

เรื่อง : รศ.ดร.วราวุธ วุฒินิษฐ์\*

# แบบจำลอง AquaCrop

[A New Version of CROPWAT]

## คำนำ

การชลประทาน คือวิชาเกี่ยวข้องกับการให้น้ำแก่พืช เพื่อให้พืชเจริญเติบโตดีและให้ผลผลิตสูง โดยมีหลักการเบื้องต้นว่า พืชจะให้ผลผลิตสูงมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ให้เพื่อควบคุมความชื้นในดิน ถ้าสามารถควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ระหว่างจุดวิกฤต (Critical Point) และขีดความชื้นชลประทาน (Field Capacity) พืชก็จะไม่เกิดความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ (Water Stress) และจะเจริญเติบโตดี และให้ผลผลิตสูงตามที่คาดไว้ แต่ถ้าพืชได้รับน้ำไม่เพียงพอ ความชื้นในดินต่ำกว่าจุดวิกฤต พืชจะเกิดความเครียด และผลผลิตลดลง รายละเอียดหลักการชลประทานในส่วนนี้เขียนอยู่ในตำรา FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33 (Yield Response to Water) และ No.56 (Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements) และได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CROPWAT เพื่อช่วยคำนวณความต้องการน้ำของพืช ช่วยในการกำหนดการให้น้ำแก่พืชคำนวณหาผลผลิตที่ลดลงเนื่องจากการขาดน้ำ และคำนวณความต้องการน้ำชลประทานของโครงการ CROPWAT เป็นโปรแกรมที่เป็นที่รู้จักกันดี

\* ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ในปี พ.ศ. 2555 FAO ได้นำเสนอแนวคิดใหม่เกี่ยวกับการประเมินผลผลิตพืช และได้พัฒนาโปรแกรมชุดใหม่ชื่อ AquaCrop ซึ่งถือเป็น A New Version of CROPWAT พร้อมเขียนตำราเกี่ยวกับการคำนวณหาผลผลิตพืชเล่มใหม่คือ Crop Yield Response to Water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66) ซึ่งเพิ่มเนื้อหาในรายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้พืชเกิดความเครียด และเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายน้ำ (Transpiration) กับชีวมวล (Biomass) ของพืช และสุดท้ายผลผลิตพืชจะขึ้นอยู่กับชีวมวล และดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index) แบบจำลอง AquaCrop นำเสนอเนื้อหาซึ่งต่างจากหลักการชลประทานแบบเดิมที่ใช้สอนกันในปัจจุบันและที่ใช้ในโปรแกรม CROPWAT ซึ่งพิจารณาว่าผลผลิตพืชขึ้นอยู่กับค่า ET ของพืชเป็นสำคัญ แต่ใน AquaCrop ได้พิจารณาว่าผลผลิตพืชแปรผันตามค่าชีวมวล (Biomass) ของพืช และค่าชีวมวลขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำ (Transpiration Rate) แต่ไม่ขึ้นอยู่กับการระเหย (Evaporation) สมการผลผลิตในแบบจำลอง CROPWAT และ AquaCrop แสดงเปรียบเทียบอยู่ในตารางที่ 1

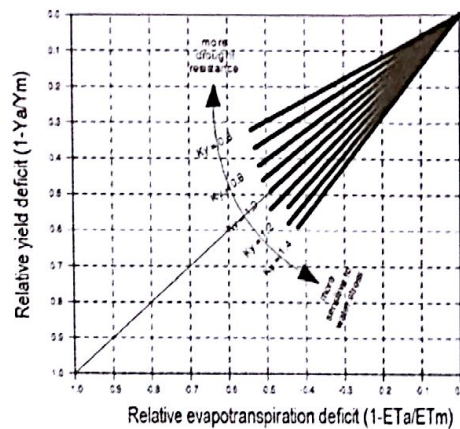
ตารางที่ 1 สมการในการคำนวณผลผลิตพืชของ CROPWAT และ AquaCrop

| สมการผลผลิตใน CROPWAT*                                                                                                      | สมการผลผลิตใน AquaCrop **                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)$                                                 | $Y = HI(B)$<br>$B = WP(\sum Tr)$                                                                                                      |
| $Y_a$ = Actual Yield<br>$Y_m$ = Maximum Yield<br>$ET_a$ = Actual ET<br>$ET_m$ = Maximum ET<br>$K_y$ = Yield Response Factor | $Y$ = Crop Yield<br>$HI$ = Harvest Index<br>$B$ = Biomass<br>$WP$ = Water Productivity Parameters<br>$\sum Tr$ = Sum of Transpiration |
| *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33                                                                                   | **FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66                                                                                            |

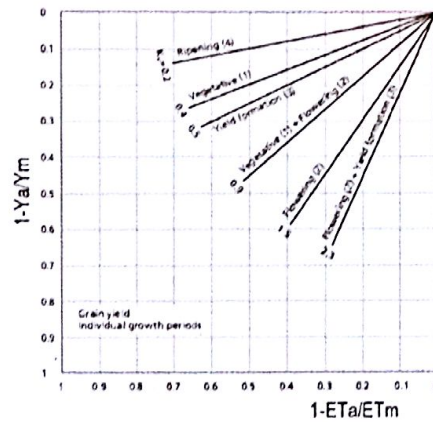
## การเปลี่ยนจากค่า $K_y$ เป็นแบบจำลอง AquaCrop

AquaCrop เป็นเวอร์ชันใหม่ของ CROPWAT ที่สามารถจำลองอิทธิพลของการขาดน้ำต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช โดยเน้นพืชที่เป็นไม้ล้มลุก (Herbaceous Crops) แบบจำลอง AquaCrop มีเนื้อหารายละเอียดในการคำนวณผลผลิตมากกว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ การตอบสนองของผลผลิต ( $K_y$ ) ในการคำนวณผลผลิตจากสมการ  $\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)$  ตามเนื้อหาใน FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33 (Yield Response to Water) ตามแนวคิดนี้ ค่า  $K_y$  พืชที่ทนต่อการขาดน้ำจะมีค่า  $K_y$  ต่ำ ขณะที่

พืชที่ไวต่อการขาดน้ำจะมีค่า  $K_y$  สูง และสำหรับพืชชนิดเดียวกันการขาดน้ำในช่วงการเจริญเติบโตต่างๆ จะมีผลต่อผลผลิตแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



ค่า  $K_y$  รายฤดูกาลสำหรับพืชที่ทนต่อการขาดน้ำ และพืชที่ไวต่อการขาดน้ำ



ค่า  $K_y$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงการเจริญเติบโตของพืช

**รูปที่ 1** ค่า  $K_y$  แสดงถึงสัมพันธเชิงเส้นระหว่างฟังก์ชันผลผลิต (Water Production Function) และระดับการขาดน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและช่วงการเจริญเติบโตของพืช

แบบจำลอง AquaCrop ได้เสนอแนวคิดใหม่ว่า ความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำจะมีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช 3 ระดับคือ (1) ความเครียดจะมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของลำต้น และใบพืช (Canopy Expansion Rate) การปิดเปิดของปากใบ (Stomatal Closure) และการหยุดการเจริญเติบโตของต้นพืช (Senescence Acceleration) นอกจากการขาดน้ำแบบจำลอง AquaCrop ยังได้พิจารณาถึงอิทธิพลของระดับความเค็ม (Salinity) และความอุดมสมบูรณ์ (Fertility) ของดินในเขตรากต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตพืชเช่นกัน

แบบจำลอง AquaCrop ต้องการข้อมูลที่สำคัญ 4 ส่วนคือ

- (1) ข้อมูลภูมิอากาศ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิอากาศ ค่าอัตราการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_0$ ) ปริมาณฝนรายวันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ
- (2) ข้อมูลดินซึ่งประกอบด้วยสมมูลน้ำและสมมูลของเกลือในเขตราก
- (3) ข้อมูลพืชซึ่งประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์การปกคลุมดินของลำต้น และ ใบพืช (Canopy Cover) การเจริญเติบโตของราก ผลผลิตภาพน้ำในรูปของชีวมวล (Biomass Water Productivity)
- (4) ข้อมูลการจัดการ ซึ่งประกอบด้วยการให้น้ำ การให้ปุ๋ย และการคลุมหน้าดิน (Mulching) การจัดการน้ำและการเพาะปลูกในแปลง



ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง AquaCrop คือผลการจำลองการเจริญเติบโตของพืช ที่นำไปใช้ในการคาดการณ์ค่าชีวมวลของพืช และค่าผลผลิตพืชในสภาพภูมิอากาศ สภาพดิน สภาพการจัดการน้ำและการจัดการระบบการเพาะปลูกต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกด้วย จึงนับได้ว่า AquaCrop เป็นแบบจำลองที่น่าสนใจในการนำมาใช้ในการวางแผนการปลูกพืช และการให้น้ำชลประทานในสภาพที่ขาดน้ำ ซึ่งกำลังเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศ

อย่างไรก็ตามการนำ AquaCrop มาประยุกต์ใช้กับประเทศไทย ควรต้องมีการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำและเนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ โดยใช้ข้อมูลจากแปลงเพาะปลูกจริง

