

การเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน และลักษณะสมบัติของฝน

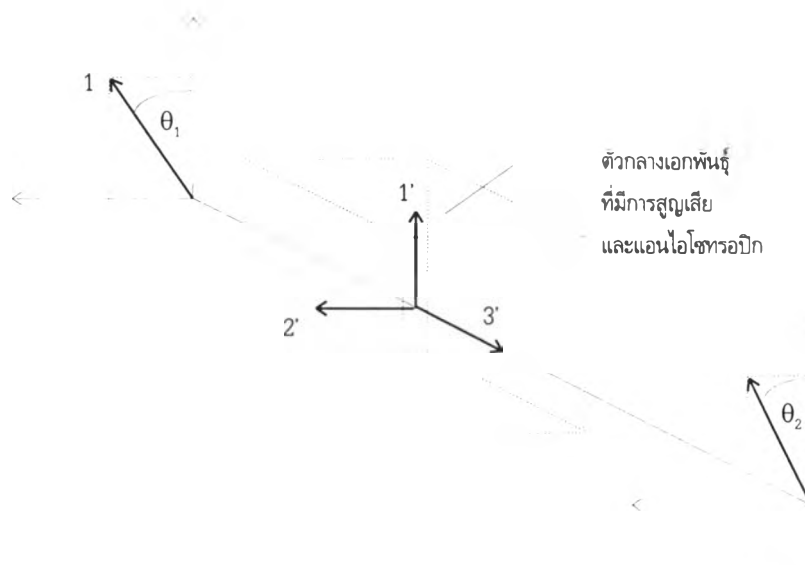
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านบรรยากาศขณะที่มีฝนตก สามารถที่จะเกิดการลดทอนและการเปลี่ยนโพลาริเซชันได้ กลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้คือ การกระเจิงของคลื่นที่ตกกระทบอนุภาคฝนแต่ละอนุภาค ผลรวมของการกระเจิงที่เกิดขึ้นในบรรยากาศปริมาตรหนึ่ง ๆ ที่มีอนุภาคฝนเจือปนอยู่ จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านปริมาตรนั้นเกิดการลดทอนและการเปลี่ยนโพลาริเซชันขึ้น ในเชิงมหภาคถ้าอนุภาคฝนมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น อาจพิจารณาบรรยากาศที่มีอนุภาคฝนเจือปนอยู่ว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ (homogeneous) ได้ การลดทอนและการเปลี่ยนโพลาริเซชันจะเป็นผลมาจากลักษณะสมบัติการสูญเสีย (lossy) และแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ในตัวกลาง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า บรรยากาศขณะที่มีฝนตกเสมือนเป็นตัวกลางเอกพันธ์ที่มีค่าสภาพยอมประสิทธิผล (effective permittivity) เป็นเทนเซอร์ที่มีแต่ละองค์ประกอบเป็นจำนวนเชิงซ้อน ในบทนี้จะใช้แนวคิดเกี่ยวกับค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางมาอธิบายการเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเชิงมหภาค ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตกจะพิจารณาจากค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอากาศและน้ำ โดยใช้แบบจำลองเชิงเรขาคณิตและค่าปัจจัยเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางกายภาพของฝนมาอธิบายลักษณะการวางตัวของอนุภาคฝนในบรรยากาศ นอกจากนี้จะนำวิธีปรับแก้ค่าความแยกขั้วได้ (polarizability) ที่เสนอโดย Kharadly and Choi (1988) มาใช้สำหรับแก้ไขข้อจำกัดของการพิจารณาตัวกลางในเชิงมหภาค ท้ายที่สุดจะกล่าวถึงปริมาณที่ใช้วัดระดับการเปลี่ยนโพลาริเซชันด้วย

การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

พิจารณาคลื่นระนาบเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิกปริมาตรหนึ่ง กำหนดให้โพลาริเซชันของคลื่นระนาบนี้เป็นแบบเชิงเส้นที่มีการวางตัวอยู่ในแนวที่ 1 และแกนหลัก (Kong, 1986) ของตัวกลางคือแกน 1', 2' และ 3' โดยที่แนวที่ 1 อยู่ในระนาบที่ประกอบด้วยแกนหลัก 1' และ 2' หรือคลื่นระนาบมีทิศการเคลื่อนที่อยู่ในแนวแกนหลัก 3' ดังแสดงในรูป 2.1

เมื่อแยกองค์ประกอบของคลื่นระนาบให้อยู่ในแนวแกนหลักของตัวกลางคือ แกน 1' และ 2' องค์ประกอบของคลื่นทั้งสองแนวแกนนี้จะไม่เปลี่ยนแนวตลอดการเคลื่อนที่ในตัวกลาง แต่ผลรวมของ

องค์ประกอบทั้งสองอาจทำให้คลื่นระนาบเปลี่ยนโพลาไรเซชันได้ ดังแสดงในรูป 2.1 ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์ย่อย 2 ประการคือ 1.การเกิดผลต่างของการลดทอน (differential attenuation) และ 2.การเกิดผลต่างของการเลื่อนเฟส (differential phase shift)

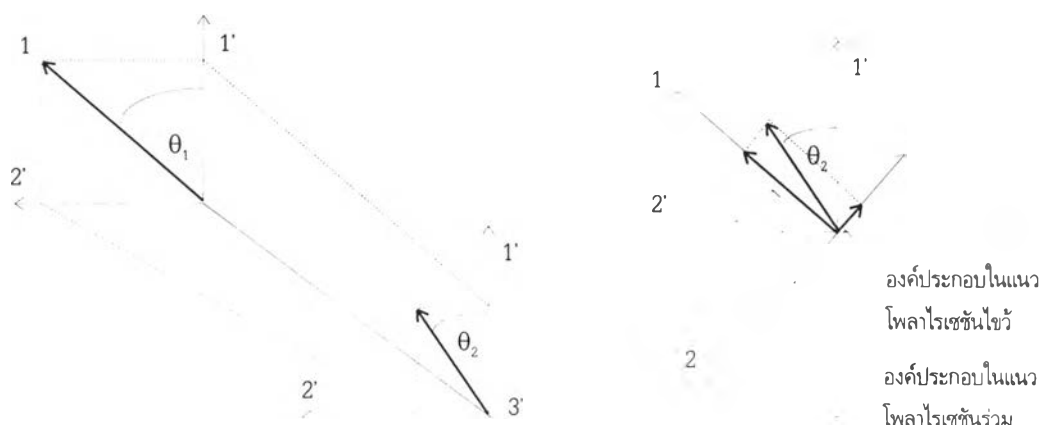


รูป 2.1 คลื่นระนาบโพลาไรซ์เชิงเส้นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิก

1. ผลต่างของการลดทอน

พิจารณาตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิกที่มีค่าคงตัวการลดทอน (attenuation constant) ของแกนหลัก $1'$ และ $2'$ ไม่เท่ากัน แต่มีค่าคงตัวการเลื่อนเฟส (phase shift constant) เท่ากัน หรือตัวกลางที่นำมาพิจารณานี้จะคำนึงเฉพาะผลกระทบของการสูญเสียเท่านั้น เมื่อคลื่นระนาบเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีลักษณะสมบัติเช่นนี้ องค์ประกอบของคลื่นในแนวแกนหลัก $1'$ และ $2'$ จะเกิดการลดทอนที่ไม่เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าเกิดผลต่างของการลดทอนขึ้น ผลรวมขององค์ประกอบทั้งสองจะทำให้คลื่นมีโพลาไรเซชันเปลี่ยนไปจากเดิม ในกรณีที่เดิมคลื่นระนาบมีโพลาไรเซชันเป็นแบบเชิงเส้น ผลรวมขององค์ประกอบทั้งสองที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางประเภทนี้จะเปลี่ยนโพลาไรซ์เชิงเส้นเหมือนเดิม แต่แนวโพลาไรเซชันจะท่ามกับแกนหลัก $1'$ หรือ $2'$ เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูป 2.2 ก) ซึ่งเป็นกรณีที่ค่าคงตัวการลดทอนของตัวกลางในแกนหลัก $2'$ มากกว่าแกนหลัก $1'$

การที่แนวโพลาไรเซชันของคลื่นระนาบโพลาไรซ์เชิงเส้นเปลี่ยนไป อาจพิจารณาได้ว่า เกิดองค์ประกอบในแนวโพลาไรเซชันไขว้ (cross polarization) ขึ้น ดังแสดงในรูป 2.2 ข) คลื่นระนาบโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแนวโพลาไรเซชันในแนวที่ 1 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้วจะเกิดองค์ประกอบในแนวที่ 2 ซึ่งเป็นแนวโพลาไรเซชันไขว้ขึ้น



ก) การเปลี่ยนโพลาไรเซชัน

ข) การเกิดองค์ประกอบในแนวโพลาไรเซชันไขว้

รูป 2.2 การเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นระนาบเชิงเส้นเนื่องจากการเกิดผลต่างของการลดทอน

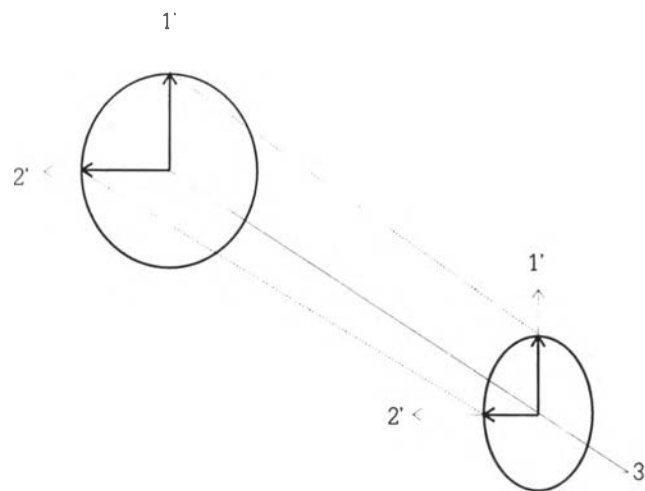
สำหรับคลื่นระนาบที่มีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลมที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีลักษณะสมบัติเช่นนี้ จะมีโพลาไรเซชันเปลี่ยนไปเป็นแบบวงรี แกนหลักและแกนรองของวงรีจะเป็นแกนเดียวกันกับแกนหลัก 1' และ 2' ของตัวกลาง โดยที่แกนหลักของตัวกลางที่มีการสูญเสียน้อยกว่าจะเป็นแกนหลักของวงรี และแกนหลักของตัวกลางที่มีการสูญเสียมากกว่าจะเป็นแกนรองของวงรีไป รูป 2.3 แสดงการเกิดคลื่นระนาบโพลาไรซ์แบบวงรีจากคลื่นระนาบโพลาไรซ์แบบวงกลมที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่แกนหลัก 2' มีความสูญเสียมากกว่าแกนหลัก 1'

2. ผลต่างของการเลื่อนเฟส

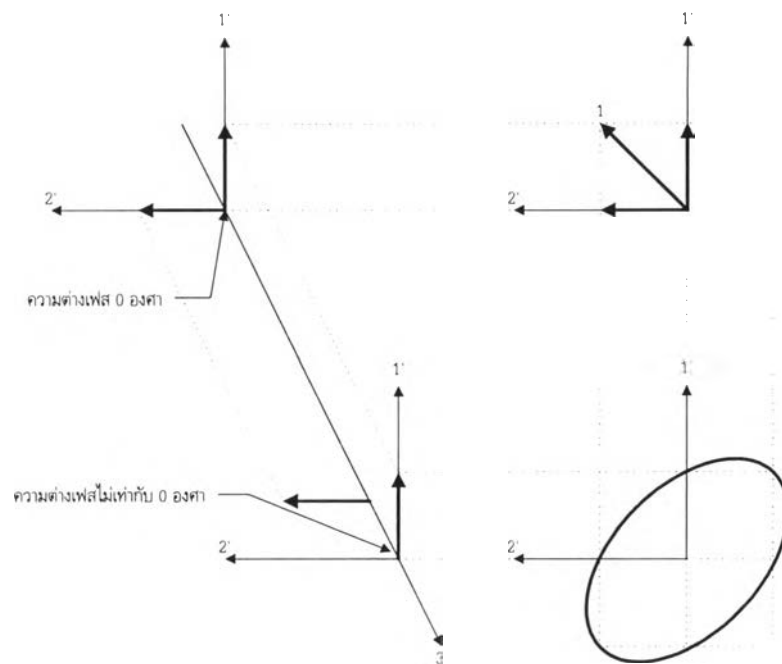
ในกรณีที่กลับกันกับหัวข้อที่แล้ว ค่าคงตัวการลดทอนของแกนหลัก 1' และ 2' เท่ากัน แต่ค่าคงตัวของการเลื่อนเฟสของทั้งสองแกนหลักไม่เท่ากัน องค์ประกอบในแนวแกนหลัก 1' และ 2' ของคลื่นระนาบที่

เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีลักษณะสมบัติเช่นนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฟสที่ต่างกัน ปรากฏการณ์ที่องค์ประกอบของคลื่นในแต่ละแนวแกนหลักแพร่กระจายด้วยความเร็วที่ต่างกันในตัวกลางแอนไอโซทรอปิกนี้เรียกว่าไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) (Kong, 1986) โดยทั่วไปผลรวมของทั้งสององค์ประกอบจะเป็นคลื่นระนาบโพลาไรซ์แบบวงรี ที่มีแกนหลักและแกนรองของวงรีไม่ตรงกับแกนหลัก $1'$ และ $2'$ ของตัวกลาง ไม่ว่าเดิมคลื่นระนาบมีโพลาไรเซชันเป็นแบบเชิงเส้นหรือวงกลมก็ตาม ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งเป็นกรณีที่เดิมโพลาไรเซชันของคลื่นระนาบเป็นแบบเชิงเส้น และรูป 2.5 ซึ่งเป็นกรณีที่เดิมโพลาไรเซชันของคลื่นระนาบเป็นแบบวงกลม ยกเว้นกรณีที่ระยะทางที่องค์ประกอบของคลื่นในทั้งสองแนวแกนหลักเคลื่อนที่พอดีที่จะทำให้ความต่างเฟส ระหว่างองค์ประกอบทั้งสองเท่ากับ 0 หรือ 180 องศา ผลรวมที่เกิดขึ้นจะได้คลื่นระนาบโพลาไรซ์เชิงเส้น ขณะที่ถ้าความต่างเฟสเท่ากับ 90 หรือ 270 องศา คลื่นที่ได้จะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลม

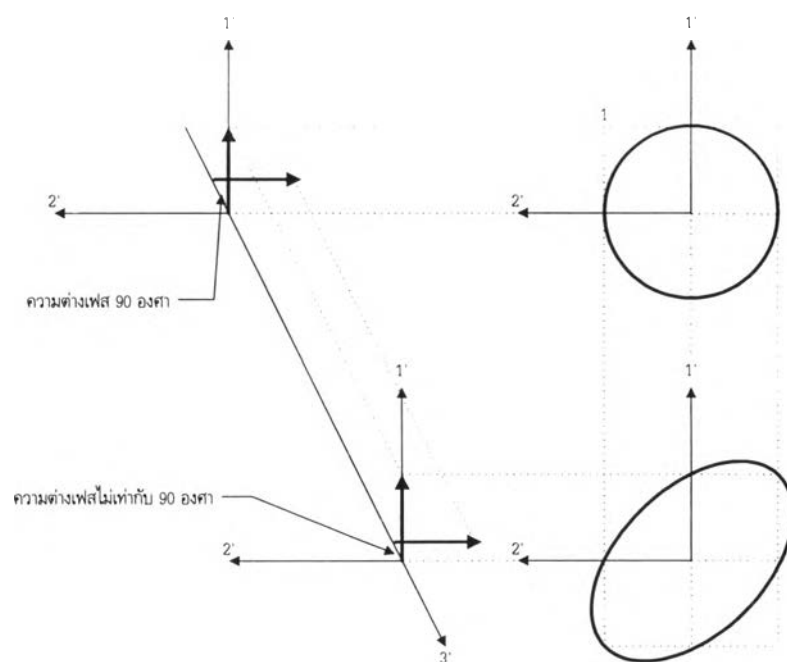
การเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝน จะเป็นผลรวมของปรากฏการณ์ย่อยทั้งสอง คือการเกิดผลต่างของการลดทอนและการเกิดผลต่างของการเลื่อนเฟส โดยที่ปรากฏการณ์ใดจะมีผลต่อการเปลี่ยนโพลาไรเซชันมากกว่า จะขึ้นอยู่กับความถี่ปฏิบัติการ และค่าคงตัวการลดทอนและการเลื่อนเฟสของบรรยากาศขณะที่มีฝนตกเป็นสำคัญ โดยที่ค่าคงตัวทั้งสองนี้จะแปรตามปัจจัยทางกายภาพของฝน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูป 2.3 การเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นระนาบโพลาไรซ์แบบวงกลม
เนื่องจากการเกิดผลต่างของการลดทอน



รูป 2.4 การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นระนาบโพลาริซ์เชิงเส้น
เนื่องจากการเกิดผลต่างของการเลื่อนเฟส



รูป 2.5 การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นระนาบโพลาริซ์แบบวงกลม
เนื่องจากการเกิดผลต่างของการเลื่อนเฟส

ลักษณะสมบัติทางกายภาพของฝน

การวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน ด้วยวิธีการหาปริมาณผลต่างของการลดทอนและผลต่างของการเลื่อนเฟส โดยพิจารณาบรรยากาศขณะที่มีฝนตกว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิก จำเป็นต้องทราบลักษณะสมบัติของตัวกลางทั้งที่เป็นตัวกลางหลัก (host) และตัวกระเจิง (scatterer) ในกรณีที่ตัวกลางหลักเป็นอากาศเช่นนี้ ประมาณได้ว่ามีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 1 สำหรับตัวกระเจิงซึ่งคืออนุภาคฝน นอกจากนี้จะต้องทราบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าแล้วยังจำเป็นต้องทราบลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกระเจิงอีกด้วย โดยลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกระเจิงจะแยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ (1) ลักษณะสมบัติเฉพาะของอนุภาคฝน 1 อนุภาคได้แก่ ขนาดและรูปร่าง ความเร็วปลายในการตก และแนวการวางตัวของอนุภาคฝน และ (2) การกระจายขนาดของอนุภาคที่อัตราการตกของฝนใด ๆ ในสภาพบรรยากาศจริงลักษณะสมบัติเหล่านี้มีการแปรเปลี่ยนตลอดเวลา แต่ในการวิเคราะห์จะใช้ค่าในเชิงทฤษฎี โดยอาศัยสมมติฐานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. อัตราการตกของฝนตามแนวหน้าตัดด้านข้าง (profile rain rate) มีค่าคงที่ตลอดวิถีการแพร่กระจาย (propagation path)
2. ลมจะมีลักษณะเป็นชั้น (laminar) ที่ขนานกับแนวระดับ โดยที่ความเร็วลมในแต่ละชั้นอาจจะเท่าหรือไม่เท่ากันก็ได้
3. อนุภาคฝนจะปรับตัวให้ความเร็วในแนวระดับเท่ากับความเร็วของลมในชั้นนั้น
4. แนวการวางตัวของแกนสมมาตรของอนุภาคฝน จะขนานกับทิศทางไหลของอากาศรอบ ๆ อนุภาคฝนเสมอ (Brussaard, 1976)
5. การกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่อัตราการตกใด ๆ (จำนวนอนุภาคฝนที่มีขนาดในช่วงที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) เป็นแบบ Laws และ Parsons หรือแบบ Marshall และ Palmer
6. ความเร็วปลายในการตก (terminal velocity) ของอนุภาคฝนแต่ละอนุภาค ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

โดยอาศัยสมมติฐานข้อ 2. ถึง 5. สรุปได้ว่าที่อัตราการตกใด ๆ ของฝนภายในบริเวณหนึ่ง อนุภาคฝนที่มีขนาดเท่ากันและอยู่ที่ระดับความสูงเดียวกันภายในเวลาเดียวกัน จะมีแนวการวางตัวของอนุภาคเป็นแนวเดียวกัน

เมื่อพิจารณาบรรยากาศที่มีอนุภาคฝนเจือปนอยู่ว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิก ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกหรือค่าสภาพยอมซึ่งใช้แสดงลักษณะสมบัติของตัวกลางชนิดนี้จะเป็นค่าที่อยู่ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอากาศและน้ำ และจะเรียกค่าสภาพยอมนี้ว่าค่าสภาพยอมประสิทธิผล

(effective permittivity) การวิเคราะห์หาค่าสภาพยอมประสิทธิผลกระทำโดยพิจารณาปัญหาในลักษณะคล้ายสถิต (quasi static) ทำให้เกิดข้อจำกัดในการวิเคราะห์คือ อนุภาคฝนต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น (Sihvola, 1988) นอกจากข้อจำกัดนี้แล้ว การกระจายตัวของอนุภาคฝนในบรรยากาศจะต้องไม่หนาแน่นเกินไปด้วย (Sihvola, 1988) สำหรับในบรรยากาศจริง ความหนาแน่นของอนุภาคฝนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของบรรยากาศมีค่าน้อยมากข้อจำกัดนี้จึงสามารถละเลยได้ สำหรับข้อจำกัดเรื่องขนาดของอนุภาคฝนเทียบกับความยาวคลื่นสามารถชดเชยโดยใช้แนวคิดเกี่ยวกับความถี่กำหนดซึ่งจะกล่าวถึงภายหลังมาแก้ปัญหาข้อนี้ได้

เมื่อพิจารณาข้อมูลทางกายภาพเหล่านี้ประกอบกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่ความถี่ปฏิบัติการ อนุกรมมิติใด ๆ จะสามารถวิเคราะห์หาค่าสภาพยอมประสิทธิผลได้ สำหรับรายละเอียดลักษณะสมบัติทางกายภาพของอนุภาคฝนจะกล่าวดังต่อไปนี้

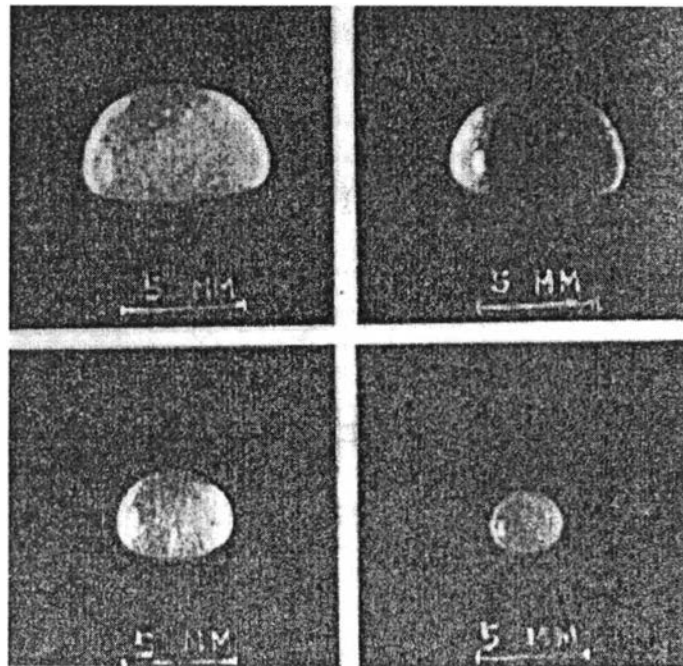
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉพาะของอนุภาคฝน 1 อนุภาค

