บทที่ 3

ระดับความสูงของฝน ITU-R Model และผลการวิจัยที่ผ่านมา

3.1 ระดับความสูงของฝนโดย ITU-R Model

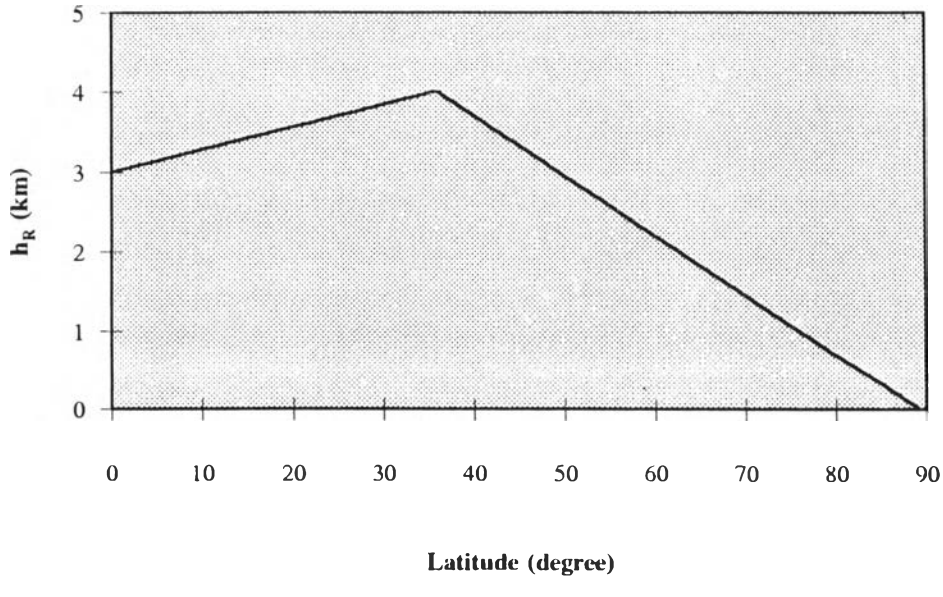
ค่า h_R ที่ถูกกำหนดขึ้นตาม ITU-R Recommendation PN 839 [1] ปี 1992 มีค่าดังนี้

$$h_R = \begin{cases} 5 - 0.075(\varphi - 23) & \text{สำหรับ } \varphi > 23 \text{ ซีกโลกเหนือ} \\ 5 & \text{สำหรับ } 0 \le \varphi \le 23 \text{ ซีกโลกเหนือ} \\ 5 & \text{สำหรับ } 0 \ge \varphi \ge -21 \text{ ซีกโลกใต้} \\ 5 + 0.1(\varphi + 21) & \text{สำหรับ } -71 \le \varphi < -21 \text{ ซีกโลกใต้} \\ 0 & \text{สำหรับ } \varphi < -71 \text{ ซีกโลกใต้} \end{cases} \quad (3.1)$$

φ คือ องศาละติจูด

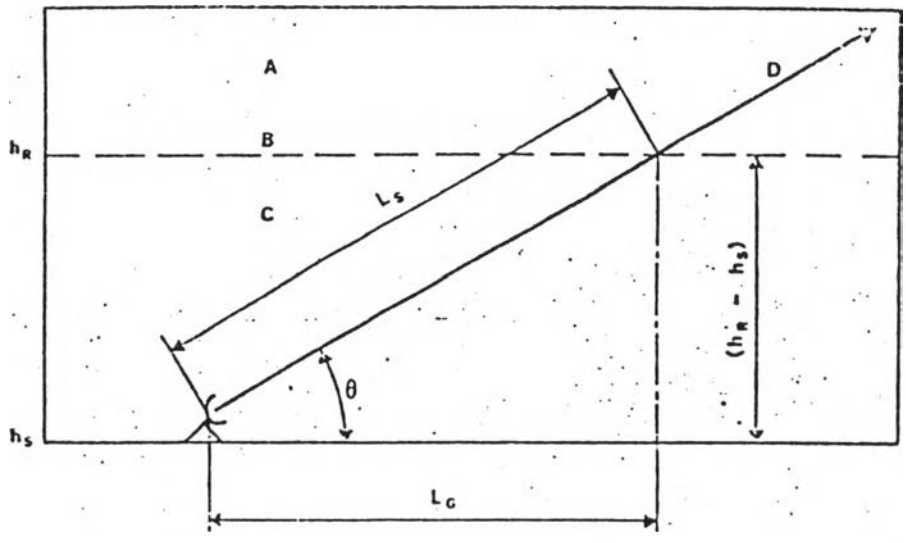
ในปี 1994 ITU พบว่าฝนในเขตมรสุมโดยทั่วไปแล้วจะเป็นฝนแบบพาความร้อนมากกว่าฝนแบบกระจาย จึงได้ปรับค่าความสูงของฝน (h_R)ตาม ITU-R Recommendation PN 618-2 [9]ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.1