## แนวคิดของแบบจำลอง AquaCrop

จากแนวคิดเดิม (FAO 33) ในการคำนวณผลผลิตพืชที่ว่าผลผลิตพืชมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า ET แบบจำลอง AquaCrop ได้ทำการแยกค่า E (Non-Productive Soil Evaporation) ออกจากค่า T (Productive Crop Transpiration) ซึ่งต่อไปจะใช้ด้วยย่อ Tr แทน T แบบจำลอง AquaCrop พัฒนาจากแนวคิดที่ว่าเทอม Tr มีผลต่อการผลิตชีวมวลของพืช ส่วนเทอม E ไม่มีผลต่อการผลิตชีวมวลของพืช ซึ่งแนวคิดนี้ต่างจากแนวคิดเดิม และถือเป็นส่วนสำคัญของกลไกการจำลองการเจริญเติบโตของพืช (Growth Engine) ในแบบจำลอง AquaCrop เมื่อทราบ Tr จะสามารถคำนวณหาค่าชีวมวลได้จากสมการ

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (1)$$

เมื่อ B = ค่าชีวมวลของพืช ( $\text{kg/m}^2$ )

Tr = ปริมาณการคายน้ำของพืช (mm. or  $\text{m}^3/\text{area}$ )

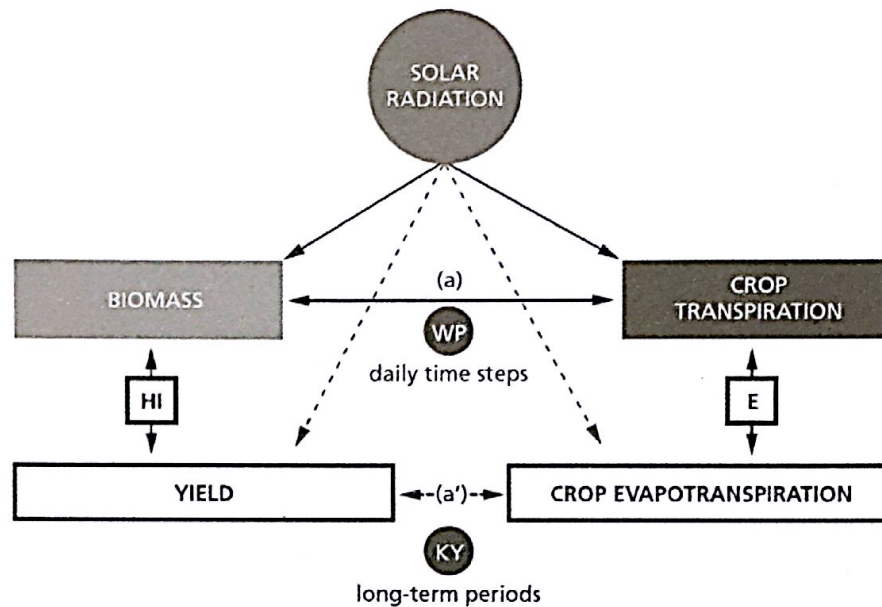
WP = Water Productivity Parameter ( $\text{kg/m}^2/\text{mm}$  or  $\text{kg/m}^2/\text{m}^3$  ของปริมาณการคายน้ำของพืช)

สำหรับพืชทั่วไป ชีวมวลของพืช (B) บางส่วนจะถูกเก็บเกี่ยวเป็นผลผลิต (Yield, Y) และอัตราส่วนของผลผลิตต่อชีวมวล คือดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index, HI)

$$Y = HI \cdot \sum B \quad (2)$$

การแยกเทอม Y ออกเป็น B และ HI จะทำให้สามารถพิจารณาอิทธิพลของสภาพแวดล้อม และความเครียดที่มีผลต่อค่าชีวมวลและต่อค่า HI แยกกันได้

แนวคิดของแบบจำลอง AquaCrop แสดงอยู่ในรูปที่ 2 ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมการที่ 1 และ 2 ในรูปจะเห็นได้ว่ารังสีอาทิตย์จะมีผลต่อทุกส่วนของระบบการปลูกพืช ทั้งการคายน้ำ ค่า ET การผลิตชีวมวล และผลผลิตของพืช ส่วนการคายน้ำของพืชในแต่ละวันจะมีผลต่อการผลิตชีวมวลของพืช และชีวมวลของพืชจะมีผลต่อผลผลิตพืชอีกทีหนึ่ง ขณะที่แนวคิดตามแบบเดิม ET จะมีผลต่อผลผลิตพืชเหมือนกัน แต่เป็นผลในช่วงเวลายาวนาน (Long Term Period) ไม่ใช่ช่วงเวลาเป็นวัน



รูปที่ 2 แบบจำลอง AquaCrop

## การเจริญเติบโตของลำต้นและใบในการปกคลุมดิน (Canopy Development)

ส่วนของลำต้นและใบในการปกคลุมดิน (Canopy Cover, CC) คือหัวใจสำคัญของแบบจำลอง AquaCrop ลำต้นและใบพืชจะเจริญเติบโต (Development) แก่ (Ageing) และหมดสภาพ (Senescence) พร้อมกับมีผลต่อการสังเคราะห์แสง การคายน้ำ และการผลิตชีวมวลของพืช ค่า CC ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 50% แรกของการปกคลุมดิน จะอยู่ในรูปของสมการ Exponential ดังนี้

$$CC = CC_0 e^{-GGC.t} \quad (3)$$

เมื่อ CC = สัดส่วนการปกคลุมดินของลำต้นและใบที่เวลา t

CC<sub>0</sub> = ค่า Initial CC ที่ t = 0 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ



$$CC_0 = cc_0 \cdot PD \quad (4)$$

$cc_0$  = ค่าเฉลี่ยในการปกคลุมดินของพืช 1 ต้น ที่ 90 % ของการงอกของเมล็ด (Mean Canopy Size per Plant at the Time of 90% emergence) ( $m^2/1$  plant)

$PD$  = ความหนาแน่นต้นพืช (Plant Density) (No. of plants/ $m^2$ )

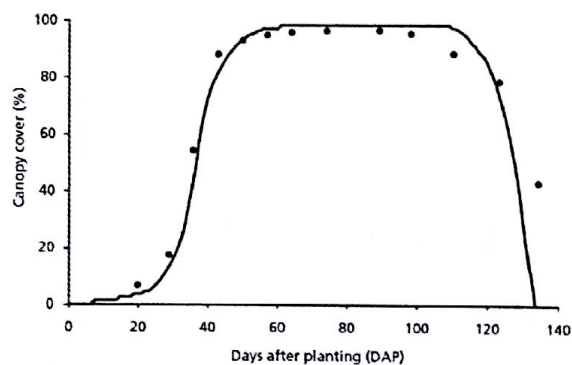
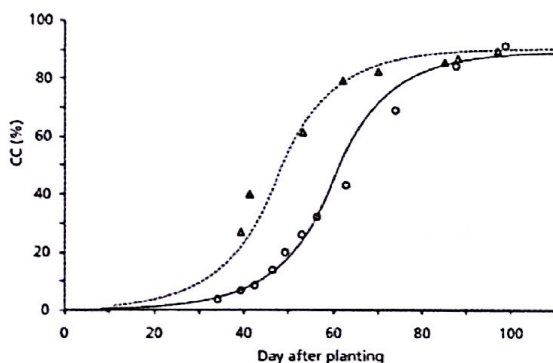
$CGC$  = ส.ป.ส.การเจริญเติบโตของลำต้นและใบในการปกคลุมดิน (Canopy Growth Coefficient)

เมื่อการปกคลุมดินมากกว่า 50% การสังเคราะห์แสงและการคายน้ำจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่น้อยกว่าการปกคลุมดินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากทรงพุ่มจะซ้อนทับกัน ค่า  $CC$  ในช่วง 50% หลังจะต่างจากช่วงแรก ดังนั้น เมื่อ  $CC > 0.5CC_x$  สมการ  $CC$  จะเปลี่ยนเป็น

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0)e^{-CGC \cdot t} \quad (5)$$

เมื่อ  $CC_x$  = สัดส่วนการปกคลุมดินสูงสุด (Maximum Canopy Cover) ภายใต้สภาวะการปลูกพืชที่เหมาะสม

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างค่า  $CC$  ของฝ้ายและข้าวโพดที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (5) เปรียบเทียบกับค่า  $CC$  ที่มีการตรวจวัดได้ ในรูปที่ 3(b)  $CC=0$  เมื่อเข้าสู่ช่วง Senescence



- (a) ค่า  $CC$  ของฝ้ายที่คำนวณได้กับค่า  $CC$  ที่ตรวจวัดไว้สำหรับ ฝ้ายที่มีความหนาแน่น 6 และ 25 ต้น/ม.2
- (b) ค่า  $CC$  ของข้าวโพดฝ้ายที่คำนวณได้กับ ค่า  $CC$  ที่ตรวจวัดไว้ตลอดอายุการเจริญเติบโต