ที่อัตราการตกใด ๆ ของฝน อนุภาคฝนแต่ละอนุภาคมีขนาดไม่เท่ากัน โดยที่การกระจายขนาดและอัตราการตกมีความสัมพันธ์กันซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ขนาดที่ต่างกันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รูปร่างของแต่ละอนุภาคต่างกัน เมื่อพิจารณารวมกับปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ความเร็วและทิศทางของลม จะส่งผลให้ความเร็วและแนวการวางตัวของฝนแต่ละอนุภาคแตกต่างกันด้วย เนื่องจากในสภาพบรรยากาศจริงปัจจัยแวดล้อมมีความแปรปรวนตลอดเวลา ทำให้ลักษณะสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของอนุภาคฝนมีค่าไม่คงที่ด้วย แต่ในการวิเคราะห์หาค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศที่มีอนุภาคฝนเจือปนอยู่ จำเป็นที่จะต้องให้อนุภาคฝนมีรูปร่าง ความเร็วในการตก และแนวการวางตัวอยู่ในรูปที่สามารถนำมาใช้คำนวณได้ ข้อมูลทางกายภาพเหล่านี้จึงเป็นเพียงข้อมูลในลักษณะประมาณเท่านั้น สำหรับรายละเอียดของลักษณะสมบัติทางกายภาพแต่ละหัวข้อมีดังนี้

1.1 ขนาดและรูปร่างของอนุภาคฝน

Magono (1954) ศึกษารูปร่างของหยดน้ำที่ตกอย่างอิสระในอากาศนิ่ง (stagnant air) โดยการถ่ายภาพหยดน้ำขนาดต่าง ๆ กันที่ถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระที่ระดับความสูง 12 เมตรในอุโมงค์ลมแนวตั้ง (vertical wind tunnel) ซึ่งความสูงระดับนี้เพียงพอที่ความเร็วในการตกจะมีค่าเท่ากับความเร็วปลายในการตกอย่างอิสระของหยดน้ำ (Laws, 1941) ผลการศึกษาพบว่าหยดน้ำขนาดต่างกันมีรูปร่างไม่เหมือนกัน รูป 2.6 แสดงภาพถ่ายโดย Magono (1954) แสดงให้เห็นว่า หยดน้ำขนาดเล็กมีรูปร่างหน้าตัดด้านข้างค่อนข้างกลม และเมื่อขนาดของหยดน้ำใหญ่ขึ้นรูปร่างหน้าตัดด้านข้างจะรีมากขึ้น ประมาณรูปร่างของหยดน้ำว่าเป็นทรง

กลมแบนขั้ว (oblate spheroid) ที่ฐานหรือขั้วล่างของหยดก่อนข้างแบนราบ ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ถ่ายโดย Laws (1941) ดังแสดงในรูป 2.7 โดยที่ตัวเลขแสดงขนาดที่กำกับรูปหยดน้ำแต่ละรูปเป็นรัศมีของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับหยดน้ำ (equivolumic sphere radius)

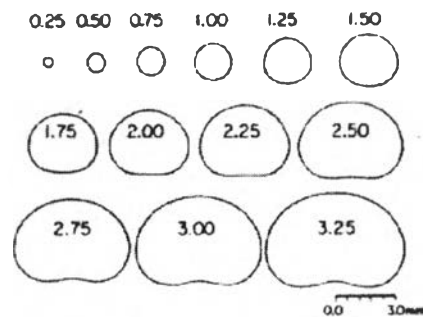


รูป 2.6 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดต่าง ๆ กันที่ความเร็วปลายในการตกอย่างอิสระ
อ้างจาก Magono (1954)



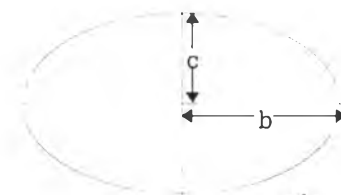
รูป 2.7 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดใหญ่ที่ตกอย่างอิสระในอากาศนิ่ง
อ้างจาก Laws (1941)

การคำนวณรูปร่างที่แท้จริงของหยดน้ำเป็นเรื่องที่ยากเนื่องจากจะต้องรู้ความดันภายในและนอกหยด Pruppacher and Pitter (1971) อ้างถึงใน Oguchi (1983) ใช้วิธีเชิงเลขคำนวณสมการสมดุลของความดันนี้ ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ผิวของวัตถุเกร็งและความดันภายนอกของหยดน้ำที่ตกอย่างอิสระ ผลการคำนวณรูปร่างของหยดน้ำที่มีขนาดต่าง ๆ กันทางทฤษฎีเป็นไปดังรูป 2.8 (Oguchi, 1983)



รูป 2.8 รูปร่างของหยดน้ำที่คำนวณโดย Pruppacher และ Pitter
ตัวเลขกำกับรูปหยดน้ำแสดงรัศมีทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับหยดน้ำรูปนั้น
อ้างจาก Oguchi (1983)

ในสภาพบรรยากาศจริง มีจำนวนอนุภาคฝนขนาดใหญ่อยู่น้อย อนุภาคฝนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนขั้วและมีฐานแบนราบมาก ๆ จึงมีน้อยตามไปด้วย ฉะนั้นสามารถประมาณรูปร่างของอนุภาคฝนว่าเป็นทรงกลมแบนขั้วแบบสมบูรณ์ (absolutely oblate spheroid) ได้ โดยการประมาณเช่นนี้ลักษณะความรีของของรูปหน้าตัดด้านข้างสามารถแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความยาวครึ่งแกนรองต่อความยาวครึ่งแกนหลักของวงรี หรืออัตราส่วนระหว่าง c และ b ดังแสดงในรูป 2.9 โดยการนิยามความรีเช่นนี้ ความรีของหยดน้ำจะมีค่าน้อยกว่า 1 และหยดน้ำจะมีความรีมากถ้าอัตราส่วนระหว่าง c ต่อ b มีค่าน้อย



b คือความยาวครึ่งแกนหลักของรูปหน้าตัดด้านข้างของหยดน้ำ

c คือความยาวครึ่งแกนรองของรูปหน้าตัดด้านข้างของหยดน้ำ

รูป 2.9 รูปหน้าตัดด้านข้างของหยดน้ำทรงกลมแบนขั้ว

จากผลการศึกษาโดยภาพถ่ายหยดน้ำที่ตกอย่างอิสระในอุโมงค์ลมแนวตั้งของ Magono (1954) พบว่าหยดน้ำทรงกลมแบนขั้วมีการยึดตัวตามแนวตั้งแสดงดังรูปหยดน้ำที่มีลูกศรชี้ในรูป 2.10 การยึดตัวตามแนวตั้งนี้ทำให้รูปร่างของหยดน้ำแกว่งไปมาระหว่างทรงกลมแบนขั้วและทรงกลมแบนข้าง (prolate spheroid) ข้อมูลจากผลการศึกษารูปร่างของอนุภาคฝนโดย Jones (1959) สอดคล้องกับผลการทดลองนี้ กล่าวคือพบอนุภาคฝนทั้งที่มีอัตราส่วนระหว่าง b และ c มากกว่า 1 หรือ อนุภาคฝนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนขั้ว และอนุภาคฝนที่มีอัตราส่วนระหว่าง b และ c น้อยกว่า 1 หรือมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนข้าง โดยโอกาสความน่าจะเป็นในการพบอนุภาคที่เป็นทรงกลมแบนขั้วจะสูงกว่าทรงกลมแบนข้าง การแกว่งไปมาของรูปร่างของหยดน้ำทั้งสองทรงเกิดจากความไม่เสถียรของแรงดันภายนอกและแรงดันภายในที่กระทำต่อผิวของหยดน้ำเนื่องจากสภาพแวดล้อมของหยดน้ำ เช่น ความแปรปรวนของอากาศที่ไหลเวียนที่ผิวหยดขณะที่หยดน้ำกำลังตกอย่างอิสระเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก สำหรับกรณีหยดน้ำจากการทดลอง สาเหตุอีกประการในการแกว่งไปมาระหว่างทรงทั้งสองอาจเกิดจากการยึดตัวตามแนวตั้งขณะที่หยดน้ำที่ก่อตัวกำลังจะหลุดจากอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดหยดด้วย

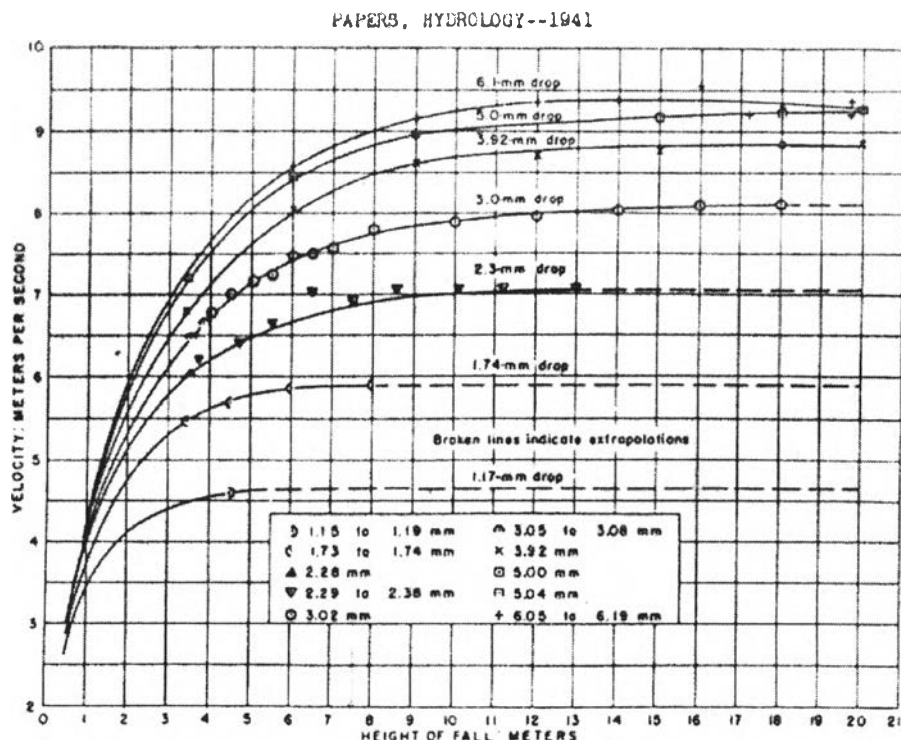


รูป 2.10 หยดน้ำทรงกลมแบนขั้วที่มีการยึดตัวตามแนวตั้ง (หยดที่มีลูกศรชี้)

อ้างอิง Magono (1954)

1.2 ความเร็วปลายในการตกของอนุภาคฝน

โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า ลมมีลักษณะเป็นชั้นที่ขนานกับแนวระดับ ดังนั้นองค์ประกอบของแรงในแนวดิ่งที่กระทำต่ออนุภาคฝนแต่ละอนุภาคมีเพียงแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศเท่านั้น เมื่ออนุภาคฝนตกลงมาได้ในระดับหนึ่งแรงต้านจากอากาศจะเท่ากับแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก อนุภาคฝนจะมีความเร็วในแนวดิ่งคงที่โดยเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วปลายในการตก อนุภาคฝนที่มีขนาดต่างกันนอกจากจะมีรูปร่างที่ต่างกันแล้วความเร็วปลายในการตกยังต่างกันอีกด้วย การศึกษาเกี่ยวกับความเร็วปลายในการตกของอนุภาคฝนโดยการวัดความเร็วในการตกอย่างอิสระของหยดน้ำในอุโมงค์ลมแนวดิ่ง (Laws, 1941) แสดงให้เห็นว่า เมื่อปล่อยหยดน้ำออกจากอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดหยดหรือกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นของหยดน้ำเท่ากับศูนย์ หยดน้ำขนาดใหญ่จะใช้ระยะทางในการเร่งความเร็วให้ถึงความเร็วปลายในการตกมากกว่าหยดน้ำขนาดเล็ก และหยดน้ำขนาดใหญ่จะมีความเร็วปลายในการตกมากกว่าหยดน้ำขนาดเล็กด้วย แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตกจะค่อย ๆ ลดลง ดังแสดงในรูป 2.11 ซึ่งเป็นผลการทดลองโดย Laws (1941) จากรูป 2.11 เห็นได้ว่าระดับความสูงที่เพียงพอที่จะทำให้หยดน้ำทุกขนาดมีความเร็วเท่ากับความเร็วปลายในการตกอยู่ที่ประมาณ 12 เมตร (Magono, 1954) ความสูงของเมฆฝนจึงมากเพียงพอที่จะทำให้ระยะทางส่วนใหญ่ที่อนุภาคฝนเดินทางอยู่ในอากาศ อนุภาคฝนมีความเร็วเท่ากับความเร็วปลายในการตก