$$h_R = \begin{cases} 3.0 + 0.028\varphi & for \quad 0 \le \varphi < 36 \\ 4.0 - 0.075(\varphi - 36) & for \quad \varphi \ge 36 \end{cases} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.1 แสดงระดับความสูงของฝนตาม ITU-R 1994

3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาการลดทอนของสัญญาณ



A : บริเวณที่เป็นเกล็ดน้ำแข็ง

B : ระดับความสูงของฝน

C : บริเวณที่เป็นเม็ดฝน

D : แนวเดินทางของสัญญาณ

รูปที่ 3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณของ ITU-R

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าการลดทอนของสัญญาณความถี่มากกว่า 10 GHz ของ ITU-R 1992

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่าระดับความสูงของฝนโดยใช้สมการของ ITU-R

$$h_R = \begin{cases} 3.0 + 0.028\varphi & for \quad 0 \le \varphi < 36 \\ 4.0 - 0.075(\varphi - 36) & for \quad \varphi \ge 36 \end{cases} \qquad (3.3)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่าความยาวของเส้นทางในแนวเอียงที่ต่ำกว่าความสูงของฝน

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin\theta} \quad \text{กม.} \quad \text{สำหรับ } \theta \ge 5 \text{ องศา} \qquad (3.4\ \text{ก})$$

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left[\sin^2\theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}\right]^{1/2} + \sin\theta} \quad \text{กม.} \quad \text{สำหรับ } \theta < 5 \text{ องศา} \qquad (3.4\ \text{ข})$$

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่าความยาวของเส้นทางในแนวราบที่อยู่ภายใต้ฝนจาก

$$L_G = L_S \cos\theta \qquad (3.5)$$

ขั้นที่ 4 หาค่าอัตราฝนตก $R_{0.01}$ ที่ถูกเกินเป็นเวลา 0.01%ของเฉลี่ย 1 ปี ถ้าไม่มีข้อมูลนี้ให้ใช้ค่าประมาณจาก ITU Recommendation 837 [20]

ขั้นที่ 5 คำนวณหาค่าตัวแปรชดเชย $r_{0.01}$ สำหรับ 0.01% ของเวลา 1 ปี และ $R_{0.01} \le 100$ mm/h

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + L_G / L_0} \qquad (3.6)$$

เมื่อ $L_0 = 35 \exp(-0.015\, R_{0.01})$

ถ้า $R_{0.01} > 100$ mm/h ให้แทนค่า $R_{0.01}$ ด้วย 100 mm/h

ขั้นที่ 6 หาค่าการลดทอนเฉพาะ γ_R โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ k และ α จาก ITU Recommendation 838 [21] และอัตราฝนตก $R_{0.01}$ จากขั้นที่ 4

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^{\alpha} \quad (3.7)$$

ขั้นที่ 7 ทำนายค่าการลดทอนที่ถูกเกินเป็นเวลา 0.01%ของเฉลี่ย 1 ปี

$$A_{0.01} = \gamma_R L_S r_{0.01} \quad dB \quad (3.8)$$

ขั้นที่ 8 ประมาณค่าการลดทอนที่ถูกเกินที่เปอร์เซนต์อื่นๆในช่วง 0.001% - 1% ได้จาก

$$A_p = A_{0.01}(0.12)\, p^{-[0.546 + 0.043 \log p]} \quad dB \quad (3.9)$$

โดยที่ค่า 0.12 จะเปลี่ยนเป็น 0.12, 0.38, 1 และ 2.14 สำหรับ 1%, 0.1%, 0.01% และ 0.001% ตามลำดับ