**รูปที่ 3** ตัวอย่างค่า  $CC$  ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับ ค่า  $CC$  ที่ตรวจวัดไว้

## การคายน้ำของพืช (Crop Transpiration)

ปริมาณการคายน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะขึ้นอยู่กับค่า CC ถ้าพืชไม่เกิดความเครียดจนปิดปากใบ แบบจำลอง AquaCrop จะคำนวณหาปริมาณการคายน้ำ (Transpiration,  $T_r$ ) จากค่า  $ET_o$  โดยสมการ

$$T_r = (f_{age} \cdot K_{c,Trx}) ET_o \cdot CC \quad (6)$$

เมื่อ  $T_r$  = ปริมาณการคายน้ำของพืช

$ET_o$  = ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง

CC = ส่วนของลำต้นและใบที่ปกคลุมดิน

$K_{c,Trx}$  = ส.ป.ส.การคายน้ำของพืช เมื่อ CC เข้าใกล้ 1.0 หรือ Full Canopy Cover และพืชไม่มีความเครียด

$f_{age}$  = ส.ป.ส.การแก่ตัวของพืช (Ageing Coefficient)

หลังจากพืชปกคลุมดินเต็มที่ ( $CC = CC_X$ ) ก่อนเข้าสู่สภาวะหมดสภาพ การปกคลุมดินจะค่อยๆ ลดลง และมีผลทำให้การคายน้ำและการสังเคราะห์แสงลดลง แบบจำลองจะใช้ค่า ส.ป.ส. การแก่ตัว (Ageing Coefficient) เป็นค่าคงที่คูณกับค่า  $K_{c,Trx}$  เพื่อลดอัตราการคายน้ำประมาณ 0.3% ต่อวัน และเมื่อเข้าสู่สภาวะหมดสภาพ อัตราการคายน้ำและการสังเคราะห์แสงจะลดลงอย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดความเครียด พืชจะลดปริมาณการคายน้ำและการสังเคราะห์แสง ซึ่งมีผลทำให้การผลิตชีวมวลและผลผลิตพืชลดลง

## การผลิตชีวมวล (Biomass Production)

ค่าผลิตภาพของน้ำในการผลิตชีวมวลพืช (Biomass Water Productivity, WP) คือ กลไกสำคัญของแบบจำลองในการคำนวณหาชีวมวล ต้องมีการปรับค่า WP เป็นค่าปกติ (Normalized Value) โดยการปรับค่า  $T_r$  ด้วย  $ET_o$  และปรับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ด้วยค่า  $CO_2$  ที่เหมาะสม ค่า WP ที่ปรับเป็นค่าปกติต่อไปจะเรียกว่า  $WP^*$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$WP^* = \left[ \frac{B}{\sum \left( \frac{T_r}{ET_o} \right)} \right]_{CO_2} \quad (7)$$

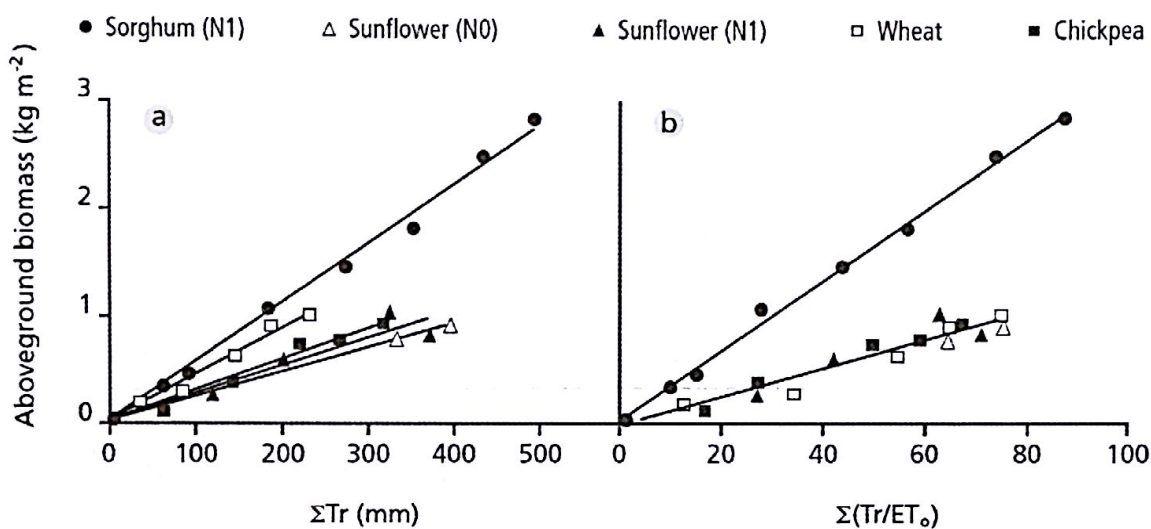
เมื่อ  $WP^*$  = ค่าปกติ (Normalized Value) ของ WP ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ  $CO_2$

B = ค่าชีวมวลของพืชมีหน่วยเป็น  $kg/m^2$

$\sum (T_r/ET_o)$  = ค่าปกติสะสม (Cumulative Normalized Value) ของปริมาณการคายน้ำตลอดช่วงเวลาที่มีการผลิตชีวมวล (B)

จากสมการจะเห็นได้ว่า B จะเพิ่มขึ้นตามค่า  $WP^*$  และ ค่าปกติสะสมของ  $\Sigma(T_r/ET_o)$

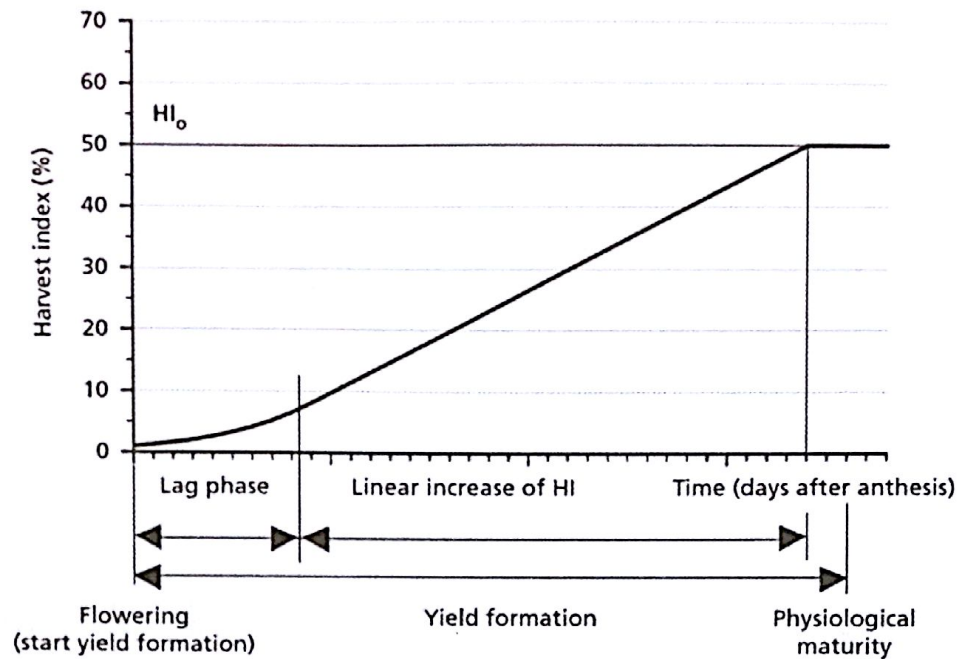
รูปที่ 4(a) แสดงให้เห็นว่าชีวมวลแปรผันเป็นเส้นตรงกับค่าปริมาณการคายน้ำสะสม  $\Sigma(T_r)$  และชนิดของพืช ความลาดชัน (Slope) ของกราฟทั้ง 5 เส้น แสดงค่า  $WP$  ของพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน รูปที่ 4(b) แสดงให้เห็นว่าค่าชีวมวลของพืชจะแปรผันตามค่าปกติสะสมของปริมาณการคายน้ำ  $\Sigma(T_r/ET_o)$  เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4(a) แต่จะได้กราฟเพียง 2 เส้น พืช 3 ชนิด ที่มีค่าปริมาณการคายน้ำสะสมน้อย เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าปกติสะสมของปริมาณการคายน้ำ  $\Sigma(T_r/ET_o)$  แล้วจะรวมเป็นกลุ่มเดียวกัน แสดงว่าพืชทั้ง 3 ชนิดมีค่า  $WP^*$  ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4 การหาค่าผลิตภาพของน้ำในการผลิตค่าชีวมวล (Biomass Water Productivity)

## ผลผลิตที่คาดว่าจะได้รับ (Harvestable Yield)

แบบจำลอง AquaCrop จะคำนวณหาผลผลิตพืชจากค่าชีวมวล(B) โดยการคูณค่าชีวมวล B ด้วยค่าดัชนีการเก็บเกี่ยว HI ตามสมการที่ (2) ค่า HI สำหรับพืชจำพวกไม้ผลหรือธัญพืช จะแปรผันตามอัตราส่วนของชีวมวลของผลไม้หรือเมล็ดธัญพืชต่อค่าชีวมวลทั้งหมดของพืชนั้น ดังนั้นค่า HI จึงเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์เมื่อเริ่มเข้าช่วงออกดอก (Flowering) และจะเพิ่มเป็นเส้นตรงจนถึงช่วงก่อนที่พืชเจริญเติบโตเต็มที่ (Physiological Maturity) ซึ่ง HI จะมีค่าสูงสุด ค่า HI ที่จุดนี้เรียกว่าดัชนีเก็บเกี่ยวอ้างอิง (Reference Harvest Index, H<sub>IO</sub>) ดังรูปที่ 5 สำหรับพืชประเภทกินหัว (Root/Tuber) ค่า HI คืออัตราส่วนของชีวมวลของหัวหรือรากต่อชีวมวลทั้งหมดของพืชนั้น