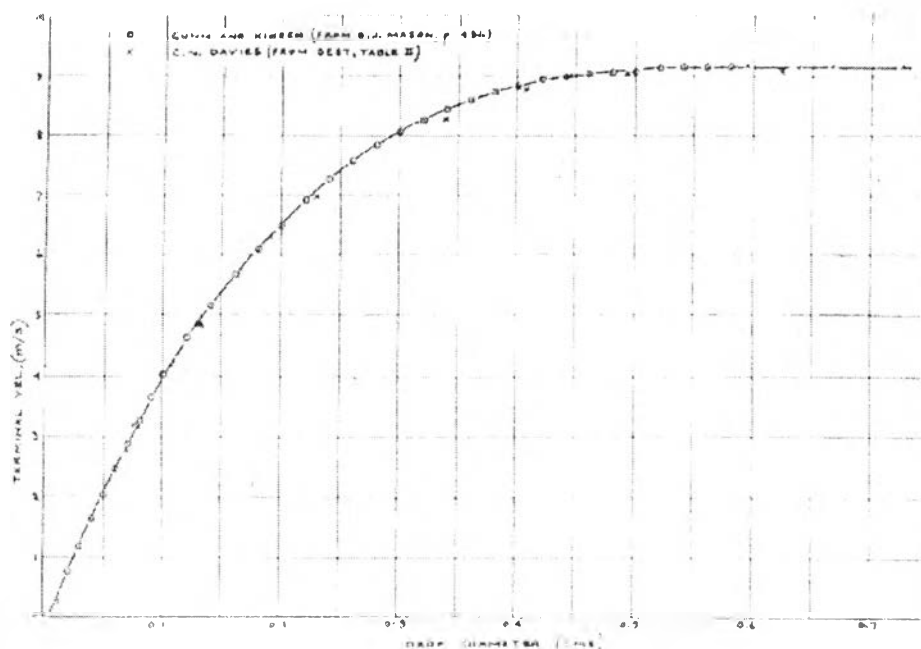


รูป 2.11 ความเร็วในการตกของหยดน้ำขนาดต่าง ๆ กันที่ความสูงตั้งแต่ 0.5 ถึง 20 เมตร
อ้างจาก Laws (1941)

นอกจากข้อมูลความเร็วปลายในการตกโดย Laws (1941) แล้ว ยังมีข้อมูลโดยผู้วิจัยอื่น ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกัน การนำข้อมูลมาใช้สำหรับวิเคราะห์หาค่าสภาพยอมประสิทธิผลจะคำนึงถึงความสะดวกในการอ่านข้อมูลมากที่สุด ในที่นี้จึงเลือกใช้ข้อมูลของ Mason (1957) และ Best (1950) ซึ่งอ้างถึงในบทความของ Medhurst (1965) โดยแสดงกราฟระหว่างความเร็วปลายในการตกกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝนดังรูป 2.12 และนำข้อมูลความเร็วปลายในการตกที่เส้นผ่านศูนย์กลางบางค่ามาแสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ความเร็วปลายในการตกของอนุภาคฝนหลายขนาด
อ้างจาก Medhurst (1965)

เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝน (cm)	ความเร็วปลายในการตก (m/s)
0.05	2.06
0.10	4.03
0.15	5.40
0.20	6.49
0.25	7.41
0.30	8.06
0.35	8.53
0.40	8.83
0.45	9.00
0.50	9.09
0.55	9.13
0.60	9.14
0.65	9.14
0.70	9.14

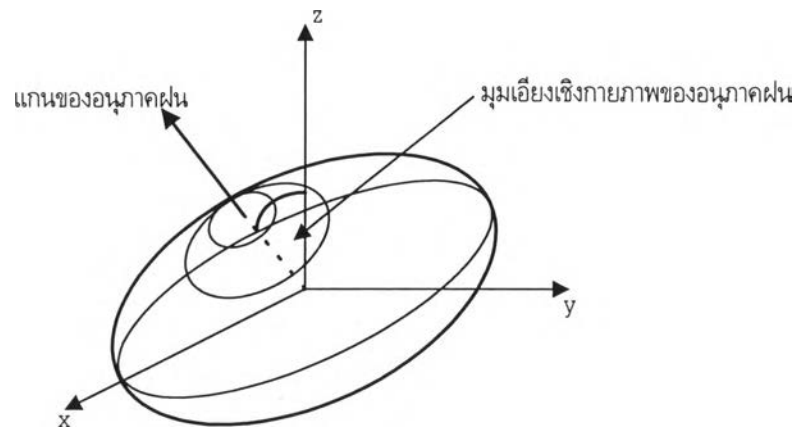


รูป 2.12 กราฟระหว่างความเร็วปลายในการตกกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝน
อ้างจาก Medhurst (1965)

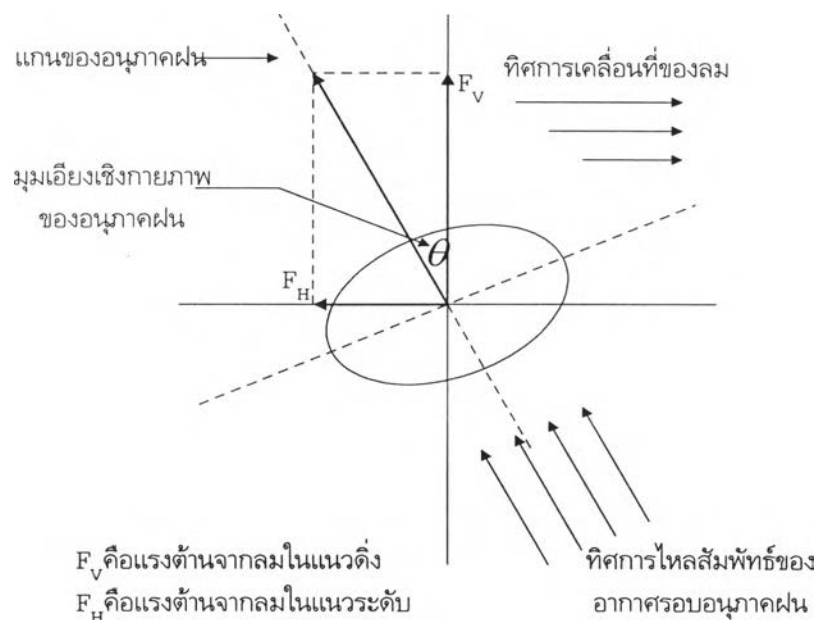
1.3 แนวการวางตัวของอนุภาคฝนและแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของอนุภาคฝน 1 อนุภาค

ขนาด รูปร่าง และความเร็วปลายในการตกของอนุภาคฝนเป็นตัวบ่งปริมาณน้ำฝนหรืออัตราการตก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศที่มีอนุภาคฝนเจือปนอยู่ โดยเฉพาะลักษณะสมบัติการลดทอนของบรรยากาศในขณะนั้น ขณะเดียวกันลักษณะสมบัติการเลี้ยวเฟสจะถูกกำหนดโดยปัจจัยทางกายภาพอีกประการหนึ่งของอนุภาคฝนคือ แนวการวางตัวของอนุภาค โดยการประมาณว่าอนุภาคฝนทุกอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนซั้ว และให้แกนรองของวงรีเมื่อพิจารณาอนุภาคฝนในแนวหน้าตัดด้านข้างที่แบ่งครึ่งอนุภาคเป็นแกนของอนุภาคฝน แนวการวางตัวของอนุภาคฝนจะถูกกำหนดโดยมุมระหว่างแกนตั้งท้องถิ่น (local vertical) และแกนของอนุภาคฝน โดยจะเรียกมุมนี้ว่ามุมเอียงเชิงกายภาพ (physical canting angle) ดังแสดงตามรูป 2.13

โดยอาศัยสมมติฐานเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางกายภาพของฝนข้อ 4. (Brussard, 1976) ที่กล่าวไว้ในหัวข้อลักษณะสมบัติการกายภาพของฝน หน้า 11 พบว่าแนวการวางตัวของอนุภาคฝนตามรูป 2.13 จะเป็นแนวเดียวกับทิศการไหลของอากาศรอบ ๆ อนุภาคฝน ฉะนั้นในการหาแนวการวางตัวหรือมุมเอียงเชิงกายภาพของอนุภาคฝนแต่ละอนุภาคสามารถทำได้ด้วยการหาทิศการไหลสัมพัทธ์ของอากาศรอบ ๆ อนุภาคฝน โดยอาศัยสมมติฐานข้อ 2. ถึง 4. และแบบจำลองตามรูป 2.14



รูป 2.13 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงมุมเอียงเชิงกายภาพและแกนของอนุภาคฝน



รูป 2.14 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของอนุภาคฝน 1 อนุภาค

จากรูป 2.14 กรณีที่ความเร็วของลมในแต่ละชั้นเท่ากันและทำให้อนุภาคฝนมีความเร็วในแนวระดับ เท่ากับความเร็วของลมด้วย จะพบว่าทิศการไหลสัมพัทธ์ของอากาศรอบ ๆ อนุภาคฝนจะมีแต่ในแนวตั้งเท่านั้น ในกรณีเช่นนี้อนุภาคฝนจะมีแนวการวางตัวขนานกับแนวตั้งหรือมุมเอียงเชิงกายภาพจะมีค่าเป็น 0 แม้ว่าแนว การเคลื่อนที่ของอนุภาคฝนจะเป็นวิถีโค้งก็ตาม มุมเอียงเชิงกายภาพของอนุภาคฝนจะมีค่าไม่เท่ากับ 0 เมื่อ ความเร็วของลมในแต่ละชั้นมีค่าไม่เท่ากัน หรือเกิดความลาดของลมในแนวตั้ง (vertical wind gradient) ซึ่ง

จะมีผลให้ทิศการไหลสัมพัทธ์ของอากาศรอบ ๆ อนุภาคฝนเบนออกจากแนวตั้ง โดยทั่วไปแนวการวางตัวของอนุภาคฝนจะเบนไปในทิศที่ตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของลม เนื่องจากในบรรยากาศระดับใกล้ผิวโลกความเร็วของลมในระดับต่ำมีค่าน้อยกว่าในระดับสูงซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างลมและผิวโลก (Brussard, 1976) ทำให้ความเร็วของอนุภาคฝนในแนวระดับค่อย ๆ ลดลงจึงเป็นเหตุให้แนวการวางตัวของอนุภาคฝนเบนไปในทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของลมดังแสดงตามรูป 2.14

2. การกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่อัตราการตกใด ๆ

อนุภาคฝนที่อัตราการตกใด ๆ มีขนาดไม่เท่ากันทุกอนุภาค ขนาดที่ต่างกันเป็นสาเหตุให้รูปร่างของอนุภาค ความเร็วปลายในการตกต่างกัน (โดยข้อเท็จจริง การกระจายขนาด รูปร่าง และความเร็วปลายในการตกเป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำฝนหรืออัตราการตกของฝน แต่การได้ข้อมูลปริมาณเหล่านี้จะได้มาจากอัตราการตกของฝนโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปริมาณกับอัตราการตก) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศในขณะนั้น การศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่อัตราการตกใด ๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปการกระจายขนาดนอกจากขึ้นอยู่กับอัตราการตกแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องอีกเช่น ประเภทของฝน เป็นต้น นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดของอนุภาคและอัตราการตกของฝนเป็นข้อมูลประจำท้องถิ่นที่ต้องอาศัยระยะเวลาในการศึกษาเฉพาะในแต่ละแห่งไป แต่การวิเคราะห์ค่าสภาพยอมประสิทธิผลโดยพิจารณาบรรยากาศขณะที่มีฝนตกว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิกในที่นี้จะอาศัยค่าการกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่เป็นที่รู้จักโดยทั่วไป (Oguchi, 1983) คือการกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws and Parsons (1943) และแบบ Marshall and Palmer (1948) อ้างถึงใน Oguchi (1983)

ข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Law และ Parsons แสดงอยู่ในรูปร้อยละของปริมาตรของอนุภาคฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดต่อปริมาตรฝนทั้งหมด โดยแบ่งช่วงขนาดของอนุภาคฝนเป็น 28 ช่วง จากขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคฝนทรงกลมแบนชั่ว) 0 จนถึง 7.00 มิลลิเมตร โดยมีความกว้างช่วงละ 0.25 มิลลิเมตร ดังตาราง 2.2 สำหรับขนาดของอนุภาคฝน Laws และ Parsons หาโดยทำการวัดขนาดของเม็ดแป้ง (pellet) ที่จับตัวแข็งเนื่องจากน้ำ (อนุภาคฝน) ที่มาตกกระทบผงบั้งในถาด แล้วอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองคำนวณหาขนาดของอนุภาคฝนออกมา

สำหรับ Marshall และ Palmer ได้เสนอความสัมพันธ์ในรูปเอ็กซ์โพเนนเชียลเพื่อใช้แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่อัตราการตกใด ๆ โดยกำหนดการกระจายขนาดในรูปจำนวนอนุภาคฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคฝนกับอัตราการตกแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$n(a)da = N_0 e^{-\Lambda a} da \quad \text{m}^{-3} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

โดยที่

$$N_0 = 16 \times 10^3 \quad \text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$$

และ

$$\Lambda = 8.2R^{-0.21} \quad \text{mm}^{-1}$$

เมื่อ $n(a)da$ คือจำนวนอนุภาคฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร R หมายถึง อัตราการตกของฝนในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง (mm/hr) และ a หมายถึงรัศมีกลางของอนุภาคฝนในหน่วย มิลลิเมตรในกรณีที่เหมาะสมว่าอนุภาคฝนมีรูปร่างเป็นทรงกลม หรือหมายถึงรัศมีกลางของทรงกลมที่มี ปริมาตรเท่ากับอนุภาคฝนที่กำลังพิจารณา สำหรับ da ที่ปรากฏในสมการ (2.1) จะแสดงความกว้างของช่วง ของขนาดอนุภาคฝนที่กำหนด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า เมื่อพิจารณาอนุภาคฝนที่มีรัศมี a ในช่วง da จะ หมายถึงอนุภาคฝนที่มีรัศมีตั้งแต่ $a - \frac{da}{2}$ จนถึง $a + \frac{da}{2}$

ดังที่ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ข้างต้นแล้วว่า การกระจายขนาดของอนุภาคฝนขึ้นอยู่กับประเภทของฝนด้วย Joss et al (1968) อ้างจาก Oguchi (1983) ได้ทำการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่เมืองโลคาร์โน ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยใช้ดิสโตรมิเตอร์ (disdrometer) ผลการศึกษาพบว่า การกระจายขนาดของ อนุภาคฝนของฝนแต่ละประเภทมีค่าไม่เท่ากัน โดยแบ่งประเภทของฝนเป็น 3 ลักษณะคือ ฝนปรอย ๆ (drizzle), ฝนกระจาย (widespread) และฝนฟ้าคะนอง (thunderstorm) Joss et al นำเสนอการกระจาย ขนาดในรูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกับ Marshall และ Palmer แต่กำหนดพารามิเตอร์ให้ต่าง กันสำหรับฝนในแต่ละประเภท ค่าพารามิเตอร์สำหรับฝนแต่ละประเภทแสดงในตาราง 2.3

สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝนในบทถัดไป จะใช้ค่าการกระจายขนาดของ อนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons และแบบ Marshall และ Palmer เนื่องจากต้องการแสดงแนวทางใน การวิเคราะห์เท่านั้น

ตาราง 2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการการกระจายขนาดของอนุภาคฝน
สำหรับฝนแต่ละประเภท เสนอโดย Joss *et al*
อ้างอิงจาก Oguchi (1983)

ประเภทของฝน	N_0 ($m^{-3} mm^{-1}$)	Λ (mm^{-1})
ฝนปรอย ๆ (drizzle)	6×10^4	$11.4R^{-0.21}$
ฝนกระจาย (widespread)	1.4×10^4	$8.2R^{-0.21}$
ฝนฟ้าคะนอง (thunderstorm)	2.8×10^3	$6R^{-0.21}$

การเปรียบเทียบการกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ในรูปร้อยละของปริมาณ และแบบ Marshall และ Palmer ในรูปจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถทำได้โดยแปลงการกระจายขนาดแบบ Laws และ Parsons ให้อยู่ในรูปจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรดังนี้

กำหนดให้ \bar{a} เป็นขนาดเฉลี่ยของอนุภาคฝนที่อัตราการตกที่กำลังพิจารณาอยู่ จำนวนอนุภาคฝนทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีความสัมพันธ์กับปริมาตรรวมที่อัตราการตกนั้นดังนี้

$$n(\bar{a}) = \frac{V_{total}}{4 \frac{\pi \bar{a}^3}{3}} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

โดยที่ V_{total} หมายถึงปริมาตรน้ำฝนรวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อัตราการตกใด ๆ จากสมการ (2.2) และข้อมูลร้อยละของปริมาตรของอนุภาคฝนที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนด (p_i) สามารถเขียนการกระจายขนาดแบบ Laws และ Parsons ในรูปจำนวนอนุภาคได้ดังสมการ

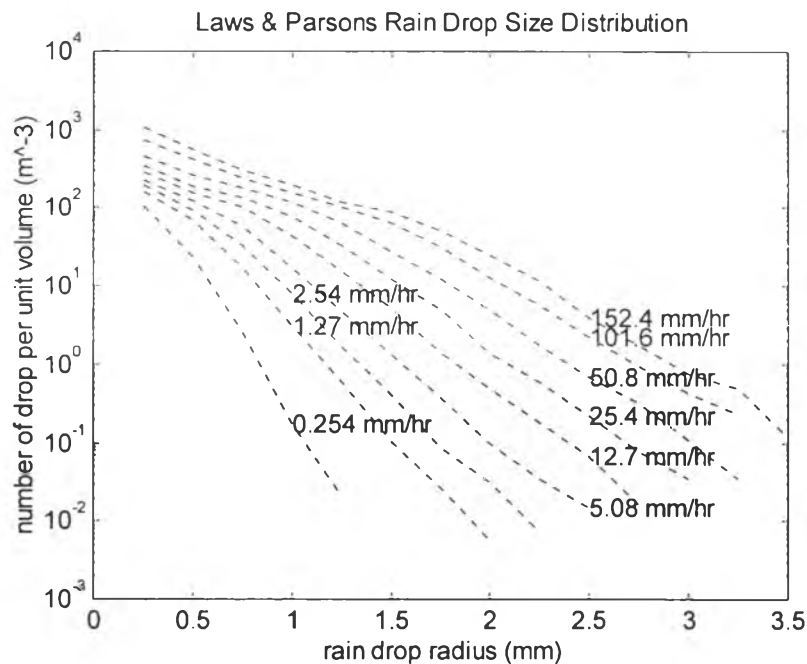
$$n(a_i) = p_i \frac{V_{total}}{4 \frac{\pi a_i^3}{3}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ a_i แทนขนาดของอนุภาคฝนในช่วงที่ i สำหรับ V_{total} ในสมการ (2.3) จะสามารถทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการ (2.2) โดยที่จำนวนอนุภาคฝนทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร $n(\bar{a})$ จะหาจากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

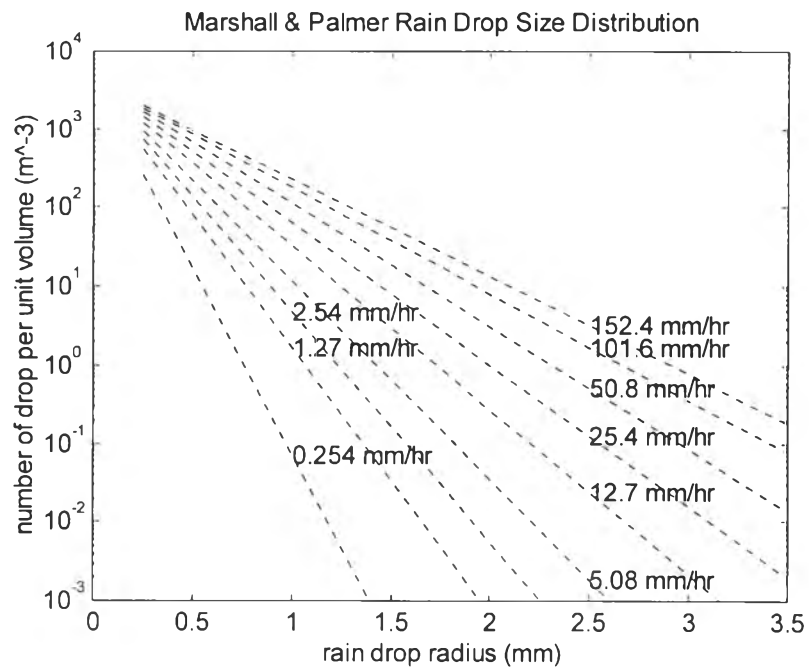
$$n(\bar{a}) = \frac{R}{48\pi \times 10^{-4} \times \bar{u} \times \bar{a}^3} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

โดยที่ \bar{d} หมายถึงความเร็วปลายเฉลี่ยในการตกของอนุภาคฝนซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายในการตกและขนาดของอนุภาคโดย Medhurst ตามรูป 2.12 สำหรับที่มาของความสัมพันธ์ตามสมการ (2.4) และการหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาค \bar{d} จะแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.

