วงเวลาที่ใช้ก็ต้องสั้นมากอาจเป็นรายวันหรือรายชั่วโมง ประการที่สองคือ ค่าใช้จ่ายในการใช้เวลาจากเครื่องคำนวณ ประการที่สามคือ วัตถุประสงค์ของการศึกษา และประการสุดท้ายคือ ความเหมาะสมของข้อมูลที่มีอยู่ เมื่อพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ นี้แล้ว จึงเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษา โดยทั่วไปในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการพัฒนาแหล่งน้ำมักจะใช้ช่วงเวลา 1 เดือน แต่ทั้งนี้อาจใช้สัปดาห์ วัน หรือช่วงเวลาที่น้อยกว่าก็ได้ตามวัตถุประสงค์และลักษณะปัญหาของการศึกษา

## 2.5 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Inputs for Simulation Studies)

ข้อมูลที่จะนำมาป้อนเข้าสู่แบบจำลองนั้น มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ในสภาพที่เป็นจริงตามธรรมชาตินั้น ข้อมูลที่จะนำมาใช้ โดยปกติมักจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ปริมาณน้ำที่ไหลในลำน้ำหรือค่าของอุณหภูมิ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการศึกษากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะต้องจัดแจงข้อมูลที่จะใช้ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ได้สะดวก ซึ่งก็จะปรากฏในรูปของชุดข้อมูลที่แบ่งเป็นช่วงเวลา เช่น สถิติน้ำท่ารายเดือน รายวันหรือรายชั่วโมง สถิติน้ำฝนรายวัน สถิติอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันหรือสถิติการใช้น้ำเฉลี่ยรายวัน เป็นต้น ลักษณะของข้อมูลแต่ละชุดดังกล่าวนี้แสดงออกเป็นความสัมพันธ์อันต่อเนื่อง (serial correlation) เมื่อพิจารณาชุดข้อมูลทางอุทกวิทยาของท้องที่แห่งหนึ่ง ก็จะพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลด้วยกัน (cross-correlation) เช่น ปริมาณการตกของฝน (ชุดข้อมูลน้ำฝน) ก็น่าจะมีความเกี่ยวพันกับปริมาณน้ำที่ไหลในลำน้ำ (ชุดข้อมูลน้ำท่า) ช่วงเวลาที่มีความต้องการน้ำสูงมักจะเกี่ยวพันกับช่วงเวลาที่อากาศมีอุณหภูมิสูงและอัตราการระเหยสูง เป็นต้น

ชุดของข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการศึกษาแบบจำลอง ควรจะมีความยาวของระยะเวลาที่ทำการวัดข้อมูลพอสมควร โดยปกติควรมีความยาวเท่ากับอายุของโครงการที่จะทำการศึกษา แต่ในสภาพความเป็นจริงนั้นเป็นการยากที่จะมีชุดข้อมูลต่างๆ ที่มีความยาวตามที่ต้องการได้ และดูเหมือนว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันซับซ้อนขึ้นมาเพื่อศึกษาระบบใด ๆ ที่มีชุดข้อมูลที่สั้นมากจะเป็นการไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการสำหรับขยายความยาวของชุดข้อมูลหรือสังเคราะห์ชุดข้อมูลขึ้นมาใหม่ วิธีการดังกล่าวมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีทางคณิตศาสตร์ที่มีความแน่นอน (Deterministic) และวิธีคาดคะเนทางสถิติ (Stochastic)

ชุดข้อมูลทางอุทกวิทยาที่จัดหามาเพื่อจะนำมาเป็นข้อมูลใช้กับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ควรจะต้องเป็นข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำตามสภาพที่เกิดขึ้นจริง และต้องมีความยาวของชุดข้อมูลเพียงพอ ซึ่งสิ่งนี้ถ้าหากพิจารณาในทางปฏิบัติแล้วมักเป็นไปได้ยาก จึงมักจะมีปัญหาข้อมูลไม่เพียงพอหรือไม่ดีพอ หรือมีไม่ครบถ้วนเสมอ ๆ ดังนั้นประเด็นการทำงานจึงอยู่ที่วิธีการที่จะนำมาใช้ เพื่อให้สามารถทำในสิ่งที่ดีที่สุดที่จะทำได้ ด้วยข้อมูลที่มีอยู่นั้น ซึ่งหากพิจารณาแล้วการตัดสินใจในงานวางแผนพัฒนาแหล่งน้ำนั้นอาจทำขึ้นได้โดยไม่คำนึงถึงคุณภาพของข้อมูลที่มี