รูปที่ 5 ดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index)

## การจัดการ (The Management)

แบบจำลอง AquaCrop สามารถจำลองการจัดการระบบการปลูกพืชโดยแบ่งการจัดการออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การจัดการน้ำชลประทาน (Irrigation Management) ซึ่ง AquaCrop สามารถจำลองได้อย่างครบถ้วน และ (2) การจัดการแปลงเพาะปลูก (Field Management) สามารถจำลองได้เฉพาะบางองค์ประกอบเท่านั้น ยังไม่ครบถ้วนสมบูรณ์เหมือนการจำลองการจัดการน้ำชลประทาน

### 1. การจัดการน้ำชลประทาน

แบบจำลอง AquaCrop สามารถจำลองการจัดการน้ำชลประทานได้ทั้งระบบเกษตรน้ำฝน และระบบเกษตรชลประทาน ในส่วนของระบบเกษตรชลประทาน ผู้ใช้สามารถเลือกวิธีการให้น้ำ และวิธีการกำหนดการให้น้ำแก่พืช

วิธีการให้น้ำ สามารถเลือกให้น้ำแบบผิวดิน สปริงเกอร์ น้ำหยดและแบบให้น้ำทางใต้ผิวดิน

วิธีการกำหนดการให้น้ำแก่พืช สามารถกำหนดระยะเวลาการให้น้ำ กำหนดปริมาณและคุณภาพน้ำที่ให้ หรือกำหนดระดับความชื้นที่ยอมให้พืชนำเอาไปใช้ได้

### 2. การจัดการแปลงเพาะปลูก

การจัดการในส่วนนี้ประกอบด้วย (1) ความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Fertility) (2) การปกคลุมดิน (Mulching) และ (3) การกำหนดระดับความสูงของคันนา (Soil Bund)



อย่างไรก็ตาม AquaCrop ไม่ได้จำลองผลของความอุดมสมบูรณ์ของดินต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตโดยตรงเพียงแต่ใช้ค่าความอุดมสมบูรณ์ของดินปรับแก้ค่าพารามิเตอร์พืชที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตเท่านั้น ค่าพารามิเตอร์ที่มีการปรับแก้ได้แก่ (1) CGC; (2) CC<sub>x</sub>; (3) CC และ (4) WP\*

การปกคลุมดิน จะมีผลทำให้การระเหยของน้ำจากผิวดินในพื้นที่เพาะปลูกลดลงตามสัดส่วนการปกคลุมและคุณภาพวัสดุที่ใช้

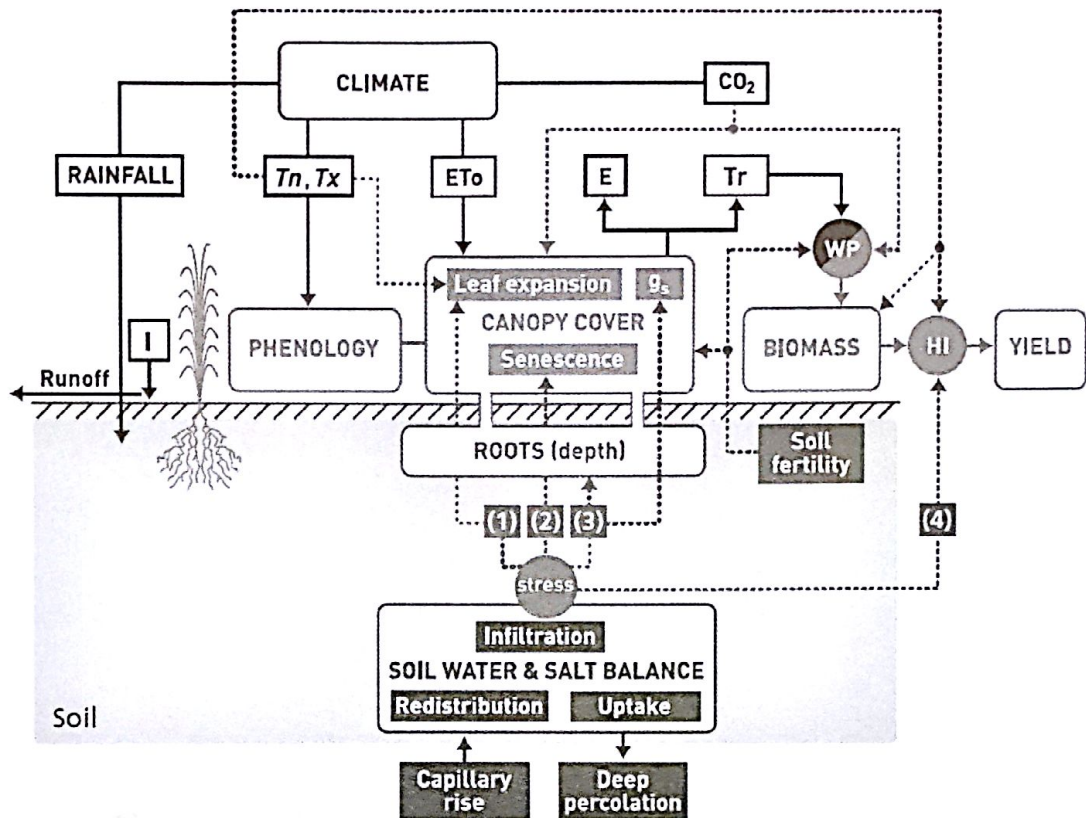
ความสูงของคันดิน จะช่วยลดการสูญเสียน้ำเนื่องจากการไหลเลยท้ายแปลงเพาะปลูก (Runoff) ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำฝนและน้ำชลประทาน ซึ่งเหมาะกับการปลูกพืชที่ทนน้ำท่วมขังได้ เช่น ข้าว เป็นต้น

## พลวัตในการตอบสนองของพืชต่อความเครียดในแบบจำลอง AquaCrop

ความเครียดของพืชเนื่องจากการขาดน้ำและอุณหภูมิ จะมีผลกระทบทางลบอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช ต่อการผลิตชีวมวลและผลผลิต ผลกระทบจะรุนแรงมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการขาดน้ำ ระดับความรุนแรงและความยาวนานของการขาดน้ำ นอกจากนี้ความเข้มข้นของเกลือในเขตราก ความอุดมสมบูรณ์ที่อยู่ในระดับต่ำ ก็ก่อให้เกิดความเครียดต่อพืชได้เช่นเดียวกัน แต่ผลกระทบอาจไม่รวดเร็วเท่ากับการขาดน้ำ

แบบจำลอง AquaCrop ถูกออกแบบให้สามารถจำลองการตอบสนองของพืชต่อการขาดน้ำเป็นอันดับแรก แต่ก็สามารถจำลองผลกระทบของอุณหภูมิได้ แบบจำลอง AquaCrop ไม่สามารถจำลองสมดุลของสารอาหาร (Nutrient Balance) ในเขตรากต่อการเจริญเติบโตของพืชได้โดยตรง แต่สามารถคำนวณผลของการขาดสารอาหารและอิทธิพลของเกลือในเขตรากต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตได้

องค์ประกอบของแบบจำลอง AquaCrop ซึ่งเกี่ยวกับการตอบสนองของพืชต่อความเครียด แสดงอยู่ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รายละเอียดแบบจำลอง AquaCrop

