บทที่ 2
ทฤษฎีและผลการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.1 การศึกษาการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด

การไหลของน้ำในทางน้ำเปิด เป็นการไหลจากบริเวณที่มีพลังงานสูงไปสู่บริเวณที่มีพลังงานต่ำ โดยที่มีผิวอิสระบริเวณด้านบนของน้ำสัมผัสกับอากาศ ดังนั้นแรงที่ทำให้เกิดการไหลจะเกิดจากแรงดึงดูดของโลกที่กระทำกับน้ำ โดยมีแรงต้านคือ ความฝืดของทางน้ำ ซึ่งลักษณะการไหลจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังทางน้ำเปิด และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของของไหล จึงเกิดการสูญเสียพลังงานในช่วงระยะทางการไหลที่พิจารณา

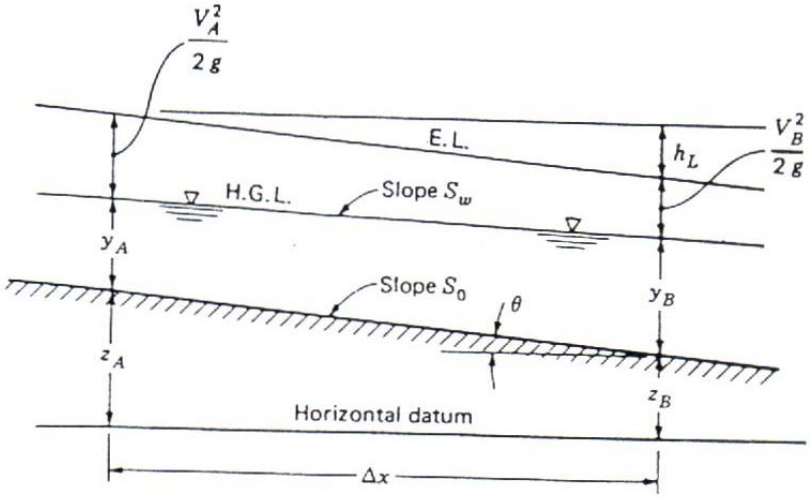
โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความลึกการไหลเทียบกับเวลา และการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความลึกการไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง จะทำให้สามารถแบ่งประเภทของการไหลได้ดังนี้ (Henderson , 1966)

1) การไหลแบบคงที่ (steady flow) คือ การไหลของน้ำในลักษณะที่ความเร็วหรือความลึกการไหลที่จุดใด ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2) การไหลแบบไม่คงที่ (unsteady flow) คือ การไหลของน้ำในลักษณะที่ความเร็วหรือความลึกการไหล ที่จุดใด ๆ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

3) การไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) คือ การไหลของน้ำในลักษณะที่ความเร็วหรือความลึกการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4) การไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform flow) คือ การไหลของน้ำในลักษณะที่ความเร็วหรือความลึกการไหลมีการเปลี่ยนแปลง จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง



ภาพที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของการไหลในทางน้ำเปิด

(Linsley,1992)

โดยทั่วไปแล้วการไหลของน้ำธรรมชาติมักจะเป็นแบบการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคลองส่งน้ำชลประทานก็เช่นเดียวกันเนื่องจากมีอิทธพลของอาคารควบคุมทางชลประทานต่าง ๆ เช่น อาคารอัดน้ำ ประตูระบายน้ำ อาคารน้ำตก จะมีอิทธิพลทำให้การไหลของน้ำต่างไปจากการไหลแบบสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามในการคำนวณเกี่ยวกับการไหลของน้ำโดยทั่ว ๆ ไป ซึ่งไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก มักจะสมมติว่าการไหลของน้ำเป็นแบบสม่ำเสมอ โดยเฉพาะการไหลในคลองดาดคอนกรีตในช่วงที่มีหน้าตัดคงที่

พิจารณาภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นลักษณะการไหลในทางน้ำเปิดทั่วไป สามารถเขียนสมการพลังงานระหว่างหน้าตัด A และหน้าตัด B ได้ดังนี้

$$z_A + y_A + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + y_B + \frac{V_B^2}{2g} + h_L \qquad (2.1)$$

สมการที่ (2.1) เรียกว่า สมการพลังงานของการไหลในทางน้ำเปิด

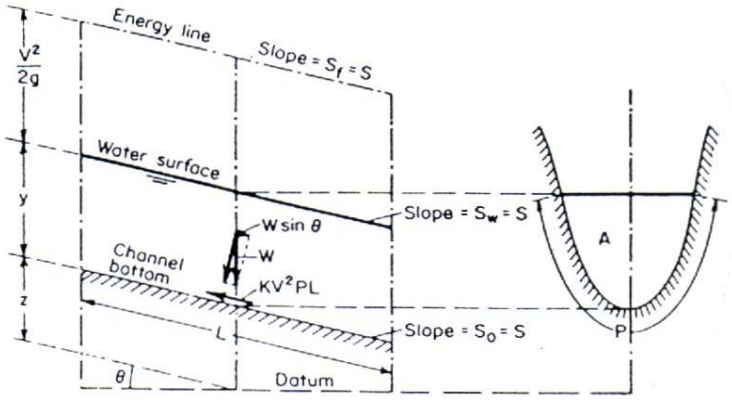
เมื่อ z คือ ระดับท้องน้ำของทางน้ำเปิดเหนือระดับอ้างอิง (m)

y คือ ความลึกของการไหล หรือความดัน (pressure head = P/y)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