อยู่เท่าไรนัก ด้วยการพิจารณาจากแนวทางเลือกต่าง ๆ ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ จากการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลที่มีอยู่นั่นเอง เพราะฉะนั้นถึงแม้ว่าการทำงานจะขาดแคลนชุดข้อมูลที่เหมาะสมเพียงพอก็ตาม แต่ด้วยวิธีการเปรียบเทียบทางเลือกต่าง ๆ ที่ได้จากการพิจารณาใช้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (objective function) ที่เหมาะสมก็จะเป็นการลดบทบาทความสำคัญของเรื่องข้อมูลลงไปได้มาก อย่างไรก็ตาม เมื่อต้องการที่จะประเมินวัดผลที่เกิดขึ้นจากระบบให้ถูกต้องสมบูรณ์แล้ว ก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาคุณภาพของข้อมูลที่จะใช้ให้มีความถูกต้องอย่างพิถีพิถัน

เมื่อได้ทราบลักษณะของข้อมูลที่จะใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์และองค์ประกอบต่าง ๆ ในการจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว ต่อไปจะได้กล่าวถึงลำดับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งาน

**2.6** <u>ลำดับการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแหล่งน้ำ</u> (Organizing for Simulation of a Water-Resource System)

โดยทั่วไปอาจกำหนดลำดับการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแหล่งน้ำได้ดังต่อไปนี้

<u>ลำดับที่ 1</u> เป็นขั้นตอนการนิยามระบบ กำหนดเค้าโครงและขอบเขตของระบบรวมทั้งโครงข่ายความสัมพันธ์ของแหล่งน้ำ จุดที่ต้องการน้ำ และจุดควบคุมน้ำ การทำงานในลำดับนี้ได้แก่ การแสดงระบบออกมาให้เห็นชัดเจนในรูปของแผนที่หรือแผนผัง (Schematic)

<u>ลำดับที่ 2</u> เป็นขั้นตอนการนำข้อมูลทางอุทกวิทยามาจัดแจงให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป รวมทั้งการสังเคราะห์ข้อมูลขึ้นมาด้วย

<u>ลำดับที่ 3</u> เป็นขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ ภายในระบบ

<u>ลำดับที่ 4</u> เป็นขั้นตอนการกำหนดวิธีการดำเนินการสำหรับระบบที่ทำการศึกษา (establishing operating procedure for the system)

<u>ลำดับที่ 5</u> ประเมินราคาค่าลงทุนและผลตอบแทนที่ได้จากการกำหนดค่าตัวแปรและผลที่ออกมาของกรณีต่าง ๆ และ