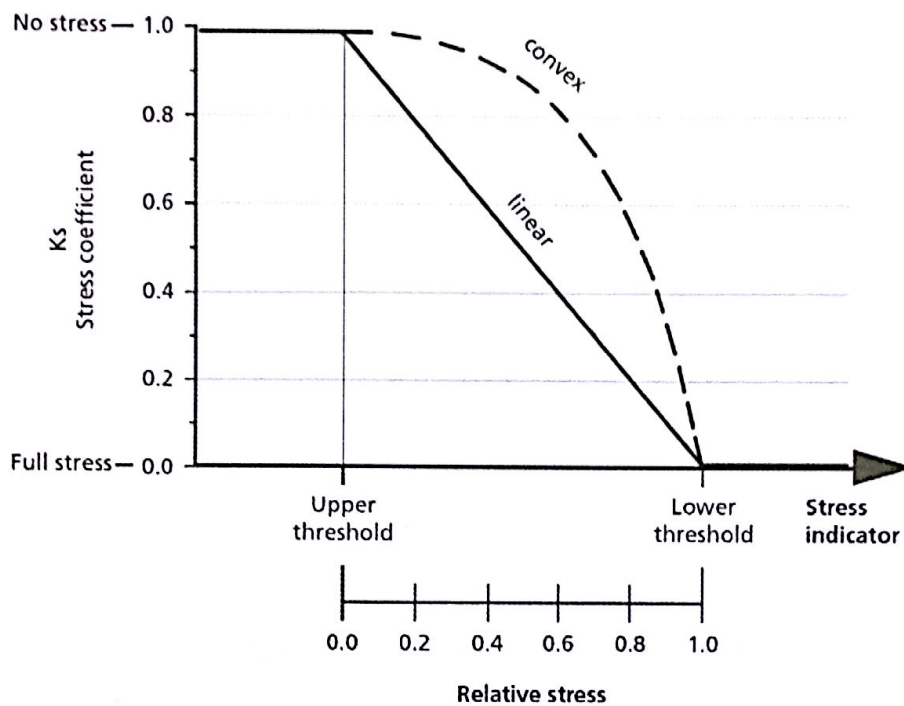
รูปที่ 6 แสดงองค์ประกอบของระบบดิน พืชและบรรยากาศที่ต่อเนื่องกัน แบบจำลอง AquaCrop จำลองสมดุลพลังงาน สมดุลน้ำและเกลือในเขตราก วิเคราะห์ผลกระทบของดินที่มีธาตุอาหารระดับต่ำต่อการเจริญเติบโตของพืชพร้อมแสดงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อซีฟลักซ์ของพืช (Phenology) ส่วนของพืชที่ปกคลุมดิน (Canopy Cover) การคายน้ำชีวมวลและสุดท้ายต่อผลผลิตพืช เส้นที่แสดงการเชื่อมโยงขององค์ประกอบต่างๆ เส้นประแสดงผลกระทบ (Feedback) สัญลักษณ์  $I$ ,  $T_n$ ,  $T_x$ ,  $E$ ,  $T_r$ ,  $ET_o$ ,  $g_s$ ,  $WP$ ,  $HI$ , และ  $CO_2$  แทนการชลประทาน อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด การระเหย การคายน้ำ การใช้น้ำของพืชอ้างอิง การปิดเปิดปากใบ ผลผลิตภาพของน้ำ ดัชนีการเก็บเกี่ยว และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ หมายเลข (1), (2), (3) และ (4) แสดงฟังก์ชันการตอบสนองของพืชต่อความเครียดที่มีต่อการเจริญเติบโตทางใบ (Leaf Expansion) การหมดสภาพของพืช (Senescence) การปิดเปิดปากใบ และต่อค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวผลผลิต ตามลำดับ

ฟังก์ชันการตอบสนองของพืชต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ (Water Stress Response Function)

พืชจะเกิดความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำเมื่อความชื้นในเขตรากลดลงถึงจุดวิกฤติ (Critical Point) หรือเมื่อ RAW (Readily Available Water) ถูกพืชดูดเอาไปใช้หมดแล้ว จุดนี้ถือเป็นขีดบนของความเครียด



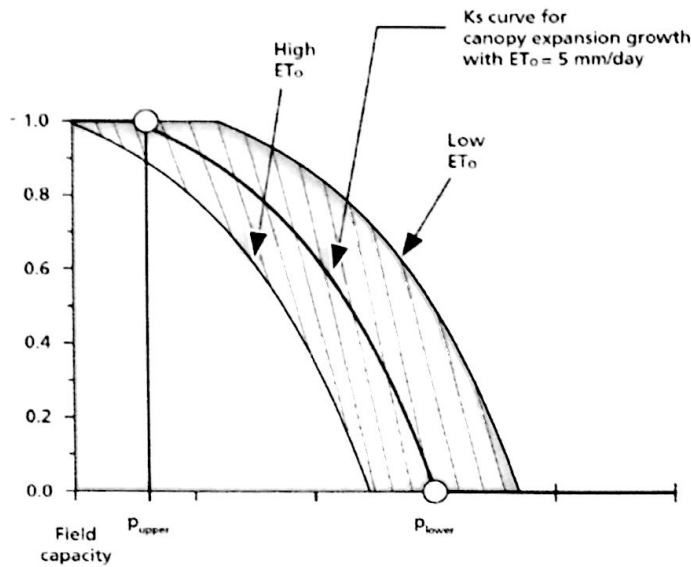
(Upper Threshold, pupper) ค่า ส.ป.ส.ความเครียด ( $K_s$ ) ที่จุดนี้ยังคงมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อความชื้นในดินลดลงต่ำกว่าจุดนี้  $K_s$  จะมีค่าลดลง จนมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความชื้นลดลงไปถึงจุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent Wilting Point) ซึ่งถือว่าเป็นขีดล่างของความเครียด (Lower Threshold, plower) ดังรูปที่ 7 พังค์ชันความเครียดอาจเป็นเส้นโค้งขึ้น (Convex) หรือเส้นตรง (Linear) ขึ้นอยู่กับว่าพืชสามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะการขาดน้ำได้มากน้อยเท่าใด พังค์ชันที่เป็นเส้นโค้งขึ้นแสดงว่าพืชปรับตัวได้ดีกว่า



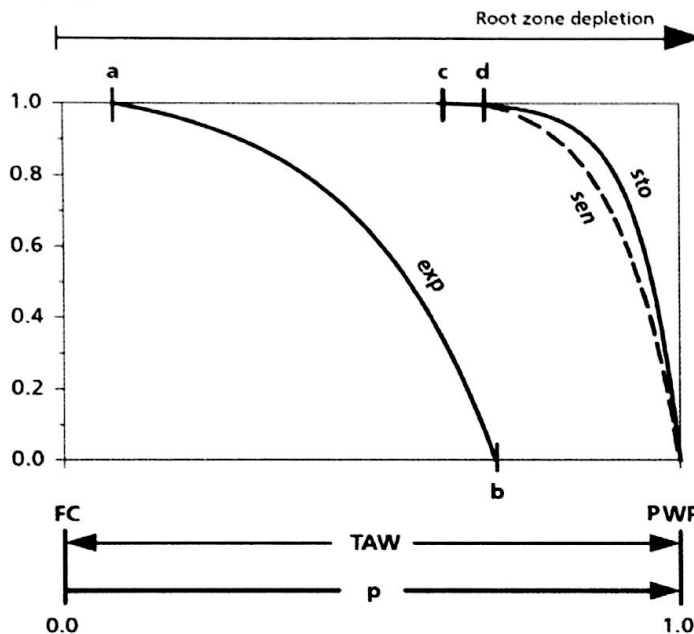
รูปที่ 7 พังค์ชันการตอบสนองของพืชต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ

รูปที่ 8 แสดงพังค์ชันการตอบสนองของพืชต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำสำหรับช่วงการเจริญเติบโตทางใบ (Leaf Expansion) กราฟเส้นกลางแสดงความเครียดเมื่อค่า  $E_{To}$  เท่ากับ 5 มม./วัน ถ้าค่า  $E_{To}$  เพิ่มค่า พืชจะมีความเครียดเพิ่มขึ้นดังกราฟเส้นซ้ายมือ ( $K_s$  เพิ่มขึ้นที่ระดับความชื้นในดินเท่ากัน) ในทางกลับกันถ้า  $E_{To}$  ลดลง พืชจะมีความเครียดลดลงดังกราฟเส้นขวามือ

รูปที่ 9 พังค์ชันการตอบสนองของพืชต่อความเครียด เนื่องจากการขาดน้ำของข้าวโพดสำหรับช่วงการเจริญเติบโตทางใบ (Leaf Expansion, exp) การหมดสภาพ (Canopy Senescences, sen) และการปิดเปิดปากใบ (Stomatal Conductance, sto) จุด a และ b คือขีดบนและขีดล่างของความเครียดต่อการเจริญเติบโตทางใบ ขณะที่จุด c และ d คือขีดบนของความเครียดต่อการหมดสภาพและการปิดเปิดปากใบตามลำดับ ขีดล่างจะอยู่ที่จุดเหี่ยวเฉาอย่างถาวร



รูปที่ 8 พังค์ชันการตอบสนองของพืช  
ต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ  
สำหรับช่วงการเจริญเติบโตทางใบ  
(Leaf Expansion)



รูปที่ 9 พังค์ชันการตอบสนองของพืช  
ต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำของ  
ข้าวโพดสำหรับช่วงการเจริญเติบโตทางใบ  
(Leaf Expansion, exp)  
การหมดสภาพ  
(Canopy Senescences, sen)  
และการปิดเปิดปากใบ  
(Stomatal Conductance, sto)

รูปที่ 10 แสดงแฟกเตอร์ตัวคูณค่า  $HI_0$  อันเป็นผลจากความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ เมื่อความชื้นลดลงถึงจุดหนึ่งพืชจะเกิดความเครียดและลดการเจริญเติบโต แต่ถ้าความชื้นลดลงอีก ความเครียดจะเพิ่มขึ้นจนพืชต้องปิดปากใบ และมีผลต่อค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวอ้างอิง  $HI_0$  โดยต้องปรับค่า  $HI_0$  โดยการคูณด้วย  $f_{HI}$  จากรูปที่ 10