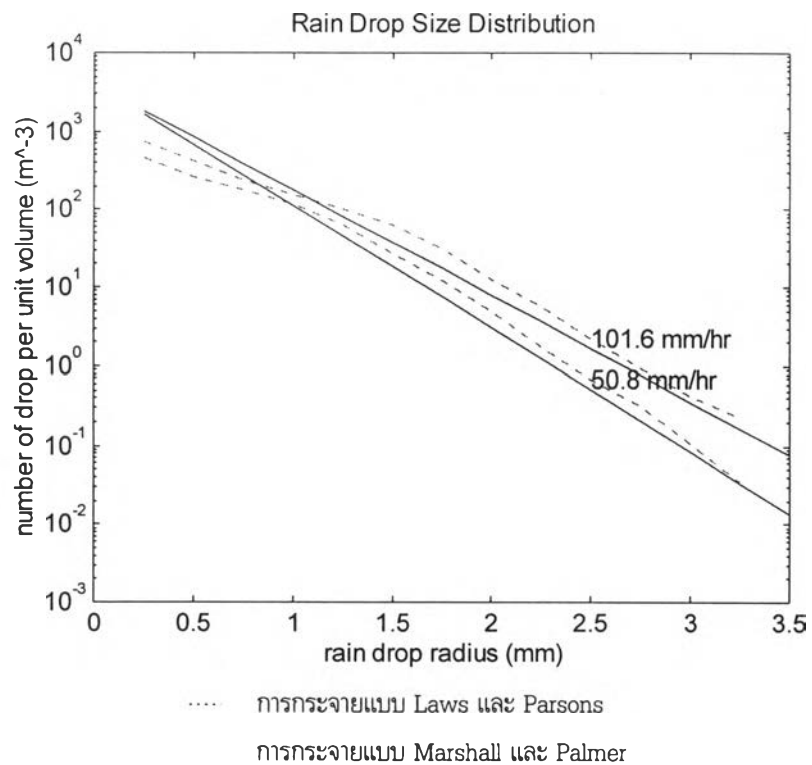
จากสมการ (2.3) สามารถแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบ Laws และ Parsons ในรูปจำนวนอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนดที่อัตราการตกของฝนต่าง ๆ ได้ดังรูป 2.15 สำหรับอัตราการตกจะกำหนดตามข้อมูลของ Laws และ Parsons ดังแสดงในตาราง 2.2 โดยเปลี่ยนความกว้างของแต่ละช่วงจากเดิมช่วงละ 0.25 มิลลิเมตรเป็นช่วงละ 0.50 มิลลิเมตร สำหรับการกระจายขนาดแบบ Marshall และ Palmer จะแสดงดังรูป 2.16 โดยกำหนดให้อัตราการตกที่ต้องการแสดงเท่ากับกรณีการกระจายขนาดแบบ Laws และ Parsons การกระจายขนาดทั้งสองแบบที่อัตราการตก 50.8 และ 101.6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะถูกนำมาแสดงเปรียบเทียบกันในรูป 2.17 สำหรับอัตราการตกของฝนทั้งสามระดับนี้จะใช้เป็นค่าอัตราการตกมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝนในบทถัดไป



รูป 2.15 การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons



รูป 2.16 การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer



รูป 2.17 การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons เปรียบเทียบกับแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 50.8 และ 101.6 mm/hr

สภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตก

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านบรรยากาศขณะที่มีฝนตกโดยพิจารณาบรรยากาศขณะนั้นว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ที่มีความสูญเสียและแอนไอโซทรอปิก สามารถทำได้ด้วยการหาค่าคงตัวการแพร่กระจายหรือค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะนั้นเมื่อสภาพซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability) มีค่าเท่ากับ 1 ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีอนุภาคฝนเจือปนอยู่เป็นค่าสภาพยอมที่อยู่ระหว่างค่าสภาพยอมของอากาศและน้ำ เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของบรรยากาศขณะที่มีฝนตก จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของตัวกลางทั้งสองส่วนอยู่รวมกันในลักษณะที่ตัวกลางชนิดหนึ่งฝังอยู่ในเนื้อตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง ในที่นี้ตัวกลางที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางหลัก (host medium) คือ อากาศ ส่วนอนุภาคฝนแต่ละอนุภาคเป็นตัวกระเจิง (scatterer) ที่ฝังอยู่ในเนื้อตัวกลางหลัก โดยการประมาณว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอากาศซึ่งเป็นตัวกลางหลักมีค่าเป็น 1 ลักษณะสมบัติการสูญเสียในเนื้อตัวกลางนี้จะมาจากค่าสภาพยอมของน้ำ รูปร่างและลักษณะการฝังตัวของอนุภาคฝนซึ่งเป็นตัวกระเจิงที่ฝังในอากาศจะเป็นตัวกำหนดลักษณะแอนไอโซทรอปิกของตัวกลางชนิดนี้

การวิเคราะห์หาสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตกจึงจำเป็นต้องทราบทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำและรูปร่างของอนุภาคฝน สำหรับรูปร่างของอนุภาคฝนได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์หาค่าสภาพยอมประสิทธิผลในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำก่อนว่ามีค่าเป็นเท่าใดในย่านความถี่ที่พิจารณา

1. สภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำ

Cole และ Cole อ้างถึงใน Ray (1972) ได้เสนอสมการสำหรับหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยมีอุณหภูมิของน้ำเป็นพารามิเตอร์ สมการของ Cole และ Cole ดัดแปร (modified) จากสมการของเดบาย (Debye's equation) สามารถใช้ได้กับน้ำที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ -20 ถึง 50 องศาเซลเซียส (อ้างจากแบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model) สำหรับหาค่าดัชนีหักเหของน้ำและน้ำแข็งโดย Ray) ซึ่งครอบคลุมย่านที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝนไว้ด้วยแล้ว ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำตามสมการของ Cole และ Cole แยกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามสมการดังนี้

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \left[1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right]}{1 + 2 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{2(1-\alpha)}} \quad \dots\dots\dots (2.5 ก)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{1 + 2 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{1-\alpha} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\sigma\lambda}{18.8496 \times 10^{10}} \quad \dots\dots\dots (2.5 ข)$$

โดย ε' และ ε'' หมายถึงส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำตามลำดับ สำหรับ ε_s หมายถึงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สถิต, ε_{∞} หมายถึงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่ความถี่สูง, λ_s หมายถึงความยาวคลื่นรีแลกเซชัน (relaxation wavelength) และ α เป็นพารามิเตอร์ค่าหนึ่งเรียกว่า พารามิเตอร์แพร่กระจาย (spread parameter) โดยปริมาณทั้งสี่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและมีค่าดังสมการ (2.6 ก) - (2.6 ง) สำหรับ σ เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 12.5664×10^8

$$\varepsilon_s = 78.54 \left[1.0 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25.0) + 1.19 \times 10^{-5}(t - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(t - 25.0)^3 \right] \quad \dots\dots\dots (2.6 ก)$$

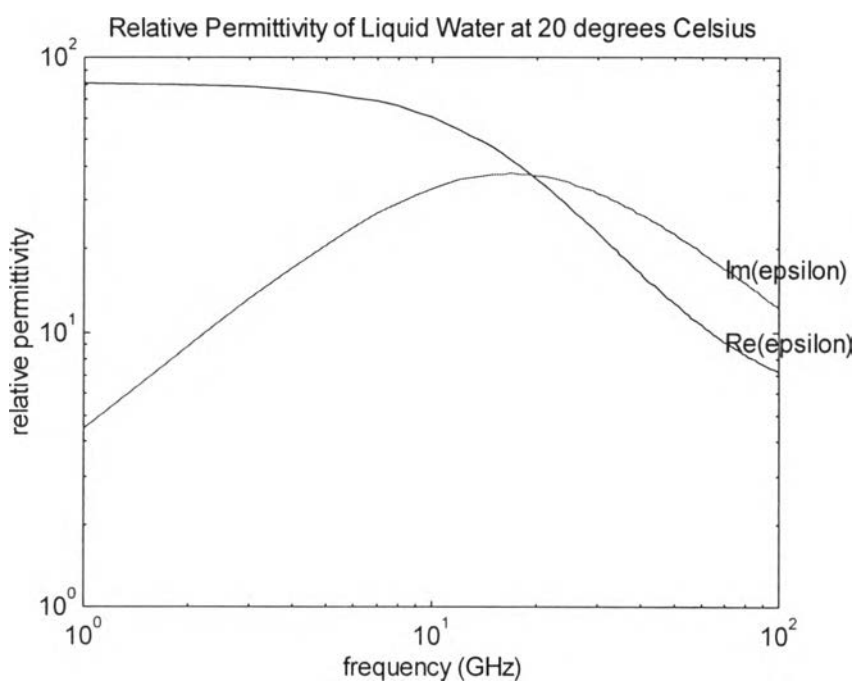
$$\varepsilon_{\infty} = 5.27137 + 0.0216474t - 0.00131198t^2 \quad \dots\dots\dots (2.6 ข)$$

$$\lambda_s = 0.00033836 \exp\left[\frac{2513.98}{(t + 273)} \right] \quad \dots\dots\dots (2.6 ค)$$

$$\alpha = \frac{-16.8129}{(t + 273)} + 0.0609265 \quad \dots\dots\dots (2.6 ง)$$

เมื่อ t เป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่น ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่ความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 100 จิกะเฮิรตซ์โดยกำหนดให้อุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันเนื่องจากฝน แสดงดังรูป 2.18



รูป 2.18 สภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2. สภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางไม่เอกพันธ์

ตัวกลางไม่เอกพันธ์ (inhomogeneous medium) ในที่นี้หมายถึงตัวกลางเนื้อผสม (mixed medium) ระหว่างสาร 2 ชนิด โดยสารชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางหลัก (host medium) และสารอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระเจิง (scatterer) ที่ฝังอยู่ในเนื้อตัวกลางหลัก สำหรับรูปร่างของตัวกระเจิงเป็นรูปทรงรี (ellipsoid) ที่มีขนาด (size), ความรี (ellipticity) และแนวการวางตัว (orientation) ใด ๆ การพิจารณา ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวกลางเนื้อผสมนี้ในเชิงมหาค่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์โดยใช้ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางเป็นตัวแสดงลักษณะสมบัติมีข้อจำกัดว่าตัวกระเจิงต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น โดยขนาดของตัวกระเจิงตามเงื่อนไขในการวิเคราะห์ตัวกลางในลักษณะคล้ายสถิต (quasi-static) ยอมให้ความยาวคอร์ดิที่ยาวที่สุดของตัวกระเจิงมีค่าได้ประมาณความยาวคลื่นหารด้วยสองเท่าของ π หรือ $d_{\max} \approx \frac{\lambda}{2\pi}$ เมื่อ d_{\max} หมายถึงความยาวคอร์ดิที่ยาวที่สุดของตัวกระเจิง (Sihvola, 1988) การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ทำให้การพิจารณาการสูญเสียในตัวกลางไม่คำนึงถึงการสูญเสียจากการกระจัดกระจาย (scattering loss) คงเหลือแต่การสูญเสียเนื่องจากพจน์จินตภาพในค่าสภาพยอมประสิทธิผล (Sihvola, 1988) หรือการสูญเสียแบบดูดกลืน (absorption loss) เท่านั้น

การวิเคราะห์หาค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางไม่เอกพันธ์ประเภทนี้ทำโดยพิจารณาตัวกลางดังกล่าวว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ โดยค่าสภาพยอมประสิทธิผล (ϵ_{eff}) มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าเชิงมหภาค (macroscopic electric field, \vec{E}) และกระแสการกระจัด (displacement current, \vec{D}) ตามสมการ (2.7)

$$\vec{D} = \epsilon_{eff} \vec{E} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อตัวกลางอยู่ในสนามไฟฟ้า \vec{E} สนามไฟฟ้าจะทำให้ประจุบวกและประจุลบในเนื้อตัวกลางเรียงตัวในลักษณะเป็นไดโพลของประจุ โดยมีค่าไดโพลโมเมนต์เท่ากับ \vec{p}

หากพิจารณาตัวกลางในเชิงมหภาค ตัวกลางไดอิเล็กทริกนี้จะประกอบไปด้วยไดโพลของประจุในอากาศว่างอยู่เป็นจำนวนมาก ผลรวมของไดโพลโมเมนต์ในหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือเรียกว่าโพลาริเซชัน (polarization, \vec{P}) มีค่าดังสมการ (2.8)

$$\vec{P} = n_0 \vec{p} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ n_0 หมายถึงจำนวนไดโพลของประจุในหนึ่งหน่วยปริมาตร

ผลรวมของไดโพลโมเมนต์หรือโพลาริเซชันทำให้กระแสการกระจัด (displacement current) ในกรณีที่ตัวกลางเป็นตัวกลางไม่เอกพันธ์เช่นนี้แตกต่างจากกรณีที่มีแต่ตัวกลางหลักเพียงอย่างเดียวซึ่งมีค่ากระแสการกระจัด (\vec{D}) ดังสมการ

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นทำให้กระแสการกระจัดเปลี่ยนไปเป็น

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\epsilon_{eff} \vec{E}$ ตามสมการ (2.7)