และ h_L คือ การสูญเสียพลังงาน (head loss) ระหว่างหน้าตัด A และหน้าตัด B (m)

การไหลแบบสม่ำเสมอ เกิดขึ้นบนทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดระยะทางการไหลพิจารณา โดยมีลักษณะที่สำคัญ คือ ความลึก พื้นที่หน้าตัด ความเร็ว และอัตราการไหล ทุก ๆ หน้าตัดของทางน้ำเปิดจะต้องคงที่ ทั้งนี้ เส้นระดับพลังงาน (energy grade line , E.G.L.) เส้นระดับชลศาสตร์ หรือเส้นระดับผิวน้ำ (hydraulic grade line , H.G.L) รวมทั้ง เส้นระดับของท้องน้ำ (bottom slope) จะต้องขนานกัน ทำให้มีความลาดเท่ากัน หรือ $S_f = S_w = S_o = S$



ภาพที่ 2.2 การไหลแบบสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด

(Chow,1959)

ในการไหลสม่ำเสมอจะมี $y_A = y_B$ และ $v_A = v_B$
ดังนั้น จากสมการ (2.1) จะได้ว่า

การสูญเสียพลังงาน $h_L = z_A - z_B = SL$ (2.2)

เมื่อ S คือ ความลาดของเส้นระดับพลังงาน
L คือ ระยะทางระหว่างหน้าตัด A และหน้าตัด B

ในทางปฏิบัติ ความเร็วของการไหลแบบสม่ำเสมอในทางน้ำเปิดช่วงที่พิจารณาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวทางน้ำ ลักษณะหน้าตัดการไหลและความลาดชันของเส้นพลังงานซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$v = C R^x S^y \quad (2.3)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล
C คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหล
R คือ รัศมีชลศาสตร์
และ S คือ ความลาดของเส้นระดับพลังงานซึ่งในการไหลสม่ำเสมอจะมีค่าเท่ากับความลาดของผิวน้ำ และความลาดของท้องน้ำ

ผู้ศึกษาทดลองหาสูตรคำนวณความเร็วในการไหลตามหลักการของสมการ (2.3) หลายท่าน แต่ที่นิยมใช้กันแพร่หลายคือ สูตรของ Chezy และ สูตรของ Manning

Chezy (1769) วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้คิดสมการสำหรับการไหลแบบสม่ำเสมอ โดยมีสมมติฐาน 2 ข้อ สมมติฐานข้อแรก กล่าวว่า แรงต้านทางการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าคลอง เป็นสัดส่วนกับความเร็วเฉลี่ยยกกำลังสอง ดังนั้น

แรงต้านทางการไหลทั้งหมด $= Kv^2 PL$ (2.4)

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ของสัดส่วน P คือ เส้นขอบเปียก (wetted perimeter) L คือ ความยาวของช่วงการไหล ดังแสดงในภาพที่ 2.2

สมมติฐานข้อที่สอง กล่าวว่า ในการไหลแบบสม่ำเสมอ แรงเนื่องจากน้ำหนักของน้ำในแนวความลาดชันของพื้นท้องน้ำ ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของการไหล มีค่าเท่ากับแรงต้านทานการไหลทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 2.2 โดยแรงย่อยของน้ำหนักน้ำมีค่าเท่ากับ

$$\gamma ALSin\theta = \gamma ALS \quad (2.5)$$

เมื่อ S = Sin θ เท่ากับความลาดท้องคลอง ดังนี้

$$\gamma ALS = Kv^2 PL \quad (2.6)$$

จัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้ $\frac{A}{P} = R$ และ $C = \sqrt{\frac{\gamma}{K}}$ จะได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของการไหลในทางน้ำเปิดกับรัศมีชลศาสตร์ และความลาดของเส้นระดับพลังงาน ดังนี้

$$v = C\sqrt{RS} \qquad (2.7)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล
C คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลของ Chezy
R คือ รัศมีชลศาสตร์
และ S คือ ความลาดของเส้นระดับพลังงาน

Ganguillet & Kutter (1869) ได้เสนอสูตรสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Chezy ดังนี้ คือ

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}} \qquad (2.8)$$

เมื่อ C = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Chezy
S = ความลาดชันของเส้นพลังงาน (เมตร/เมตร)
R = รัศมีชลศาสตร์ (เมตร)
n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ *สูตรคัตเตอร์ (Kutter's formula)* แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

Bazin (1897) ได้เสนอสูตรสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Chezy ดังนี้ คือ

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \qquad (2.9)$$

เมื่อ C = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Chezy
R = รัศมีชลศาสตร์ (เมตร)
m = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ *สูตรเบซิน (Basin formula)* แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

จากสูตรของคัตเตอร์ กำหนดให้ $C = f(R, n, S)$ แต่สูตรของเบซิน กำหนดให้ $C = f(R, m)$ และเนื่องจาก สูตรของเบซิน สร้างขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในทางน้ำขนาดเล็ก ดังนั้นการนำไป ใช้งานจึงพบว่าใช้ได้ผลน้อยกว่าสูตรของคัตเตอร์ ซึ่งสร้างขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการวัดในทางน้ำธรรมชาติโดยตรง