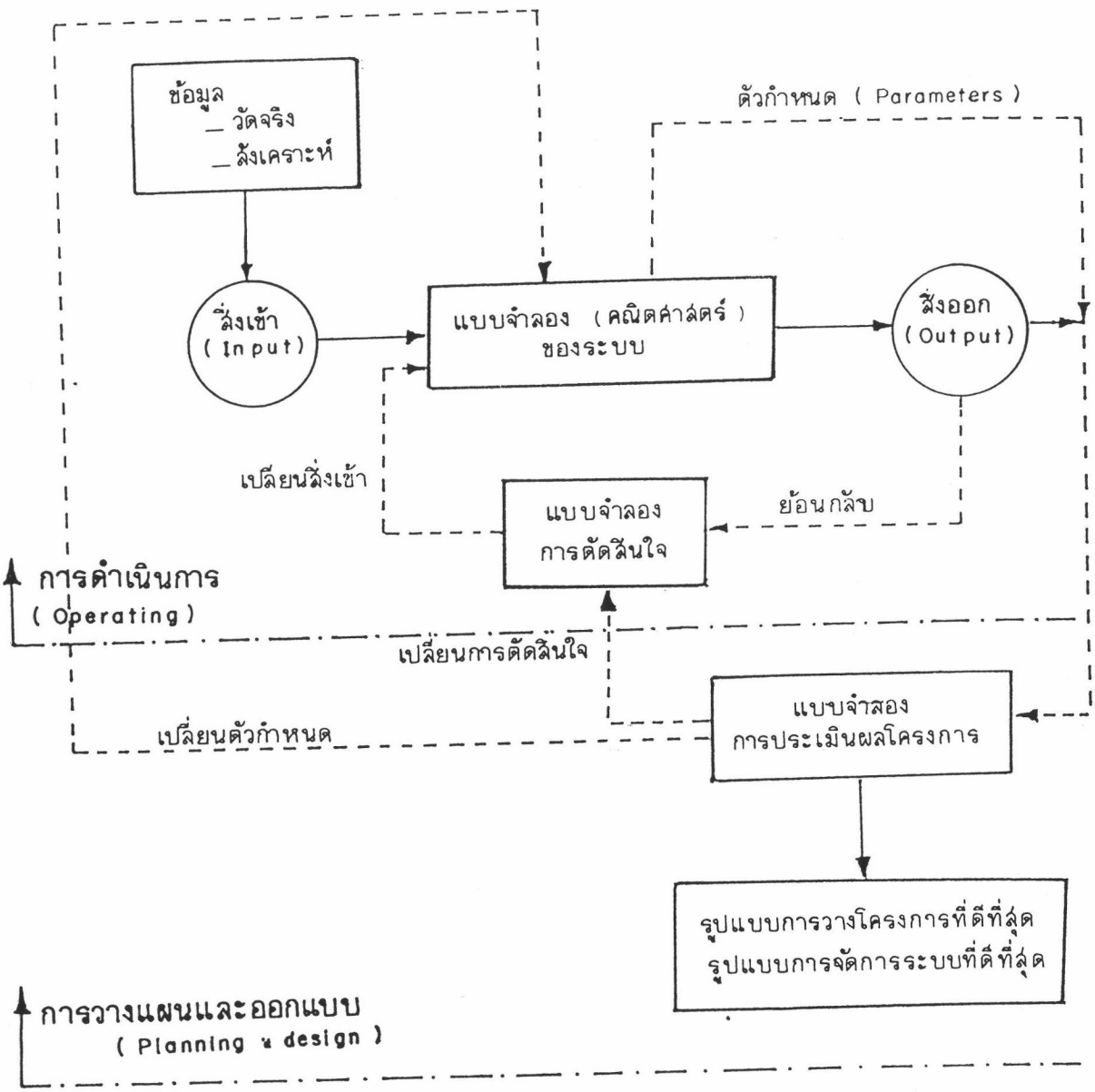
ลำดับที่ 6 ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบ

โดยที่ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์นี้ไม่ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงเว้นการศึกษาในลำดับที่ 5 ไว้ อย่างไรก็ตาม หากต้องการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจก็อาจเพิ่มการศึกษาขึ้นได้ในภายหลัง

## 2.7 ลักษณะการใช้งานของเทคนิคแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทำงานด้านการพัฒนาแหล่งน้ำอาจแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกได้เป็น 2 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนการดำเนินการและขั้นตอนการวางแผนและออกแบบ วิธีการใช้งานของเทคนิคแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งเริ่มต้นจากการนำข้อมูลป้อนเข้าแบบจำลองของระบบแล้วจะได้ผลลัพธ์ออกมา ตามเงื่อนไขค่าตัวกำหนดที่ใช้ในแบบจำลองแต่ละครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อตัดสินใจ ถ้าหากผลลัพธ์ที่ได้ไม่น่าพึงพอใจ อาจมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรบางตัว (controllable input) แล้วป้อนกลับเข้าสู่แบบจำลองของระบบใหม่ จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ออกมาที่พอใจ ขั้นตอนนี้คือขั้นตอนดำเนินการ ตัวอย่างได้แก่การศึกษาการดำเนินการของอ่างเก็บน้ำ (reservoir operation study) ซึ่งในการศึกษาจะทราบค่าของตัวกำหนด เช่น ขนาดของอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น เมื่อป้อนข้อมูล เช่น ปริมาณน้ำท่าและความต้องการน้ำเข้าสู่แบบจำลองก็จะได้ผลลัพธ์ออกมา โดยสมมติว่าเป็นปริมาตรน้ำที่เหลือในอ่างเก็บน้ำ ซึ่งถ้าหากผลลัพธ์แสดงว่าปริมาตรน้ำที่เหลือมีค่าน้อยเกินไป ก็อาจมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของระบบ (การตัดสินใจ) การปรับเปลี่ยนที่สามารถทำได้คือ การลดปริมาณความต้องการน้ำลง เพราะว่าเป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ (controllable input) ในขณะที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าปริมาณน้ำท่าให้มากขึ้น เนื่องจากเป็นสิ่งที่ควบคุมไม่ได้และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดความจุของอ่างเก็บน้ำได้เช่นกัน เนื่องจากเป็นตัวกำหนดคงที่ของระบบ กรรมวิธีการทำงานเช่นนี้จะทำจนกว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นที่พอใจ