ในที่นี้ L_S คือ ความยาวของเส้นทางในแนวเอียงที่ต่ำกว่าความสูงของฝน

L_G คือ ความยาวของเส้นทางในแนวราบ

θ คือ มุมเงยของจานรับสัญญาณ

h_S คือ ความสูงจากระดับน้ำทะเลของสถานีวัด (km)

h_R คือ ระดับความสูงของฝน

$r_{0.01}$ คือ ค่าตัวแปรซดเซย

$R_{0.01}$ คือ อัตราฝนตกที่ถูกเกินเป็นเวลา 0.01% ของเวลาเฉลี่ย 1 ปี

γ_R คือ ค่าการลดทอนเฉพาะ

$A_{0.01}$ คือ ค่าการลดทอนที่ถูกเกินเป็นเวลา 0.01% ของเวลาเฉลี่ย 1 ปี

และ A_p คือ ค่าการลดทอนที่ถูกเกินสำหรับค่าเปอร์เซนต์อื่นของเวลาเฉลี่ย 1 ปี

3.3 ผลการวิจัยระดับความสูงของฝนที่ผ่านมาในอดีต

3.3.1 จากการค้นคว้าวิจัยเรื่องคุณลักษณะของระดับความสูงที่ 0°C ไอโซเทอม ในเขตอากาศอบอุ่น(Temperate Climate) และเขตอากาศร้อน (Tropical climate) โดย G.O AJAYI และ F.BARBALISCIA [4] โดยใช้ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อัตราฝนตก อุณหภูมิและความชื้น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงที่ 0°C ไอโซเทอม กับค่าต่างๆเหล่านี้ โดยที่ได้มีการประมาณค่าให้ระดับความสูงของฝน มีค่าเท่ากับค่า ระดับความสูงที่ 0°C ไอโซเทอม ที่วัดในระหว่างที่มีฝนตก (h_{FR}) แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าระดับความสูงของฝน ที่ได้จากการวัดโดยเรดิโอมิเตอร์ ซึ่งในการทำวิจัยได้แบ่งเป็น 2 เขต คือ ซีกโลกเหนือใช้ข้อมูลจากประเทศอิตาลี เป็นเวลา 10 ปี จาก 5 เมือง และในเขตร้อนที่ไนจีเรียมีข้อมูล 5 ปี จาก 3 เมือง ส่วนซีกโลกใต้ใช้ข้อมูลจากแทนซาเนีย เป็นเวลา 3 ปีจาก 1 เมือง และอาร์เจนตินาเป็นเวลา 6 ปี จาก 8 เมือง ในการวิเคราะห์ได้แบ่งช่วงเวลาในปีเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ h_{FY} (ค่าความสูงเฉลี่ยต่อปี) , h_{FS} (ค่าความสูงเฉลี่ยในช่วงฤดูร้อนเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม) และ h_{FR} (ค่าความสูงเฉลี่ยในเวลาที่มีฝนตก) ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

3.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของระดับความสูงที่ 0°C ไอโซเทอม

มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาน้อยมากค่าที่วัดได้ตอนเที่ยงวันกับเที่ยงคืนใกล้เคียงกันมาก การเปลี่ยนแปลงปีต่อปีน้อยมาก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเดือนต่อเดือนมากโดยเฉพาะในช่วงเดือนที่มีฝนตกค่าความสูงที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี

3.3.1.2 การเปลี่ยนแปลงตามละติจูดของระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม

Ajayi ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ในช่วงฤดูฝนกับละติจูดพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามละติจูดที่ตั้งของสถานีวัดโดยที่ละติจูดต่ำจะมีค่าความสูงสูงกว่าที่ละติจูดสูงๆ และเขียนเป็นสมการหาค่าความสูงเฉลี่ยในฤดูร้อน(h_{FS})ได้ [4]

$$h_{FS} = 4.8 \cos(0.55\varphi^{1.17}) \qquad (3.10)$$

เมื่อ φ คือละติจูด

3.3.1.3 การเปลี่ยนแปลงตามอัตราฝนตก

Ajayi ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ในระหว่างที่มีฝนตกกับอัตราฝนตก (R) ซึ่งวัดอยู่ในช่วงคาบ 2 ชม. มีหน่วยเป็น mm/2h เขียนเป็นสมการได้เป็น [4]