รูปที่ 11 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าส.ป.ส. ความเครียด ( $K_s$ ) ของพืช  $K_{s_{pol,c}}$  คือค่า ส.ป.ส. ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิอากาศต่ำเกินไปในช่วงที่พืชผสมเกสรและ  $K_{s_{pol,h}}$  คือค่า ส.ป.ส. ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิอากาศสูงเกินไปในช่วงที่พืชผสมเกสร

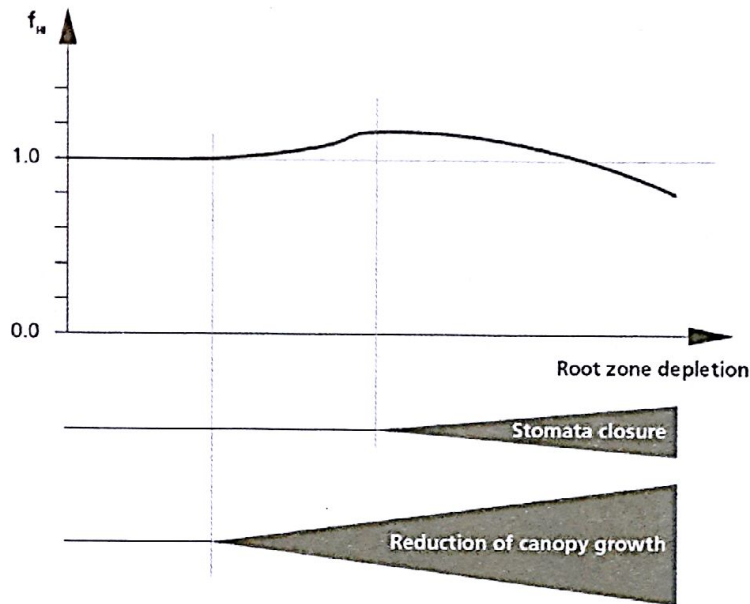
รูปที่ 12 แสดงผลของความอุดมสมบูรณ์ต่อการปกคลุมดินเนื่องจากดินขาดความอุดมสมบูรณ์ ค่า ( $\alpha$ )



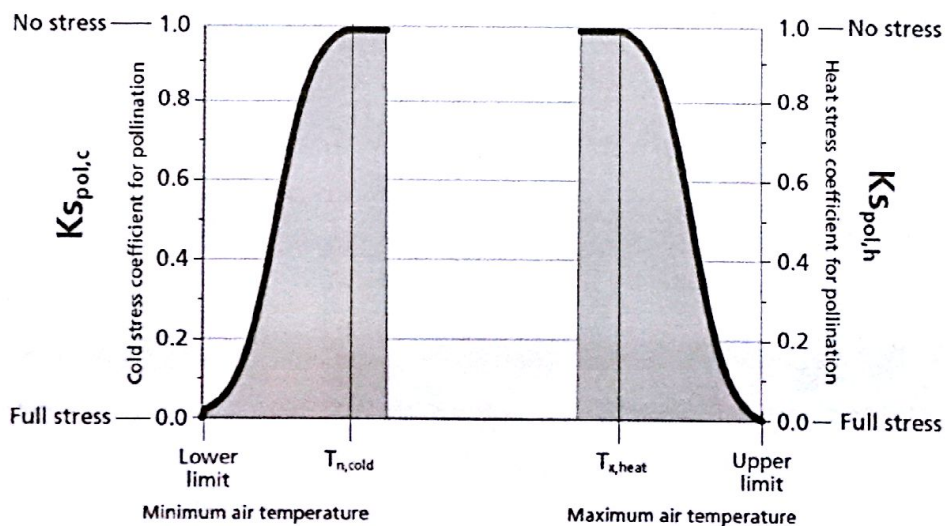
ในรูปคือค่าการปกคลุมผิวดินสูงสุดที่ลดลง ค่า (b) คือช่วงเวลาที่การเจริญเติบโตเพื่อการปกคลุมผิวดินช้าลง และค่า (c) คือการลดการปกคลุมผิวดินอย่างต่อเนื่องหลังจากผ่านจุดสูงสุด

รูปที่ 13 แสดงผังจำลองการตอบสนองของพืชต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ เส้นประแสดงกระบวนการเจริญเติบโตของพืชที่ได้รับผลกระทบจากความเครียด ซึ่งได้แก่ (a) การขยายการปกคลุมดิน (b) การปิดปากใบ (c) การหมดสภาพก่อนกำหนด (d) การปรับดัชนีการเก็บเกี่ยว (e) การขยายตัวของราก

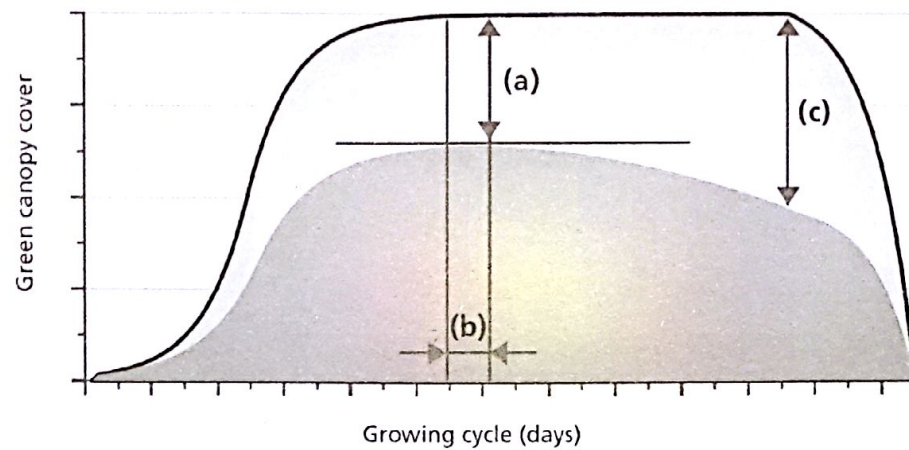
## การรับโปรแกรม AquaCrop



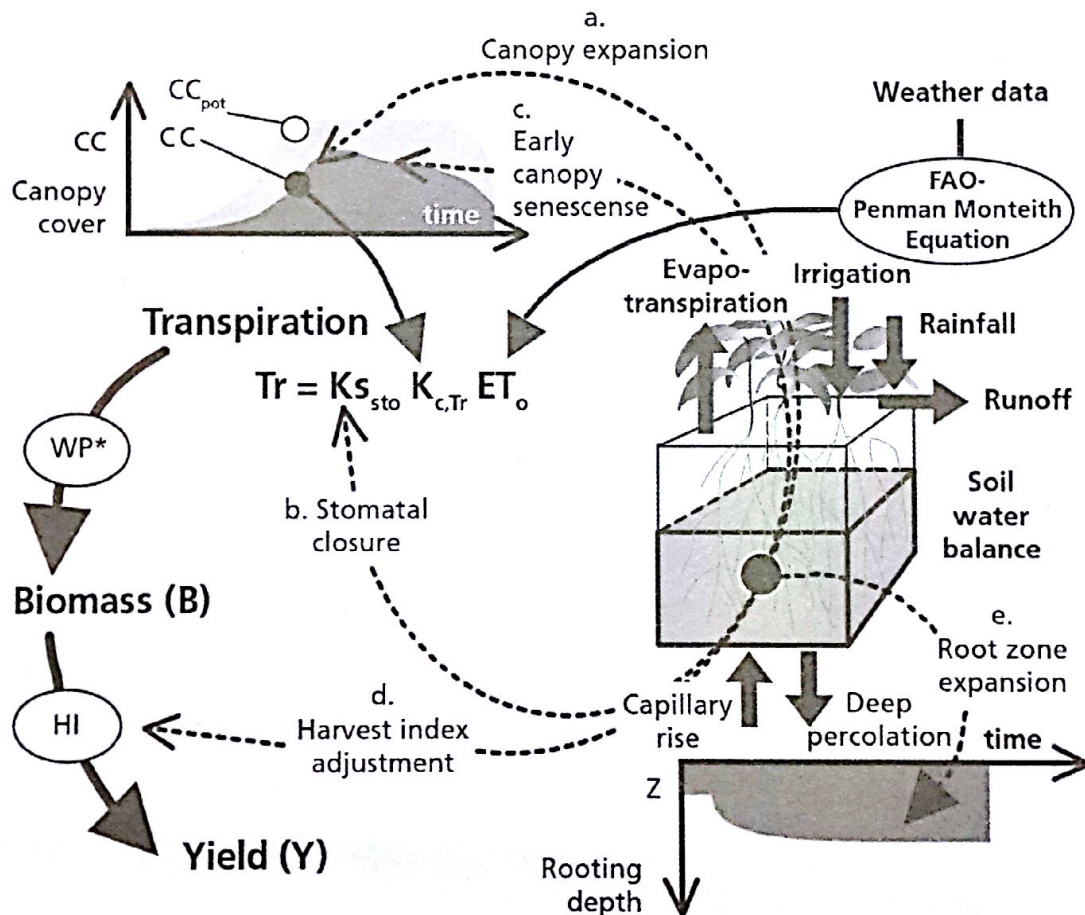
รูปที่ 10 ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณค่า  $H_{10}$  อันเป็นผลจากความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ