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของคัตเตอร์และแมนนิ่ง

ชนิดของทางน้ำ		เงื่อนไข			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ไม่ดี
1	**ทางน้ำที่สร้างขึ้น**				
1.1	คลองดินที่สม่ำเสมอและตรง	0.017	0.020	0.023	0.025
1.2	คลองดินที่ขุดโดยเรือขุด	0.023	0.028	0.03	0.040
1.3	คลองที่ขุดในหิน สม่ำเสมอและตรง	0.023	0.030	0.033	0.035
1.4	คลองที่ขุดในหิน ไม่สม่ำเสมอและคดเคี้ยว	0.035	0.040	0.045	-
1.5	คลองที่ได้จากการระเบิดหินมีหญ้าขึ้นปกคลุมลาดตลิ่ง	0.025	0.030	0.035	0.040
1.6	คลองดินที่เรียงหินลาดตลิ่ง	0.028	0.300	0.033	0.035
1.7	คลองที่คดเคี้ยวมีความเร็วการไหลต่ำ	0.020	0.025	0.028	0.030
2	**ทางน้ำธรรมชาติ**				
2.1	เป็นคลองตรง สะอาด ไม่มีหาดทราย ไม่มีหลุมบ่อ	0.025	0.028	0.030	0.033
2.2	เหมือน 2-1 แต่มีหญ้าและหินปกคลุมบ้าง	0.030	0.033	0.035	0.040
2.3	เป็นคลองคดเคี้ยวสะอาดมีหาดทรายและหลุมบ่อ	0.033	0.035	0.040	0.045
2.4	เหมือน 2-3 แต่ไม่สม่ำเสมอและน้ำตื้น	0.040	0.045	0.050	0.055
2.5	เหมือน 2-3 แต่มีหญ้าและหินปกคลุมบ้าง	0.035	0.040	0.045	0.050
2.6	เหมือน 2-4 แต่มีบางหน้าตัดที่มีหินมาก	0.045	0.050	0.055	0.060
2.7	ช่วงการไหลช้า ๆ มีหญ้าปกคลุมมาก และมีหลุมลึก	0.050	0.060	0.070	0.080
2.8	มีหญ้าปกคุลมหนาแน่นและสูงมาก	0.075	0.100	0.125	0.015
3	**คลองดาด**				
3.1	คลองดาดด้วยหินเรียงไม่ยาแนว	0.025	0.030	0.033	0.035
3.2	คลองดาดด้วยหินเรียงยาแนว	0.017	0.020	0.025	0.030
3.3	คลองดาดด้วยคอนกรีตด้วยวิธีอัดอากาศ	0.014	0.016	0.019	0.021
3.4	คลองดาดด้วยคอนกรีตผิวเรียบ	0.010	0.011	0.012	0.013
3.5	คลองดาดด้วยคอนกรีตแบบธรรมดา	0.013	0.014	0.014	0.015

(สมชาติ , 2534)

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของเบชิน

ชนิดของทางน้ำ	เงื่อนไข			
	ดีมาก	ดี	พอใช้	ไม่ดี
1 ทางน้ำที่สร้างขึ้น				
คลองดินที่สม่ำเสมอและตรง	0.05	0.70	0.88	1.05
คลองดินที่ปกคลุมด้วยหญ้าหรือหิน	1.05	1.38	1.75	2.10
คลองดินที่ขุดในหิน	1.38	1.75	2.05	2.30
2 ทางน้ำธรรมชาติ				
คลองที่มีการบำรุงรักษาอย่างดี	1.05	1.38	1.75	2.10
คลองดินที่ปกคลุมด้วยหญ้าหรือหิน	1.75	2.40	3.50	4.85
3 คลองดาด				
คลองดาดด้วยคอนกรีตมีผิวเรียบ	-	0.055	0.14	0.22
คลองดาดด้วยหินมีผิวเรียบ	0.055	0.22	0.275	0.33
คลองดาดด้วยหินเรียงยาแนว (ขรุขระ)	0.50	0.69	1.05	1.38
คลองดาดด้วยหินเรียงไม่ยาแนว (ขรุขระ)	1.05	1.38	1.60	1.75

(สมชาติ , 2534)

ต่อมาในปี 1889 **Robert Manning** วิศวกรชาวไอริช ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของ Chezy กับรัศมีชลศาสตร์ ได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวใหม่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's roughness coefficient , n) ดังนี้

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \qquad (2.10)$$

และเมื่อแทนค่าจากสมการที่ (2.10) ซึ่งอยู่ในระบบหน่วย SI ลงในสมการที่ (2.7) จะได้เป็นสมการคำนวณหาความเร็วของการไหลในทางน้ำเปิด คือ

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \qquad (2.11)$$

เมื่อ v = ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

R = รัศมีชลศาตร์ (เมตร)

S = ความลาดชันของเส้นพลังงาน (เมตร/เมตร)

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของสูตรแมนนิ่ง (Manning's formula) แสดงไว้ในตารางที่ 1

สมการดังกล่าวเรียกว่า สมการของแมนนิ่ง (Manning's formular) ซึ่งภายหลังเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระของแมนนิ่ง (ค่า n) จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของทางน้ำเปิด คือ ตัววัสดุของทางน้ำที่สัมผัสกับน้ำนั่นเอง หากมีความขรุขระมากทำให้เกิดความเสียดทานสูง ค่า n ก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดทางน้ำเปิดสำหรับสมการแมนนิ่ง