เมื่อพิจารณาในเชิงจุลภาค แต่ละไดโพลของประจุนอกจากได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าจากภายนอกแล้วยังได้รับผลจากสนามดีโพลไรเซชัน (depolarization field) ที่เกิดเนื่องจากประจุอื่น ๆ ที่ถูกโพลไรซ์ด้วย ผลรวมของทั้งสองสนามเรียกว่าสนามโพลไรซิง (polarizing field, \vec{E}_c) มีค่าดังนี้ (Sihvola, 1988)

$$\vec{E}_c = \vec{E} + \frac{1}{\epsilon} \overline{\overline{L}} \cdot \vec{P} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

เมื่อ $\frac{1}{\epsilon} \overline{\overline{L}} \cdot \vec{P}$ คือสนามดีโพลไรเซชัน สำหรับ \vec{P} หมายถึงโพลไรเซชันตามสมการ (2.8) และ $\overline{\overline{L}}$ หมายถึงดีโพลไรเซชันไดอะดิก (depolarization dyadic) มีค่าดังสมการ (2.12) (Sihvola, 1988)

$$\overline{\overline{L}} = \sum_{i=1}^3 N_i \hat{u}_i \hat{u}_i \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

โดย N_i เป็นตัวประกอบการเปลี่ยนโพลไรเซชัน (depolarization factor) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความยาวของแกนทั้งสามของตัวกระเจิง ตัวประกอบการเปลี่ยนโพลไรเซชันแสดงในภาคผนวก ค. สำหรับ \hat{u}_i เป็นดัชนีแสดงทิศของแกนของตัวกระเจิง

ในกรณีที่ตัวกระเจิงเป็นทรงกลม ดีโพลไรเซชันไดอะดิกมีค่าเท่ากับ $\frac{\overline{\overline{I}}}{3}$ (Sihvola, 1988) โดย $\overline{\overline{I}}$ เป็นไดอะดิกหนึ่งหน่วย สนามโพลไรซิงจึงมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะพิจารณาตัวกลางในแนวแกนใด เนื่องจากสนามโพลไรซิงเป็นผลมาจากโพลไรเซชันหรือผลรวมของไดโพลโมเมนต์ และความสัมพันธ์ระหว่างสนามโพลไรซิงกับค่าไดโพลโมเมนต์เป็นลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองได้ดังสมการ (2.13) โดยเรียกอัตราส่วนระหว่างค่าไดโพลโมเมนต์กับสนามโพลไรซิงว่าค่าความสามารถในการโพลไรซ์หรือความแยกขั้วได้ (polarizability, $\overline{\overline{\alpha}}$)

$$\vec{p} = \overline{\overline{\alpha}} \vec{E}_c \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{\overline{D}}, \vec{E}, \epsilon_{eff}, \epsilon, \vec{P}, \vec{p}, \overline{\overline{\alpha}}$ และ \vec{E}_c ตามสมการ (2.7), (2.8), (2.10) และ (2.13) ทำให้สามารถเขียนค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางไม่เอกพันธ์ในรูปของความแยกขั้วได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

จากสมการ (2.7) และ (2.10)

$$\epsilon_{eff} = \frac{D}{E} = \frac{\epsilon E + P}{E} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

แทนค่า \bar{P} จากสมการ (2.14) โดยอาศัยสมการ (2.8) และ (2.13) จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon E + n_0 \alpha E_c}{E}$$

ดังนั้น

$$\epsilon_{eff} = \epsilon + n_0 \alpha \frac{E_c}{E} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

หรือ

$$\epsilon'_{eff} = \epsilon + n_0 \alpha_i \frac{E_c}{E} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

เมื่อ ϵ'_{eff} และ α_i หมายถึงค่าสภาพยอมประสิทธิผลและความแยกขั้วได้ในแนวแกน i ของตัวกระเจิง

โดยอาศัยสมการ (2.11) สนามโพลาริซิงในแนวแกน i มีค่าเท่ากับ $E_c = E + \frac{N_i}{\epsilon} P$ โดยที่ $P = n_0 \alpha_i E_c$ ดังนั้น $\frac{E_c}{E}$ ในสมการ (2.16) จึงมีค่าดังนี้

$$\frac{E_c}{E} = \frac{\epsilon}{\epsilon - N_i n_0 \alpha_i} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

สำหรับความแยกขั้วได้ในแนวแกน i สามารถทำได้โดยพิจารณาเฉพาะที่ตัวกระเจิงซึ่งกำหนดให้มีค่าสภาพยอมเท่ากับ ϵ_s โพลาริเซชันที่ตัวกระเจิงจึงมีค่าเท่ากับ $(\epsilon_s - \epsilon)E$ และได้โพโลโมเมนต์และสนามโพลาริซิงมีค่าดังสมการ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ

$$p = \nu_0 (\epsilon_s - \epsilon) E \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

เมื่อ ν_0 เป็นปริมาตรของตัวกระเจิง และ $n_0 \nu_0 = f$ เป็นอัตราส่วนปริมาตรของตัวกระเจิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1

$$E_c = E + \frac{N_i}{\varepsilon} (\varepsilon_s - \varepsilon) E \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

โดยอาศัยสมการ (2.13), (2.18) และ (2.19) ค่าความแยกชั้นได้ในแนวแกน i จึงมีค่าเท่ากับ

$$\alpha_i = \frac{p}{E_c} = \frac{\nu_0 (\varepsilon_s - \varepsilon) E}{E + \frac{N_i}{\varepsilon} (\varepsilon_s - \varepsilon) E}$$

หรือ

$$\alpha_i = \frac{\nu_0 (\varepsilon_s - \varepsilon) \varepsilon}{\varepsilon + N_i (\varepsilon_s - \varepsilon)} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

ค่าสภาพยอมประสิทธิผลในแนวแกน i ตามสมการ (2.16) ทำได้โดยแทนค่า $\frac{E_c}{E}$ จากสมการ (2.17) และ α_i จากสมการ (2.20) ลงในสมการ (2.16) โดยมีขั้นตอนในการทำดังนี้

แทนค่า $\frac{E_c}{E}$ จากสมการ (2.17) ค่าสภาพยอมประสิทธิผลในแนวแกน i กลายเป็น

$$\varepsilon'_{eff} = \varepsilon + n_0 \alpha_i \frac{\varepsilon}{\varepsilon - N_i n_0 \alpha_i} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

หรือ

$$\varepsilon'_{eff} = \varepsilon + \frac{n_0 \alpha_i}{\varepsilon - N_i n_0 \alpha_i} \varepsilon$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\varepsilon'_{eff} = \varepsilon + \frac{n_0 \alpha_i}{1 - N_i n_0 \frac{\alpha_i}{\varepsilon}} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

จากนั้นแทนค่า α_i ในสมการ (2.22) ด้วยค่าจากสมการ (2.20) ทำให้

$$\varepsilon'_{eff} = \varepsilon + \frac{\frac{n_0 \nu_0 \varepsilon (\varepsilon_s - \varepsilon)}{\varepsilon + N_i (\varepsilon_s - \varepsilon)}}{1 - \frac{N_i n_0 \nu_0 (\varepsilon_s - \varepsilon)}{\varepsilon + N_i (\varepsilon_s - \varepsilon)}} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

หรือ

$$\varepsilon_{eff}^i = \varepsilon + \frac{f\varepsilon(\varepsilon_s - \varepsilon)}{1 - \frac{\varepsilon + N_i(\varepsilon_s - \varepsilon)}{N_i f(\varepsilon_s - \varepsilon) + \varepsilon + N_i(\varepsilon_s - \varepsilon)}} \dots\dots\dots (2.24)$$

เมื่อ $n_0 v_0 = f$ หมายถึงอัตราส่วนปริมาตรของตัวกระเจิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

จากสมการ (2.24) เห็นได้ว่าถ้าตัวกระเจิงมีลักษณะสมบัติตรงตามเงื่อนไขที่ทำให้สามารถพิจารณาตัวกลางเนื้อผสมประเภทนี้เป็นตัวกลางเอกพันธ์ได้แล้ว ค่าปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดสภาพยอมประสิทธิผลคืออัตราส่วนปริมาตรของตัวกระเจิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นกรณีที่ยังคงประกอบของตัวกลางมีแต่ตัวกลางหลัก ไม่มีตัวกระเจิง ค่าสภาพยอมประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ ε ซึ่งเป็นค่าสภาพยอมของตัวกลางหลัก เนื่องจาก $f = 0$ ขณะที่กรณีที่ยังคงประกอบของตัวกลางหลักมีแต่ตัวกระเจิง หรือ $f = 1$ ค่าสภาพยอมประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับ ε_s ซึ่งเป็นค่าสภาพยอมของตัวกระเจิง

สำหรับบรรยากาศขณะที่มีฝนตก อนุภาคฝนมีลักษณะเป็นทรงกลมแบนขั้ว (กล่าวถึงในหัวข้อ 1.1 เรื่องขนาดและรูปร่างของอนุภาคฝน หน้า 12) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของทรงรี ดังนั้นตัวประกอบการเปลี่ยนโพลาริเซชันของอนุภาคฝนจึงสามารถหาได้จากภาคผนวก ข.

3. การปรับค่าสภาพยอมประสิทธิผลสำหรับการวิเคราะห์ที่ความถี่สูง

ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางไม่เอกพันธ์ (ตัวกลางเนื้อผสม) ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นค่าสภาพยอมในความถี่ต่ำ (Sihvola, 1988) โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวกลางไม่เอกพันธ์ดังกล่าวจะสามารถพิจารณาเป็นตัวกลางเอกพันธ์คือตัวกระเจิงต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น โดยขนาดเล็กในที่นี้หมายถึงความยาวคอร์ดที่ยาวที่สุดของตัวกระเจิง (d_{max}) ต้องมีค่าไม่เกิน $\frac{\lambda}{2\pi}$ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝนโดยพิจารณาบรรยากาศขณะที่มีฝนตกว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ถูกจำกัดที่ความถี่ไม่เกิน 11.8 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อประมาณว่าอนุภาคฝนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของทรงกลมที่มีรัศมี 3.5 มิลลิเมตร (ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแกนของอนุภาคฝนซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนขั้วและรัศมีของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากันแสดงในภาคผนวก ข.) ขณะที่ความถี่ที่ใช้ในข่ายสื่อสารจริงและความถี่ที่ใช้ในการทดลองโดยอาศัยชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน (กล่าวถึงในบทที่ 4) มีค่าในระดับจิกะเฮิรตซ์

ซึ่งสูงกว่าค่าที่ถูกจำกัดโดยเงื่อนไขในการวิเคราะห์ที่อยู่มาก ทำให้จำเป็นต้องปรับปรุงสมการที่ใช้วิเคราะห์ค่าสภาพยอมประสิทธิผลเพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ปัญหาที่ความสูงได้

Kharadly and Choi (1988) เสนอวิธีปรับค่าสภาพยอมประสิทธิผลที่ความถี่ต่ำด้วยการปรับค่าความแยกขั้วได้ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\alpha_h = \frac{\alpha}{1 + j \left(\frac{f}{f_r} \right)^n} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

สำหรับส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าความแยกขั้วได้ที่ความถี่สูงมีค่าดังสมการ (2.26 ก) และ (2.26 ข)

$$\alpha'_h = \frac{\alpha' - \alpha^n \left(\frac{f}{f_r} \right)^n}{1 + \left(\frac{f}{f_r} \right)^{2n}} \quad \dots\dots\dots (2.26 \text{ ก})$$

$$\alpha''_h = \frac{\alpha'' + \alpha' \left(\frac{f}{f_r} \right)^n}{1 + \left(\frac{f}{f_r} \right)^{2n}} \quad \dots\dots\dots (2.26 \text{ ข})$$

โดยที่ α_h , α'_h และ α''_h หมายถึงค่าความแยกขั้วได้ที่ความถี่สูง และส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าความแยกขั้วได้ที่ความถี่สูงตามลำดับ สำหรับ f เป็นความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์และ f_r เป็นความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกระเจิงซึ่งมีค่าดังสมการ (2.27)

$$f_r = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cdot \frac{c}{a} \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