$h_{FR} = 2.125+0.009R$ ที่อิตาลี (3.11ก)

$h_{FR} = 4.67+0.006R$ ที่ไนจีเรีย (3.11ข)

3.3.1.4 การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่พื้นผิวโลก

ระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม เฉลี่ยรายเดือนมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ผิวโลก เขียนเป็นสมการได้เป็น [4]

$h_{FM} = 0.186+0.142T(^{\circ}C)$ เที่ยงวันที่อิตาลี (3.12ก)

$h_{FM} = 0.530+0.157T(^{\circ}C)$ เที่ยงคืนที่อิตาลี (3.12ข)

$h_{FM} = 4.0+0.026T(^{\circ}C)$ ที่ไนจีเรีย (3.12ค)

3.3.1.5 ความสัมพันธ์ของ h_{FR} กับ สูตรสมการเชิงประสบการณ์ [4]

$h_{FR} = 4.6-0.084(\varphi-26)$ ซีกโลกเหนือ (3.13ก)

$h_{FR} = 4.6-0.1(\varphi-26)$ ซีกโลกใต้ (3.13ข)

3.3.1.6 Ajayiได้ทำการเปรียบเทียบ h_R ที่ได้จากการวัดการลดทอนโดยใช้เรดิโอมิเตอร์ กับ h_{FR} ที่ได้จากการวัดระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ระหว่างที่มีฝนตกพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

3.3.2 จากการค้นคว้าวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ระหว่างที่มีฝนตกในเบอร์ลินของ H.Tromer, S.Szuppa และ G.Heyer [5] ซึ่งได้ใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 1984-1988 ที่ตำแหน่ง φ= 52.2° N ;λ=14.1°E พบว่าในช่วงเดือนในฤดูร้อน ค่าเฉลี่ยของระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ในเขตเบอร์ลิน มีค่าต่ำกว่าค่าที่ ITU-R,Rec. PN839 ทำนายไว้ โดยที่ในกรณีที่มีฝนตก มีค่าต่ำกว่า 250 m. และกรณีที่มีพายุฝนมีค่าต่ำกว่า 320 m.

3.3.3 จากการค้นคว้าและวิจัยเรื่องการทำนายการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมในเขตยุโรป ของ P.A. Watsun และ M.J Leito [6] ซึ่งได้มีการกำหนดประมาณค่า h_R ให้มีค่าเท่ากับระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม และใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดตามเมืองต่างๆ ทั่วทั้งทวีปยุโรป แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม กับตำแหน่งละติจูดได้ความสัมพันธ์เป็น [6]

$$h_R(\varphi) = 5.8-0.0726\varphi \quad \text{Km.} \qquad (3.14)$$

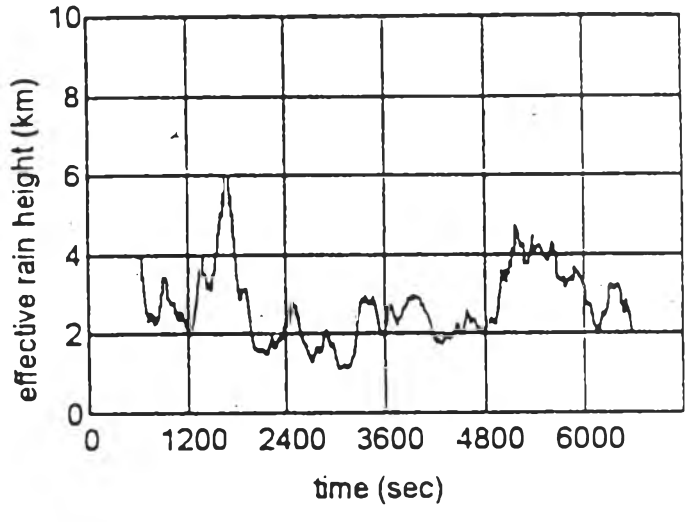
3.3.4 จากการค้นคว้าและวิจัยเรื่องการวัดระดับความสูงของฝนโดยใช้เรดิโอมิเตอร์ในเขตร้อน (Tropical) โดย M.S Pontes, L.A.R.Silva Mello, R.S.L.Souza [7] ซึ่งการวิจัยของนักวิจัยกลุ่มนี้จะแตกต่างจากนักวิจัยกลุ่มอื่นๆตรงที่ จะใช้วิธีการวัดจริงๆจากเรดิโอมิเตอร์ ส่วนผลงานของนักวิจัยท่านอื่นๆจะเป็นการวิเคราะห์จากสถิติของระดับความ