ประเภทของทางน้ำ	ค่า n
คลองขุดตรงและสม่ำเสมอ	
สะอาด	0.018 - 0.020
มีกรวด ขรุขระ	0.025 - 0.030
มีหญ้าสั้นๆ	0.027 - 0.030
คลองขุดคดเคี้ยว	
สะอาด	0.027 - 0.030
มีหญ้าปานกลาง	0.030 - 0.033
มีหญ้าหนาแน่น	0.035 - 0.040
คลองขุดดาดผิวท้องคลองด้วยวัสดุต่างๆ	
แอสฟัลทส์	0.013 - 0.016
คอนกรีต	0.015 - 0.020
หินเรียง	0.030 - 0.045
อิฐเรียง	0.013 - 0.015
หินทิ้งก้อนโต	0.025 - 0.030
โลหะผิวเป็นลอน	0.025 - 0.030
คลองขุดปล่อยตามสภาพไม่ดาดผิว	
มีวัชพืชและการตกตะกอน	0.060 - 0.075
ทางน้ำธรรมชาติแนวตรงสภาพดี	
สะอาด	0.030 - 0.033
มีหินและวัชพืช	0.035 - 0.040
ทางน้ำธรรมชาติคดเคี้ยว	
สะอาด	0.040 -0.045
มีหินและวัชพืช	0.045 -0.050
ทางน้ำธรรมชาติสภาพไม่ดี คดเคี้ยว และเป็นหลุมบ่อ	0.070 -0.080

(Chow , 1959)

Chow (1959) ได้รวบรวมข้อสรุป ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระทางน้ำของแมนนิ่ง สำหรับทางน้ำ ลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

1) ความขรุขระของผิวทางน้ำ พิจารณาตามขนาดและรูปร่างของเม็ดวัสดุท้องน้ำ โดยทั่วไปวัสดุเม็ดโต หยาบ และขรุขระ จะมีแรงต้านสูงกว่าและจะทำให้ได้ค่า n สูงกว่าวัสดุเม็ดละเอียด

2) วัชพืช และต้นไม้ที่ขึ้นขวางทางน้ำ เกิดขึ้นได้หลายลักษณะเช่น วัชพืช งอกจากริมตลิ่ง วัชพืชที่ขึ้นในทางน้ำโดยตรง วัชพืชน้ำประเภทจม และลอย เป็นต้น การที่มีวัชพืชขึ้นขวางการไหลของน้ำ จะทำให้เกิดแรงต้านเพิ่มขึ้น และหน้าตัดการไหลลดลง มีผลทำให้ค่า n เพิ่มขึ้น

3) ความไม่สม่ำเสมอของทางน้ำ ทำให้ขนาดและรูปร่างของหน้าตัด เปลี่ยนแปลงไปตลอดความยาวของการไหล เป็น กรณี มีเกาะทราย สันดอน หลุม หรือแอ่งน้ำ ทำให้หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด จะทำให้มีค่า n เริ่มสูงขึ้น

4) แนวของทางน้ำ ทางน้ำที่มีความคดเคี้ยวมาก รัศมีโค้งสั้น ทำให้เป็นโค้งมุมแหลมจะมีค่า n สูงกว่าทางน้ำแนวตรง หรือมีรัศมีโค้งยาว

5) ตะกอนและการกัดเซาะ ผลของตะกอนอาจทำให้มีค่า n สูงขึ้น หรือลดลงก็ได้แล้วแต่สภาพผิวเดิมของทางน้ำ เปรียบเทียบกับขนาดเม็ดดินตะกอนเช่นเดียวกับ การกัดเซาะ ถ้าผลการกัดเซาะทำให้ทางน้ำ มีสภาพดีขึ้น จะทำให้ค่า n ต่ำลง แต่ถ้าทำให้เกิดความคดเคี้ยวหรือไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ค่า n เพิ่มขึ้น

6) สิ่งกีดขวางในลำน้ำ ทางน้ำที่มีสิ่งกีดขวาง เช่น ตอม่อสะพาน จะมีค่า n เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาด จำนวน การกระจาย และรูปร่างของสิ่งกีดขวางนั้น ๆ

7) ขนาดและรูปร่างของทางน้ำ การเพิ่มค่ารัศมีชลศาสตร์ อาจเพิ่มหรือลดค่า n ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของทางน้ำ

8) ระดับน้ำและอัตราการไหล โดยทั่วไปค่า n จะลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณากรณีระดับน้ำสูงขึ้นจนท่วมตลิ่ง แผ่ขยายออกไปด้านข้างซึ่งมีวัชพืชปกคลุม อาจทำให้ค่า n เพิ่มสูงขึ้น

9) ฤดูกาล น่าจะเป็นผลกระทบทางอ้อมที่ทำให้เงื่อนไขของการกระตุ้นการเจริญเติบโตของวัชพืชเปลี่ยนไป ค่า n อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ แล้วแต่ชนิดของวัชพืช

10) วัตถุแขวนลอย และวัตถุกลิ้งไปตามท้องน้ำ จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานการไหล ในการนำพาเอามวลสารดังกล่าวลอยไปกับน้ำ จึงทำให้มีค่า n เพิ่มขึ้น

จากอิทธิพลของปัจจัยหลายด้านดังกล่าว **Cowan** ได้เสนอสูตรสำหรับใช้หาค่า n ที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านต่าง ๆ ดังนี้