ในขั้นตอนการวางแผนและออกแบบระบบนั้นมีข้อแตกต่างออกไปคือ จะไม่กำหนดค่าของตัวกำหนดให้คงที่ รวมทั้งรูปแบบการตัดสินใจก็อาจเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน ลักษณะการทำงาน (ดูรูปที่ 2.1 ประกอบ) ก็คือ นอกเหนือจากการทำงานตามขั้นตอนดำเนินการแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจะเปรียบเสมือนผลตอบแทนของโครงการและค่าตัวกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้




รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการใช้งานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(ได้แก่ขนาดของ เขื่อน ระบบส่งน้ำ เป็นต้น) จะ เปรียบ เหมือนการลงทุนของโครงการต่างก็ถูกนำมา เปรียบ เทียบกันในแบบจำลองการประ เมินผลโครงการ ซึ่งผลที่ออกมาอาจทำให้มีการปรับ เปลี่ยนค่าตัวกำหนดและ/หรือปรับ เปลี่ยนการตัดสินใจ (นโยบาย) เพื่อให้ได้รูปแบบของการวางโครงการที่ให้ผลตอบแทนสูงสุดหรือดีที่สุด หรือรูปแบบการจัดการระบบที่ดีที่สุด ซึ่ง เป็น เป้าหมายของการวางแผนและออกแบบระบบนั่น เอง

2.8 <u>การศึกษาที่ เคยมี</u>

การใช้ เทคนิคแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาปัญหาการพัฒนาแหล่งน้ำของประ เทศไทย ที่จริงแล้วไม่ใช่ เรื่องใหม่ แต่มีการใช้มา เป็น เวลานับ 20 ปีแล้วและรายชื่อโครงการดังต่อไปนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา เพื่อพัฒนาแหล่งน้ำที่ได้นำ เทคนิคแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้

1. โครงการแม่น้ำน่าน จัดทำโดย Engineering Consultants, Inc. (Denver, U.S.A.) สำหรับหน่วยราชการคือ กรมชลประทาน เมื่อปี พ.ศ. 2507 เป็นการศึกษาทำรายงานความ เหมาะสมของโครงการ เอนกประสงค์เพื่อการ เพาะปลูก การผลิตไฟฟ้า การควบคุมอุทกภัยและการคมนาคม ซึ่งจากการศึกษาโครงการแม่น้ำน่านนี้ได้ เสนอลักษณะโครงการการอันประกอบด้วย การก่อสร้าง เขื่อนผาซ่อม (เขื่อนสิริกิติ์) การพัฒนาระบบชลประทานในที่ราบลุ่มแม่น้ำ เจ้าพระยา และการสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำ [5]

2. โครงการ เอนกประสงค์ในลุ่มน้ำแม่กลองใหญ่ - การพัฒนาระยะที่ 2 (The Greater Me Klong Multi-Purpose Project, Second Stage Development) จัดทำโดย กรมชลประทาน เมื่อปี พ.ศ. 2511 เพื่อศึกษารูปแบบการพัฒนาลุ่มน้ำแม่กลองให้ เกิดประโยชน์สูงสุด จากความต้องการใช้น้ำ เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ คือ การป้องกันอุทกภัย การ เพาะปลูก การผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ การอุตสาหกรรมและการควบคุมคุณภาพน้ำ ซึ่งจากการศึกษาโครงการนี้ได้รูปแบบการพัฒนาลุ่มน้ำแม่กลองอันประกอบด้วย เขื่อน เก็บกักน้ำบนลำน้ำแควน้อย แควใหญ่ การขยายพื้นที่ชลประทานออกไปทั้งสองฝั่งแม่น้ำ และศึกษาแผนการใช้น้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ [6]