รูปที่ 11 ค่า ส.ป.ส.ความเครียด ( $K_s$ ) เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงผสมเกสร (Pollination)



รูปที่ 12 ผลของความอุดมสมบูรณ์ต่อการปกคลุมดินเนื่องจากดินขาดความอุดมสมบูรณ์



รูปที่ 13 ฝั่งจำลองการตอบสนองของพืชต่อความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำ



โปรแกรม AquaCrop มีชื่อเต็มว่า Crop Water Productivity Model Version 4.0 พัฒนาขึ้นโดย FAO ในปี 2012 ผู้สนใจสามารถ Download โปรแกรมและคู่มือ ได้ที่ <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> เมนูหลักของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 14 คือ

ส่วนที่ 1 สำหรับป้อนข้อมูล Environment and Crop ซึ่งประกอบด้วย 4 เมนูย่อย คือ Climate, Crops, Management และ Soil ผู้ใช้สามารถเรียกดูไฟล์ข้อมูลเดิม หรือสร้างไฟล์ข้อมูลใหม่ได้

ส่วนที่ 2 สำหรับการจำลอง (Simulation) หรือรันโปรแกรม โดยผู้ใช้งานต้องป้อนช่วงระยะเวลาที่ต้องการจำลอง (Simulation Period) และป้อนข้อมูลเริ่มต้น (Initial Conditions) ของค่าความชื้นในดิน เมื่อป้อนเสร็จแล้วสามารถกด RUN ก็จะได้ผลการจำลองดังตัวอย่างบางส่วนในรูปที่ 15 และ 16

ส่วนที่ 3 ส่วนที่ป้อนข้อมูลจริงจากสนามเพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง

ผลการรันโปรแกรมโดยใช้ Default Data สำหรับข้าวโพดซึ่งปลูกวันที่ 22 มีนาคม 2004 ได้ผลลัพธ์ซึ่งแบ่งออกเป็น 7 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 แสดงผลการจำลอง Climate-Crop-Soil Water ดังรูปที่ 15(a) คือปริมาณการคายน้ำ การปกคลุมดิน ความชื้นของดินในเขตรากรายวันตลอดระยะเวลาที่จำลอง พร้อมแสดงค่าชีวมวลและผลผลิตเป็นตัน/เฮกตาร์ผู้ใช้งานสามารถเรียกดูผลการคำนวณเป็นตัวเลขได้โดยคลิกที่ Numerical Output เมื่อเข้าสู่หน้าต่างของ Numerical Output ผู้ใช้งานสามารถเรียกดูข้อมูลที่ต้องการได้โดยคลิกที่ Select Output File ที่ต้องการ

ส่วนที่ 2 แสดงปริมาณฝนที่ตก (Rain) และความชื้นในดินรายวัน

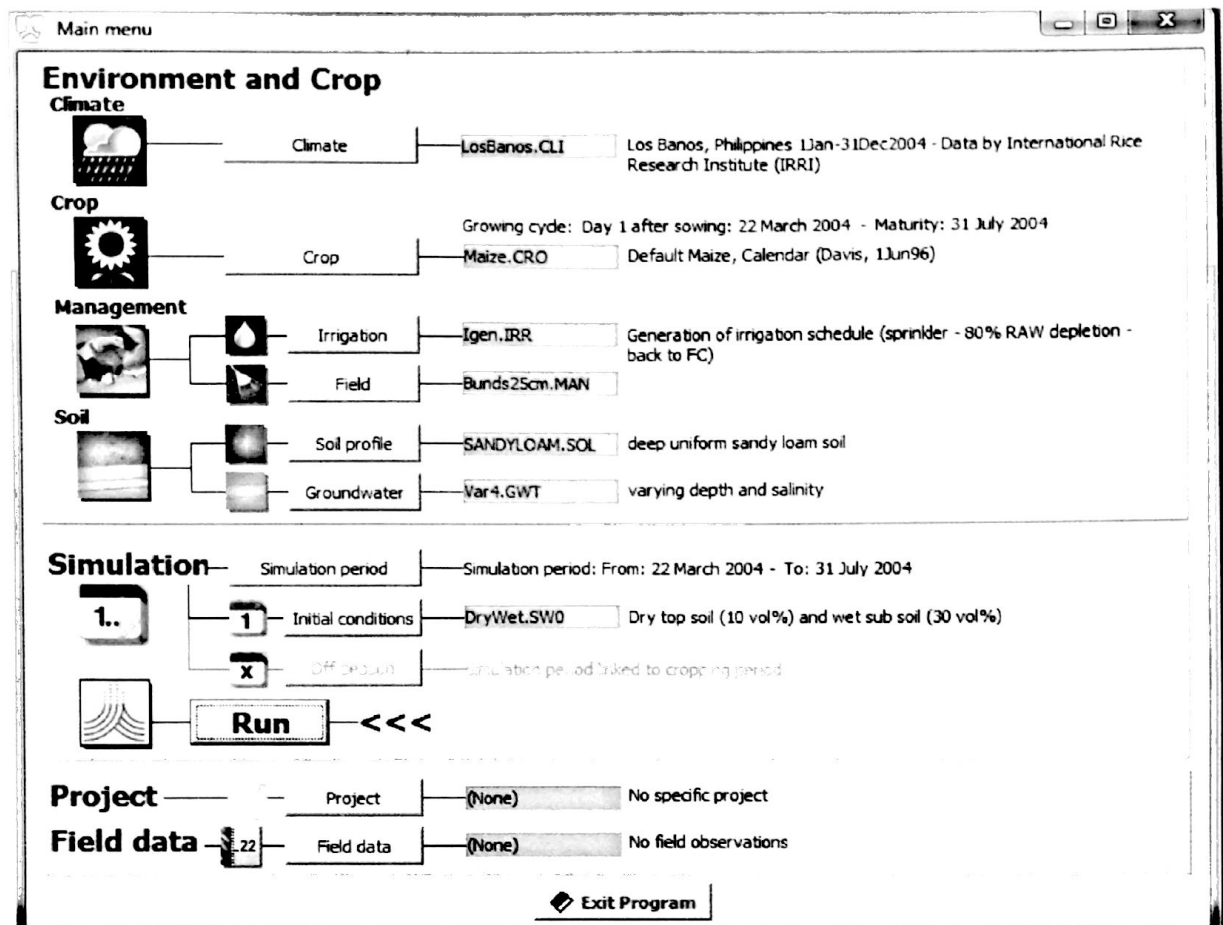
ส่วนที่ 3 แสดงปริมาณน้ำในดินที่ระยะความลึกต่างๆ (Soil Water Profile)

ส่วนที่ 4 แสดงการจำลองสมดุลเกลือในเขตราก และแสดงค่าความเค็มในรูปของค่า  $EC_e$  และ  $EC_{sw}$  ในหน่วยของ  $dS/m$  ดังรูปที่ 15(b)

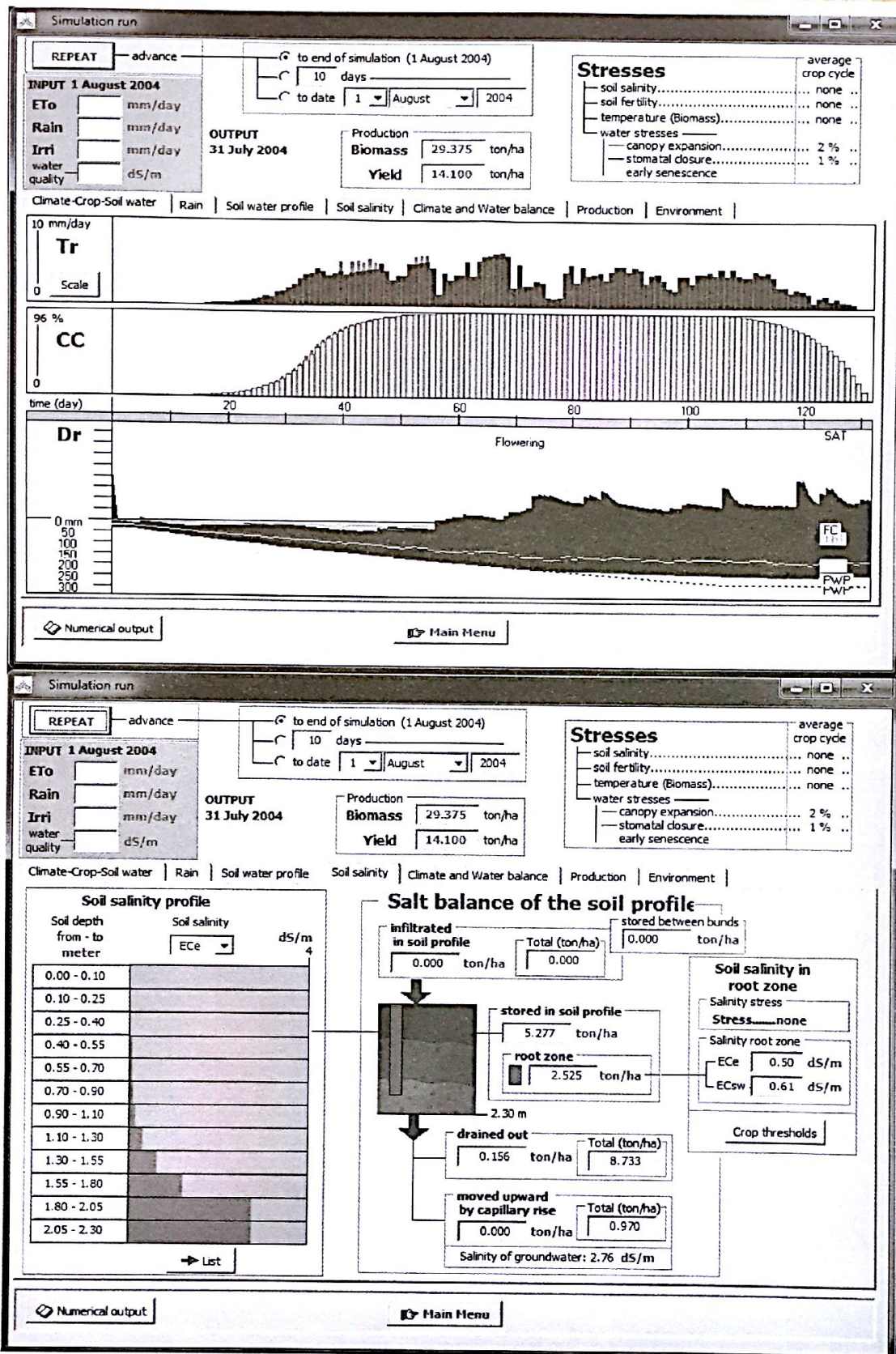
ส่วนที่ 5 แสดง Climate and Water Balance ผลการจำลองแสดงค่า  $ET_o$  ปริมาณฝน ปริมาณน้ำชลประทานที่ใช้ ปริมาณการระเหย ปริมาณการคายน้ำ ปริมาณน้ำที่ซึมลงไปในดิน ปริมาณน้ำที่ระบายทิ้ง และปริมาณน้ำใต้ดินที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขตรากโดย Capillary Action ดังแสดงในรูปที่ 16 (a)