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)\, m_5 \qquad (2.12)$$

โดยที่ n_0 คือค่า n ขั้นต้น ขึ้นอยู่กับวัสดุทางน้ำอย่างเดียว

n_1 คือค่า n ที่เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของความไม่สม่ำเสมอของผิวทางน้ำ

n_2 คือค่า n ที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของหน้าตัดการไหล

n_3 คือค่า n ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสิ่งกีดขวางทางน้ำ

n_4 คือค่า n ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัชพืช และลักษณะการไหล

m_5 คือ ค่าปรับแก้ สำหรับอิทธิพลความคดเคี้ยวของลำน้ำ

ค่าที่เหมาะสมของ n_0 n_1 n_2 n_3 n_4 และ m_5 สามารถเลือกได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าปรับแก้สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์ความขรุขระ แมนนิ่ง ตามสมการ (2.12)

เงื่อนไขทางน้ำ		ค่าปรับแก้	
Material Involved	Earth	n_0	0.020
	Rock cut		0.025
	Fine gravel		0.024
	Coarse gravel		0.028
Degree of Irregularity	Smooth	n_1	0.000
	Minor		0.005
	Moderate		0.010
	Severe		0.020
Variations of Channel Cross Section	Gradual	n_2	0.000
	Alternating Occasionally		0.005
	Alternating Frequently		0.010 – 0.015
Relative Effect of Obstructions	Negligible	n_3	0.000
	Minor		0.010 – 0.015
	Appreciable		0.020 – 0.030
	Severe		0.040 – 0.060
Vegetation	Low	n_4	0.005 – 0.010
	Medium		0.010 – 0.025
	High		0.025 – 0.050
	Very high		0.050 – 0.100
Degree of Meandering	Minor	m_5	1.000
	Appreciable		1.150
	Severe		1.300

(Chow, 1959)

2.2 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง

Jha (1990) ศึกษาวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง หรือ ค่า n ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของการไหลในทางน้ำเปิดแบบคงที่และแบบไม่คงที่ โดยนำมาทำการจำลองสภาพการไหลในคลองชลประทาน ขั้นตอนการศึกษาประกอบด้วย การปรับเปลี่ยนค่าระดับน้ำและอัตราการไหล ซึ่งเป็นเงื่อนไขขอบเขต ทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำหลาย ๆ ค่า ประยุกต์ใช้เทคนิค double sweep method และ four-points implicit finite difference หลังจากทำการแทนค่าระดับน้ำในช่วงต่าง ๆ ที่กำหนด จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแต่ละกรณีได้ จากนั้นนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์กับอัตราการไหลที่เปลี่ยนไป ในการทดสอบแบบจำลองดังกล่าว นำไปประยุกต์ใช้กับโครงการชลประทานสองพี่น้อง สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในรูปของระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำ และประยุกต์ใช้กับ ALWDP farm canal สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในรูปของอัตราการไหลทางด้านเหนือน้ำ ผลการศึกษาทดลองพบว่าความสัมพันธ์ เชิงเส้นระหว่างค่า n และอัตราการไหล แปรผันเป็นเส้นตรงทั้ง 2 กรณี

สมชาติ (2534) ศึกษาการหาสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง หรือ ค่า n ในคลองส่งน้ำดาดคอนกรีต ด้วยการตรวจวัดค่าจริงในสนามจากโครงการชลประทาน 2 แห่ง คือ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานครปฐม ซึ่งเป็นโครงการเก่าที่ส่งน้ำมาแล้วมากกว่า 10 ปี และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง ซึ่งเป็นโครงการใหม่ที่เพิ่งเริ่มส่งน้ำ ผู้ศึกษาได้แบ่งปัจจัยการตรวจวัดเป็น 2 ปัจจัย คือ ขนาดของคลอง แบ่งเป็น เล็ก กลาง ใหญ่ และอัตราการไหลของน้ำแบ่งเป็น น้อย ปานกลาง และมาก แต่ละปัจจัยมีการตรวจวัดซ้ำ จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิธีการการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าการตรวจวัดซ้ำ และผลค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของคลองขนาดกลางและใหญ่ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่คลองขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ท้ายที่สุดผู้ศึกษาได้เสนอแนะว่า ควรพิจารณาเกณฑ์กำหนดในการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่ง สำหรับการออกแบบเป็น 2 ค่า คือ สำหรับคลองขนาดเล็กที่มีอัตราการไหลน้อยกว่า 5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ควรใช้ 0.018 และสำหรับคลองขนาดกลางถึงใหญ่ ที่มีอัตราการไหลไม่น้อยกว่า หรือ 5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ควรใช้ 0.016

Rabe (1991) ได้ศึกษาการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดของทางน้ำ สำหรับการไหลแบบคงที่และไม่คงที่ ในคลองชลประทานที่มีรูปร่าง ไม่คงที่ (non-prismatic) ในการศึกษาได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นมา 3 ชุด คือ (1) Geometric elements calculation model (2) Steady flow simulation model และ (3) Unsteady flow simulation model โดยใช้ภาษา FORTRAN เขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พื้นฐานของแบบจำลองใช้เทคนิค implicit finite difference ร่วมกับวิธี double sweep algorithm สำหรับแก้สมการของ Saint Venant แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเหล่านี้ ถูกนำมาทดสอบกับคลองส่งน้ำส่วนหนึ่งของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพิษณุโลก ผลการศึกษาได้แสดงว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระจะแปรเปลี่ยนตามลักษณะของคลองและแปรเปลี่ยนตามเวลา ผู้ศึกษายังได้เสนอแนะว่า สำหรับเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) สำหรับระบุลงในแบบจำลอง ควรใช้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ ซึ่งจะให้ผลที่ดีกว่าการนำเอาค่าอัตราการไหลมาเป็นเงื่อนไขขอบเขต