สูงที่ 0 °C ไอโซเทอม เป็นส่วนมาก โดยในการทดลองจะทำการวัดอัตราฝนตก และ การลดทอนของสัญญาณ ที่ความถี่ 12 GHz ณ กรุงรีโอเดจาเนโร ประเทศบราซิล โดยหันจานทำมุม 90° กับแนวระนาบ การที่หันจานทำมุม 90° กับแนวระนาบก็เพื่อไม่ให้มีผลกระทบจากความไม่เอกภาพของฝนในแนวระนาบ ผลการวิจัยที่นำเสนอนั้นจะแสดงในช่วงเวลาสั้นๆในช่วงเวลาที่มีฝนตก จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัด ระดับความสูงของฝนจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาอยู่ในช่วง 2 ถึง 4 กม.ของเวลาส่วนใหญ่ และจะมีค่าสูงสุดที่ 6 กม. และเมื่อนำค่าระดับความสูงของฝนที่วัดได้มาพล็อตหาความสัมพันธ์กับอัตราฝนตกที่ทำการวัดพร้อมกัน จะได้ความสัมพันธ์กันในรูปเอกซ์โปเนนเชียลฟังก์ชัน แสดงดังรูปที่ 3.3 และมีรูปสมการเป็น [7]

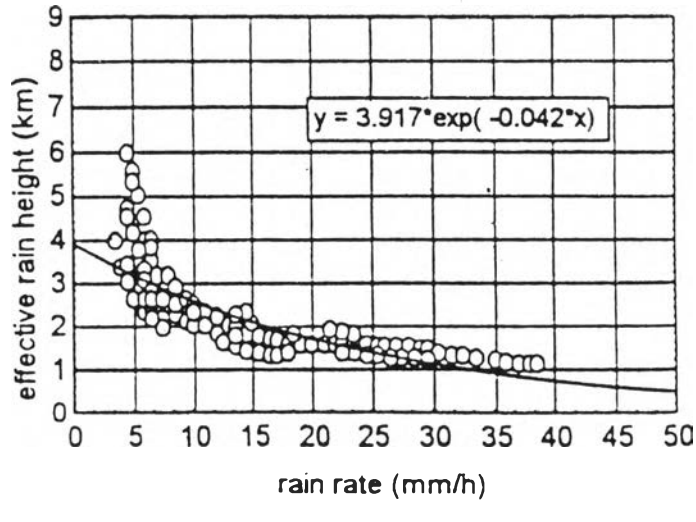
$$h_R = 3.917 * \exp(-0.042R) \qquad (3.15)$$

แต่สมการที่ได้นี้เป็นสมการที่ไม่คงตัว เพราะเมื่อทำการทดลองวัดในวันอื่นที่มีฝนตกอีก ก็จะได้สมการใหม่ที่มีค่าแตกต่างกัน แต่ลักษณะของความสัมพันธ์ยังคงเป็นเอกซ์โปเนนเชียลฟังก์ชันอยู่เหมือนเดิม

จากสมมติฐานขั้นต้นของการทดลองโดย M.S.Pontes ซึ่งอยู่ในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น พบว่า ระดับความสูงของฝนจะแปรผันเป็นส่วนกลับกับอัตราฝนตก