ส่วนที่ 6 แสดงผลผลิต ดังรูปที่ 16 (b) ผลลัพธ์ที่แสดงได้แก่ ปริมาณชีวมวลของข้าวโพด ค่า HI และค่า  $HI_{adj}$  และสุดท้ายสรุปค่าผลผลิตภาพน้ำ (ET Water Productivity) ในหน่วย  $kg/m^3$  ของน้ำที่สูญเสียไปในกระบวนการระเหยและคายน้ำ

ส่วนที่ 7 แสดงสรุปสภาพแวดล้อม (Environment) ที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 14 เมนูหลักของแบบจำลอง AquaCrop



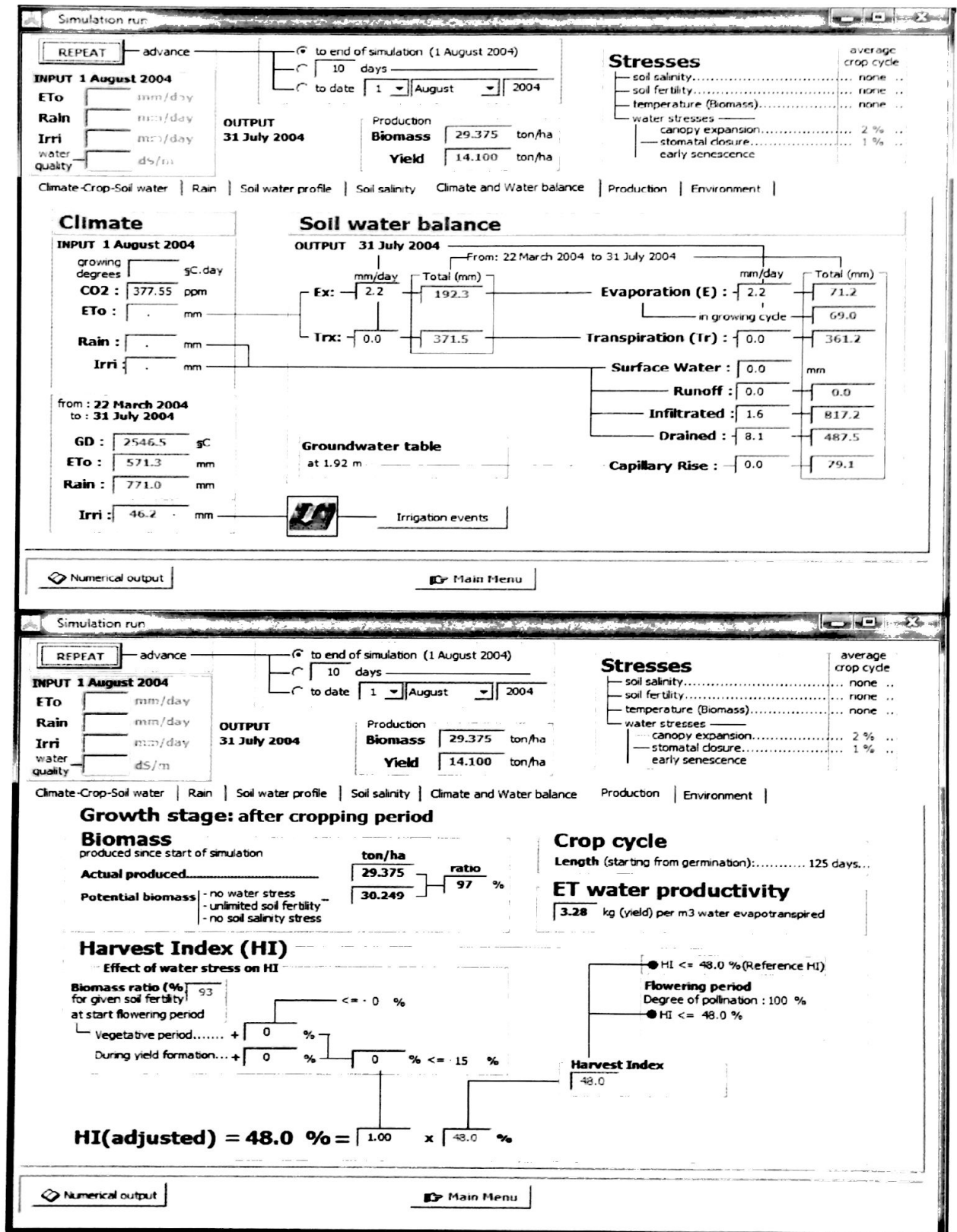
รูปที่ 15 ผลการรัน AquaCrop (a) Climate-Crop-Soil Water (ภาพบน) (b) Soil Salinity (ภาพล่าง)

#### พวก.ไรท์เทคโนโลยีเนียร์

420 ซอยเจริญสุขนิคม 85 แขวงบางอ้อ เขตบางพลี กรุงเทพมหานคร 10700  
รับผิดชอบและจำหน่ายงานระบบไฟฟ้ากลึงวงจรปิด ระบบ IT ต่างๆ

#### บริษัท พี.พี.เอส.กรุ๊ป จำกัด

91/3 ม.1 ถ.สุพรรณบุรี ต.วังกระโจม อ.เมือง จ.นครนายก 26000



รูปที่ 16 ผลการรัน AquaCrop (a) Climate and Water Balance(ภาพบน) (b) Production (ภาพล่าง)



## สรุป

FAO ได้พัฒนาแบบจำลอง AquaCrop เพื่อใช้เป็นเวอร์ชันใหม่ของ CROPWAT พร้อมกับเขียน FAO Irrigation and Drainage Paper No.66 (Crop Yield Response to Water) ขึ้นมาใหม่เพื่อใช้แทน FAO Irrigation and Drainage Paper No.33 (Yield Response to Water) แบบจำลอง AquaCrop สามารถจำลองสมดุลน้ำและเกลือในเขตรากอย่างละเอียด เพื่อหาค่า ส.ป.ส. ความเครียด เนื่องจากการขาดน้ำ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช การปกคลุมดิน การคายน้ำ การผลิตชีวมวลและผลผลิตพืช นอกจากนี้แบบจำลอง AquaCrop ยังสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไปที่มีต่อ ส.ป.ส. ความเครียดและอิทธิพลของดินที่ขาดความอุดมสมบูรณ์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งมีผลโดยตรงต่อผลผลิต แบบจำลอง AquaCrop มีรายละเอียดมาก ไม่สามารถนำมาอธิบายได้หมดในบทความฉบับนี้ ผู้สนใจสามารถดูรายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิงผู้เขียนคิดว่า AquaCrop เป็นแบบจำลองที่น่าสนใจมาก แต่ควรต้องมีการทำวิจัยเพื่อทดสอบความถูกต้องของ AquaCrop กับข้อมูลจากแปลงทดลองจริงก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

Raes, D., Studuto, P., Hsiao, T.C. and E. Fereres(2012), AQUACROP Plug-in Program: Reference Manual, Version 4.0, FAO, Rome, 10p.

Studuto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. and D. Raes, (2012), Crop Yield Response to Water, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, 519p.

<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>