2.3 การศึกษาการไหลในทางน้ำที่มีตะกอนหรือวัชพืช

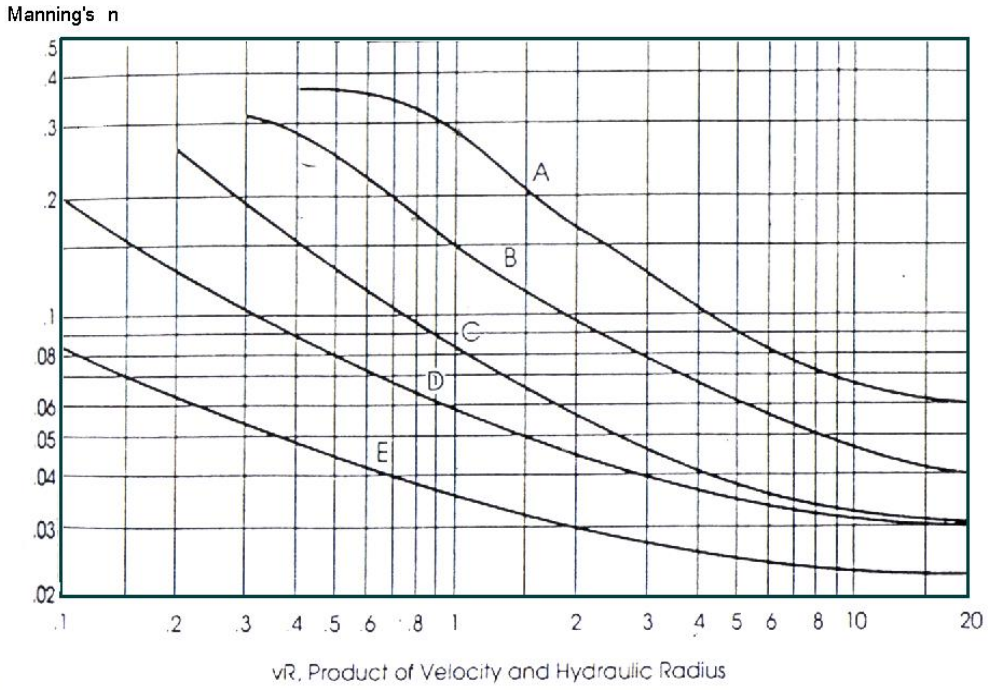
Gwinn and Ree (1979) ศึกษาการไหลใน ทางน้ำที่มีวัชพืชปกคลุม (vegetated channels) โดยพัฒนาสมการจากผลการทดลองสำหรับคำนวณหาค่า n โดยประมาณ แบ่งกลุ่มตามการเจริญเติบโตของวัชพืชในทางน้ำ และขึ้นอยู่กับผลคูณของความเร็วกับรัศมีชลศาสตร์ ได้ความสัมพันธ์แบบลอการิทึม ดังนี้

$$n = \frac{1}{2.1 + 2.3\,x + 6\,\ln(vR)} \qquad (2.13)$$

โดยค่า x เป็นค่าคงที่สำหรับวัชพืช ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและการเจริญเติบโตของวัชพืชที่ศึกษาแต่ละชนิด ตามตารางที่ 2.5 แบ่งชั้นวัชพืชออกเป็น 5 ระดับ คือ

ระดับ A มีค่า x = -0.5
ระดับ B มีค่า x = 2.0
ระดับ C มีค่า x = 5.0
ระดับ D มีค่า x = 7.0
ระดับ E มีค่า x = 11.0

ความสัมพันธ์ของค่า n กับผลคูณของ vR ในทางน้ำที่มีวัชพืช แสดงไว้ในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่า n กับผลคูณของ vR ในทางน้ำที่มีวัชพืชปกคลุม
(Kyung Yoo & Claude Boyed , 1993)

ตารางที่ 2.5 การแบ่งชนิดพืชตามแรงต้านทานวัชพืช ของ U.S. Soil Coservation Service

ชั้น	ชนิดพืชปกคลุม	เงื่อนไข
A	Weeping love grass	Excellent ,tall (average 30 in)
	Reed canary grass	Excellent ,tall (average 36 in)
B	Smooth brome grass	Good stand, mowed (average 12 - 15 in)
	Bermuda grass	Good stand, tall (average12 in)
	Tall fescue	Good stand, unmowed (average18 in)
	Grass mixture	Good stand, uncut (average20 in)
	Reed canary grass	Good stand, uncut (average 12 -15 in)
	Blue grama	Good stand, uncut (average 13in)
C	Bahia grass	Good stand, uncut (6 - 8 in)
	Burmuda grass	Good stand, mowed (average 6 in)
	Redtop	Good stand, headed (15 - 20 in)
	Grass mixtuer in summer	Good stand, uncut (6 - 8 in)
	Centipede grass	Very dense cover (average 6 in)
	Kentucky bluegrass	Good stand, headed (6 - 12 in)
D	Burmuda grass	Good stand, cut to 2.5 in height
	Red fescue	Good stand, headed (12 - 18 in)
	Buffalo grass	Good stand, uncut (3 - 6 in)
	Grass mixtuer in fall and Spring	Good stand, uncut (4 - 5 in)
	Kentucky bluegrass	Good stand, cut to 2 - in height
		Very good stand before cutting (average in)
E	Burmuda grass	Good stand, cut to 1 - 5 - in. height or Burned stubble