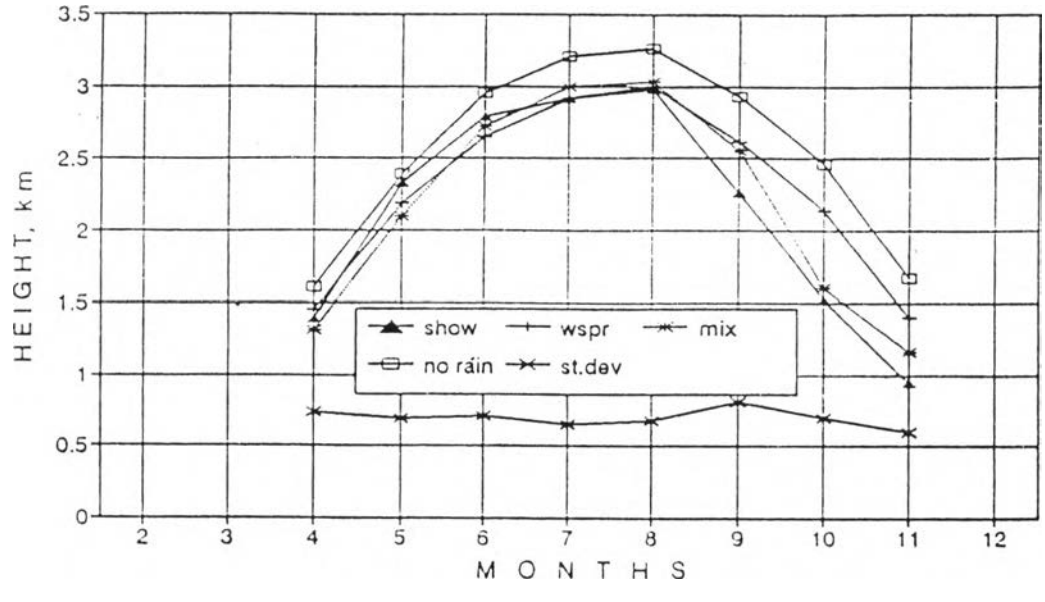
รูปที่ 3.3 ระดับความสูงของฝนที่ได้จากการวัดโดยเรดิโอมิเตอร์ [7]



รูปที่ 3.4 ระดับความสูงของฝนกับอัตราฝนตก [7]

3.3.5. จากการค้นคว้าและวิจัยเรื่องคุณลักษณะของระดับเยือกแข็ง ที่แคนาดา ซึ่งอยู่ในภูมิอากาศหนาว โดย B Kochtubajda และ D V. Rogers [8] ซึ่งได้ใช้ข้อมูลจากการวัดโดยวิธีเรดิโอซอนด์ (radiosonde) จาก 8 สถานีทั่วประเทศแคนาดา ในช่วงปี 1979-1990 ซึ่งในการวัดได้แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ระหว่างที่มีฝน , ระหว่างที่มีหิมะ และระหว่างที่ไม่มีฝนและหิมะ พบว่าในแต่ละสถานีวัด ระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม จะมีค่าแตกต่างกันไป แต่โดยรวมแล้วจะเห็นว่าในช่วงฤดูร้อน ระดับเยือกแข็งจะมีค่าสูงสุด และจะมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดูหนาว ในช่วงที่มีฝนหรือหิมะระดับเยือกแข็งจะต่ำกว่าปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับ ITU-R Reference แล้วพบว่าสอดคล้องกัน ยกเว้นในบริเวณที่ละติจูดสูงๆ ITU-R จะทำนายค่าไว้สูงกว่า

3.3.6 จากการค้นคว้าและวิจัยเรื่องคุณลักษณะของระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ในระยะยาวของกรุงวอร์ซอ ซึ่งอยู่ในภูมิอากาศแบบอบอุ่น โดย Arnold Kawecki ได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากเรดิโอซอนด์ ตั้งแต่ปี 1961 ถึง 1987 ตอนเที่ยงวันและเที่ยงคืน เพื่อใช้ประมาณค่าเฉลี่ยระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม โดยการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 4 แบบคือ ในวันที่ไม่มีฝน ในวันที่มีฝนแบบกระจาย ในวันที่มีฝนแบบพาความร้อน และในวันที่มีฝนทั้งสองแบบผสมกัน จะพบว่าในวันที่ไม่มีฝน ระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม จะสูงกว่ากรณีอื่นๆ ในช่วงเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคมวัดได้ประมาณ 3.05 กม. ส่วนในวันที่ฝนตกวัดระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม ได้ประมาณ 2.9 กม. ซึ่งฝนแต่ละชนิดเมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ระดับความสูงที่ O°C ไอโซเทอม วัดที่กรุงวอร์ซอในช่วงเวลา 27 ปีแยกตามชนิดฝนคือในวันที่ไม่มีฝน(no rain) ในวันที่มีฝนแบบกระจาย(wspr) ในวันที่มีฝนแบบพาความร้อน(show) และในวันที่มีฝนทั้งสองแบบผสมกัน(mix)