3. โครงการน้ำชี จัดทำโดย United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation (Denver, U.S.A.) สำหรับหน่วยราชการ คือ กรมชลประทาน เมื่อ พ.ศ. 2514 เพื่อศึกษาความเหมาะสมและขนาดของการพัฒนา ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการเจรจาขอกู้เงินจากแหล่งการเงินนานาชาติต่อไป ผลการศึกษาแสดงว่าการพัฒนาแม่น้ำชีโดยการสร้างอ่างเก็บน้ำชี ขนาดความจุประมาณ 2000 ล้าน $ม^3$. และมีพื้นที่ชลประทาน ประมาณ 200,000 ไร่ มีความเหมาะสมทั้งทางเศรษฐกิจและวิศวกรรม (7)

4. รายงานการศึกษาเบื้องต้นการพัฒนาลุ่มแม่น้ำบางปะกง จัดทำโดย บริษัท Engineering Consultants, Inc. (Denver, U.S.A.) สำหรับหน่วยราชการ คือ กรมชลประทาน เมื่อปี พ.ศ. 2514 วัตถุประสงค์ของการศึกษา เพื่อเสนอโครงการชลประทาน (จากการศึกษาระดับเบื้องต้น) ที่สามารถทำการพัฒนาได้มากที่สุด ตามลักษณะของแหล่งน้ำและที่ดินของลุ่มน้ำ ผลจากการศึกษาสามารถกำหนดที่ตั้งและขนาดของเขื่อน เก็บกักน้ำบนลำน้ำต่าง ๆ และระบบส่งน้ำที่สัมพันธ์กัน (8)

5. โครงการปรับปรุงการชลประทานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จัดทำโดย บริษัท Tahal Consulting Engineers Israel, สำหรับหน่วยราชการคือ กรมชลประทาน เมื่อปี พ.ศ. 2519 มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาในระดับความเหมาะสมของการปรับปรุงโครงการชลประทานที่ใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำลำตะคอง อ่างเก็บน้ำลำปาวและอ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์ (น้ำพอง) (9)

6. การศึกษาลุ่มน้ำเจ้าพระยา-แม่กลอง จัดทำโดย บริษัท Acres International Limited (Canada) สำหรับหน่วยราชการ คือ กรมชลประทาน เมื่อปี พ.ศ. 2520 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้น้ำของแหล่งน้ำทั้งสองลุ่มน้ำนี้ในปัจจุบันและคาดหมายการใช้น้ำในอนาคต เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงการชลประทานที่จะมีในอนาคตและการใช้น้ำในวัตถุประสงค์อื่น ๆ (10), (11)

7. การศึกษาศักยภาพของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำในประเทศไทย จัดทำโดย บริษัท Sverdrup & Parcel and Associates, Inc. (Australia) ร่วมกับบริษัท

เซาท์อีสต์ เอ เชีย เทคโนโลยี (SEATEC) สำหรับคณะอนุกรรมการวางแผนพัฒนาแหล่งน้ำ สำนักงานคณะกรรมการพัฒนา เศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ เมื่อปี พ.ศ. 2521 เพื่อประเมินโครงการไฟฟ้าพลังน้ำที่มีศักยภาพและมีความเป็นไปได้ โดยทำการคัดเลือกโครงการได้ 15 โครงการจากโครงการที่มีรายชื่ออยู่ทั้งหมด 137 โครงการ และจากโครงการ 15 โครงการนี้นำไปศึกษาลักษณะโครงการและประเมินการลงทุนและผลประโยชน์ของโครงการ ซึ่งรวมทั้งผลประโยชน์ที่ได้รับจากการเพาะปลูก การป้องกันอุทกภัยและการประมง (12)

8. การศึกษาความเหมาะสมของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ 3 ของเขื่อนสิรินธร จัดทำโดย กองวางแผนพัฒนาแหล่งน้ำ ฝ่ายวางโครงการและแผนงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อปี พ.ศ. 2523(13)

9. โครงการผันน้ำอิง-ยม-น่าน จัดทำโดย บริษัท Howard Humphreys & Partners England และบริษัท Acres International Limited (Canada) สำหรับหน่วยราชการที่รับผิดชอบ คือ กรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อปี พ.ศ. 2524 เป็นการศึกษาในระดับพิจารณาความเหมาะสมขั้นต้น (Prefeasibility Study) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมทางเทคนิคและเศรษฐกิจของการผันน้ำจากแม่น้ำอิงสู่แม่น้ำยมและจากแม่น้ำยมสู่แม่น้ำน่าน (14)