(Kyung Yoo & Claude Boyed , 1993)

ธนิต (2529) ทำการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง หรือ ค่า n และการรั่วซึมของน้ำในคูส่งน้ำที่เป็นดินเหนียว ในสภาพที่มีวัชพืชต่างๆ โดยทำการทดลองกับคูน้ำขนาดเล็ก ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี ในช่วงความยาวการไหลช่วงละ 50 เมตร นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่า n จากนั้นนำมาพิจารณาร่วมกันทั้งหมด จัดเป็นกลุ่มตามลักษณะความสูง และความหนาแน่นของวัชพืชแต่ละระดับ รายละเอียดการวิเคราะห์เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าค่า n กับผลคูณระหว่างความเร็วการไหลของน้ำกับรัศมีชลศาสตร์ หรือผลคูณ vR ได้สูตรหาค่า n สำหรับสภาพวัชพืชแต่ละระดับ อยู่ในรูปความสัมพันธ์แบบลอกการิทึม ดังนี้

$$n = a + b \log vR \qquad (2.14)$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่

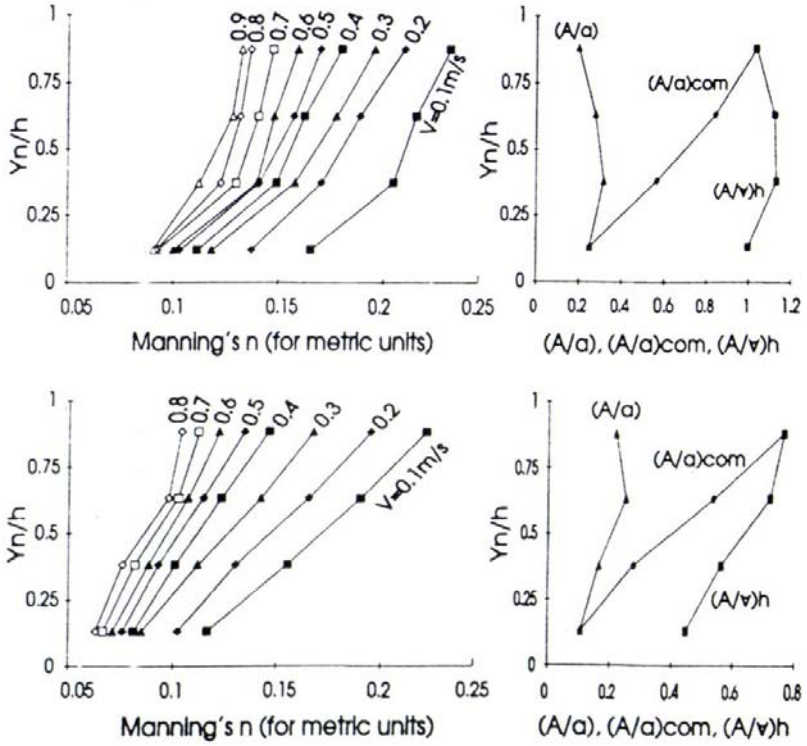
ผลการทดลอง และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งของคูส่งน้ำในสนามที่มีวัชพืชต่าง ๆ กัน ได้ค่าระหว่าง 0.0186 ถึง 0.0507 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.0347

ปรัชญา (2532) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประเมินหาปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการกัดเซาะของฝน และจากการไหลหลากบนพื้นดินลงสู่ลำน้ำ ซึ่งจะรวมกับการไหลของตะกอนในท้องน้ำ การวิเคราะห์แยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนแรกเป็นการหลากของน้ำท่า ซึ่งถือว่าการไหลเป็นแบบไม่คงตัวในทางน้ำเปิด ทำการคำนวณโดยใช้วิธี Finite difference Lax Wendroff ส่วนที่สองเป็นการคำนวณ การหลากของตะกอน (sediment routing) ซึ่งการกัดเซาะบนผิวดินคำนวณโดยใช้สมการของ Meyer and Wischmeier (1969) และการกัดเซาะในลำน้ำ ใช้สมการของ Schoklitsch (1963) จากนั้นได้เทียบแบบจำลองกับพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กไม่เกิน 5 ตารางกิโลเมตร ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวนสองแห่ง ผลการศึกษาทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณตะกอน และทราบขนาดการไหลที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะและการตกตะกอนในทางน้ำ

นัฐวุฒิ (2535) ศึกษาทดลองสภาพของตะกอน โดยหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณตะกอนแขวนลอย (suspended sediment load) และ ปริมาณตะกอนทั้งหมด (total sediment load) จากการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำที่มีท้องน้ำเป็นทราย วิธีทดลองในห้องปฏิบัติการ ใช้รางน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 20.40 เมตร และลึก 0.75 เมตร มีน้ำปนตะกอนทรายละเอียดไหลเวียน ขนาดของเม็ดทรายที่ใช้เป็นวัสดุท้องน้ำ โดยเฉลี่ยเป็น 0.35 มิลลิเมตร และค่าการเรียงตัวของเม็ดทรายเท่ากับ 1.66 การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของตะกอนทั้งหมด ซึ่งได้จากการเก็บตัวอย่างโดยตรงและจากการทดลอง ส่วนที่สองเป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ที่ได้จากการทดลองกับที่คำนวณได้จากวิธีของ Meyer Peter and Muller (1948) สมการ Engelund and Hansen (1967) สมการ Ackers and White (1973) และสมการ Van Rijn (1985) จากผลการวิเคราะห์ของทราย 9 ขนาด ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอย และปริมาณตะกอนทั้งหมด ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสอง สำหรับตะกอนต่างขนาดกัน ในทางน้ำลักษณะต่าง ๆ โดยมีตัวแปรเป็นความลาดเอียงของท้องน้ำและอัตราการไหล

Fathi-Maghadam and Kouwen (1997) ศึกษาวิเคราะห์ การไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นต้นไม้โดยใช้หลักการของโมเมนตัม สำหรับพิจารณาแรงต้านของต้นพืช ทำการทดลองแบบจำลองทางกายภาพในห้องทดลอง โดยใช้กิ่งไม้แทนต้นพืช 2 ชนิดคือ Pine และ Cedar ติดตั้งในรางน้ำเปิดในลักษณะ โผล่พ้นผิวน้ำ (submergence model) ในการทดสอบนอกจากจะวัดค่าพื้นฐานทางชลศาสตร์แล้ว จะต้องหาค่าแรงต้านของพืชโดยอุปกรณ์ drag force load cell เพื่อหาค่า momentum absorption ของพืชแต่ละชนิด

ผลการศึกษาที่นำมาประยุกต์ใช้กับหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า n กับความเร็วเฉลี่ยและความลึกของพืชแต่ละชนิดดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สัมพันธ์ระหว่างค่า n กับความเร็วเฉลี่ยและความลึกการไหล
จากแบบจำลองการไหลผ่านกิ่งไม้ Pine (บน) และ Cedar (ล่าง)
(Maghadam & Kouwen , 1997)

วัลลภ (2544) ทำการศึกษาปริมาณตะกอนทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ 4 วิธี คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับอัตราการไหล การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณน้ำท่า การหาความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยกับพื้นที่รับน้ำ และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-6 ผลการศึกษาพบว่าปริมาณตะกอนที่ไหลลงสู่อ่างแต่ละวิธีมีค่าเท่ากับ 2.08 ล้านตันต่อปี 1.87 ล้านตันต่อปี 2.01 ล้านตันต่อปี และ 1.64 ล้านตันต่อปี ตามลำดับ เมื่อนำผลแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกับปริมาณตะกอนที่ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตตรวจวัดจริงในสนาม จะพบผลว่าที่ได้จากวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-6 จะใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุด

Fischenich (2000) ศึกษาแรงต้านทานที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านพืช เป็นผลให้เกิดการสูญเสียโมเมนตัม โดยพัฒนาสมการการไหลจากสมการ Linear momentum สมการ Saint-Venant โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ คือ แรงโน้มถ่วง (gravity) แรงดัน (pressure) แรงหน่วง (drag) ความฝืด (friction) และความขรุขระของผิวท้องน้ำ (surface roughness) ผลการศึกษาได้สมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของแมนนิ่ง ในทางน้ำที่มีพืชขึ้นหนาแน่นเป็น 2 กรณี คือ

กรณี พืชจมน้ำบางส่วน (Unsubmerged vegetation)

$$n = K_n R^{2/3} \left[\frac{C_d A_d}{2g} \right]^{1/2} \qquad (2.15)$$

กรณี พืชจมน้ำทั้งหมด (Fully submerged vegetation)

$$n = \frac{K_n R^{1/6}}{\left(\frac{V}{U_*} \right) \sqrt{g}} \qquad (2.16)$$

เมื่อ n = ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดการไหลของแมนนิ่ง
K_n = eddy diffusivity
R = รัศมีชลศาสตร์
C_d = สัมประสิทธิ์แรงหน่วง
A_d = ความหนาแน่นของพืชต่อหน่วยความยาวทางน้ำ
g = ความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
v = ความเร็วการไหล
U_* = friction velocity

Fischer-Antze , Stoesser , Bates and Olsen (2000) ศึกษาการกระจายความเร็วของการไหลในทางน้ำส่วนที่ปกคลุมด้วยพืช โดยได้พัฒนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 แกน (three dimensional numerical model) ซึ่งใช้สมการพื้นฐานของ Navier-Stokes ที่มีการรวมเอาเทอมของสมการแรงหน่วงที่ผิวต้นไม้เข้าไว้ด้วย วิธี simple method และการใช้แบบจำลอง k - ε turbulence ในการวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพของต้นพืชจะให้เป็นทรงกระบอก ตั้งในแนวดิ่งของทิศทางการไหลของน้ำ ผลการศึกษาและสอบเทียบแบบจำลองดังกล่าวในห้องปฏิบัติการพบว่า ความเร็วของการไหลจะมีผลกระทบโดยตรงกับผิวโดยรอบของต้นไม้ ตลอดความสูงของระดับน้ำ