เมื่อ c หมายถึงความเร็วของแสงในอากาศว่างและ a หมายถึงรัศมีของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคฝนทรงกลมแบนขั้ว

สำหรับ n ในสมการ (2.25), (2.26 ก) และ (2.26 ข) มีค่าดังนี้

$$n = \frac{2 + Y \left(\frac{f}{f_r} \right)^m}{1 + (Y + 1) \left(\frac{f}{f_r} \right)^m} \dots\dots\dots (2.28)$$

สำหรับค่า Y และ m มีได้หลายค่า ในที่นี้เลือกใช้ $Y=100$ และ $m=2$ ตามที่อ้างถึงใน Kharadly and Choi (1988)

เมื่อนำค่าความแยกชั้นได้สำหรับความถี่สูงตามสมการ (2.25) ไปแทนค่าความแยกชั้นได้ตามสมการ (2.20) โดยอาศัยสมการ (2.27) และ (2.28) ประกอบ จะได้ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางไม่เอกพันธ์ที่มีความถี่สูง สำหรับค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตกที่ได้จากการวิเคราะห์ดังที่กล่าวมาแสดงในหัวข้อต่อไป

4. สภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตก

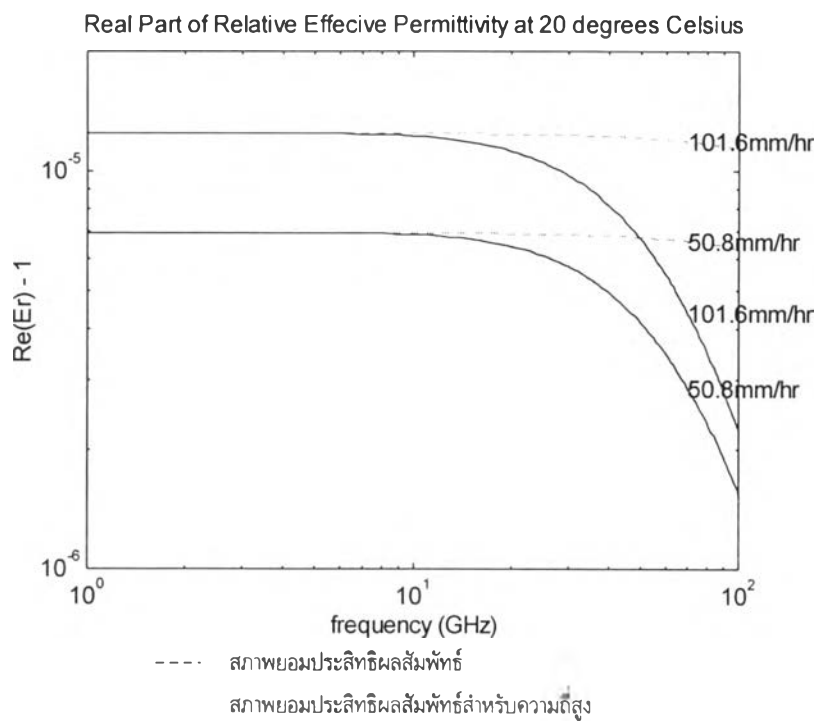
เมื่อแทนค่าความแยกชั้นได้ด้วยค่าความแยกชั้นได้สำหรับความถี่สูง ค่าสภาพยอมประสิทธิผลตามสมการ (2.22) จะกลายเป็น

$$\varepsilon_{eff}^i = \varepsilon + \frac{n_0 \alpha_h^i}{1 - N_i n_0 \frac{\alpha_h^i}{\varepsilon}} \dots\dots\dots (2.29)$$

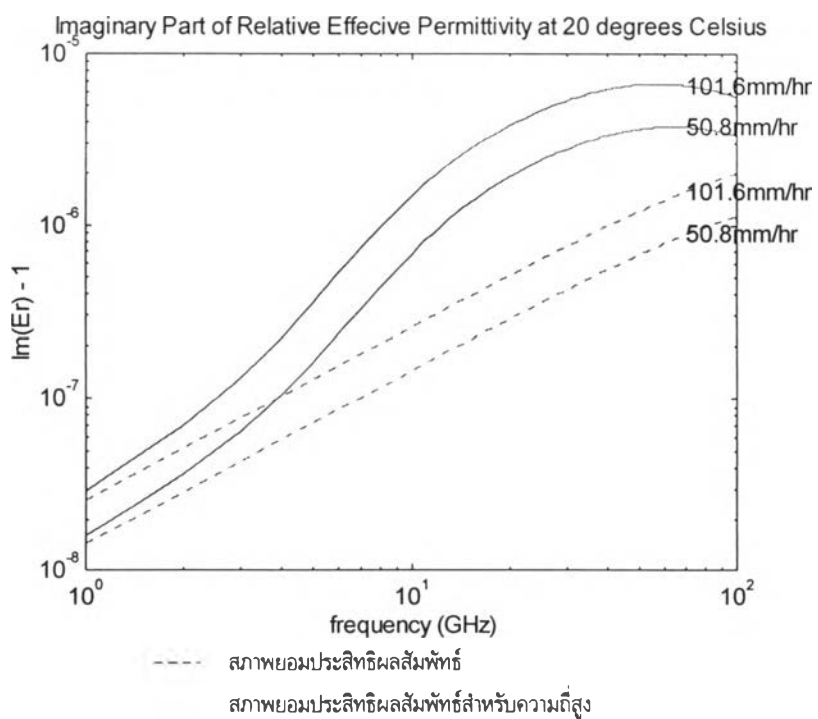
โดย α_h^i คือค่าความแยกชั้นสำหรับความถี่สูงในแนวแกน i ซึ่งมีค่าตามสมการ (2.25)

แทนค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกระเจิงด้วยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 1. สภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำ หน้า 26 ลงในสมการ (2.24) และ (2.29) ทำให้ได้ค่าสภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตกและค่าสภาพยอมที่ปรับแก้ด้วยความแยกชั้นได้สำหรับความถี่สูงตามลำดับค่าทั้งสองแสดงเปรียบเทียบกันในรูป (2.19) และ (2.20) สำหรับรูป (2.19) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงของปริมาณทั้งสองกับความถี่โดยมีอัตราการตกของฝนเป็นพารามิเตอร์ (การกระจายขนาดของอนุภาคฝนใช้แบบ Marshall และ Palmer) ส่วนรูป (2.20) แสดงในส่วนจินตภาพ

สำหรับขนาดของอนุภาคฝนเลือกใช้บางค่าที่แบ่งไว้ในตาราง 2.1 ซึ่งเป็นค่าที่นำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝนในบทต่อไป



รูป 2.19 ส่วนจริงของค่าสภาพยอมประสิทธิผลสัมพัทธ์



รูป 2.20 ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมประสิทธิผลสัมพัทธ์

การวัดปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝน

การเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝน เป็นผลรวมมาจากปรากฏการณ์ย่อย 2 ปรากฏการณ์คือ การเกิดผลต่างของการลดทอน และการเกิดผลต่างของการเลื่อนเฟส การวัดปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรเซชันจึงสามารถวัดในรูปสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอน (differential attenuation coefficient) และสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟส (differential phase shift coefficient) ได้ ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะบ่งชี้ถึงปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวเท่านั้น ขณะที่ในข่ายสื่อสารจริงที่ใช้กรรมวิธีใช้ความถี่ซ้ำโดยอาศัยคลื่นโพลาไรซ์คู่ การวัดปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรเซชันจะแสดงในรูปของการตัดแยกโพลาไรเซชันไขว้ (cross-polarization isolation : XPI) หรือการแยกแยะโพลาไรเซชันไขว้ (cross-polarization discrimination : XPD) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงผลกระทบระหว่างช่องสัญญาณช่องหนึ่งที่มีต่ออีกช่องหนึ่ง ค่าการตัดแยกโพลาไรเซชันไขว้และการแยกแยะโพลาไรเซชันไขว้เป็นค่าในขณะใดขณะหนึ่งเท่านั้น การเก็บข้อมูลเชิงสถิติในระยะยาว จะบันทึกข้อมูลในลักษณะร้อยละของเวลาที่ค่าการตัดแยกหรือการแยกแยะโพลาไรเซชันไขว้มีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนด

ปริมาณการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งในรูปของสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอนและการเลื่อนเฟส การตัดแยกและการแยกแยะโพลาไรเซชันไขว้ และการเก็บข้อมูลในระยะยาวมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอน และสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟส

สมการพื้นฐานที่ใช้แสดงคลื่นระนาบที่แพร่กระจายผ่านตัวกลางปริมาตรหนึ่ง สามารถเขียนได้โดยใช้สนามไฟฟ้าแทนคลื่นระนาบ และพจน์เอกซ์โพเนนเชียลเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติการแพร่กระจายดังนี้

$$E(L) = E(L=0)e^{-jkl} \dots\dots\dots (2.30)$$

โดยที่ค่าคงตัวการลดทอนและค่าคงตัวการเลื่อนเฟส หรือเรียกโดยรวมว่าค่าคงตัวการแพร่กระจาย เป็นลักษณะสมบัติเฉพาะของตัวกลางแต่ละชนิด สำหรับบรรยากาศขณะที่มีฝนตก ซึ่งถูกพิจารณาว่าเป็นตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสียและแอนไอโซทรอปิก ลักษณะสมบัติแอนไอโซทรอปิกจะทำให้ค่าคงตัวการแพร่กระจายมีค่าไม่เท่ากันเมื่อพิจารณาในแต่ละทิศทาง และจะมีแนวที่เป็นแนวแกนหลักซึ่งสนามไฟฟ้าที่มีแนวโพลาไรซ์ตรงกับแนวนี้จะไม่เปลี่ยนโพลาไรเซชันตลอดการแพร่กระจายในตัวกลางชนิดนี้

โดยอาศัยการพิจารณาเกี่ยวกับค่าสภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางที่ผ่านมา แนวแกนหลักของตัวกลางซึ่งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศการแพร่กระจายทั้งสองแนวจะตั้งฉากกัน เมื่อกำหนดให้คลื่นระนาบ

โพลาริซเซชันเชิงเส้นที่มีโพลาริเซชันอยู่ในแนวแกนหลัก 1 และ 2 แพร่กระจายไปในตัวกลางชนิดนี้ โดยที่มีแอมพลิจูดและเฟสเริ่มต้นเหมือนกัน แพร่กระจายไปในระยะทางที่เท่ากัน ผลต่างของแอมพลิจูดและเฟสที่ปลายทางจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวการลดทอนและค่าคงตัวการเลื่อนเฟสของแต่ละแนว โดยที่จะเรียกผลต่างของการลดทอนและผลต่างของการเลื่อนเฟสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางว่า สัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอนและสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟสตามลำดับ ในกรณีที่ 1 หน่วยระยะทางเท่ากับ 1 กิโลเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอนและสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ให้ } E_1(L) &= e^{-jk_1L} \text{ แทนสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชันอยู่ในแนวแกนหลัก 1' และ} \\ E_2(L) &= e^{-jk_2L} \text{ แทนสนามไฟฟ้าที่มีโพลาริเซชันอยู่ในแนวแกนหลัก 2'} \end{aligned}$$

ผลต่างของการลดทอน (DA) มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} DA &= 20 \log |E_2(L)| - 20 \log |E_1(L)| \quad \dots\dots\dots (2.31) \\ &= 20 \log |e^{-jk_2L}| - 20 \log |e^{-jk_1L}| \\ &= 20 \log |e^{j(k_1-k_2)L}| \end{aligned}$$

โดยการแปลงฐานลอการิทึมจากฐานสามัญมาเป็นฐานธรรมชาติ

$$\begin{aligned} DA &= 20 \frac{\ln |e^{j(k_1-k_2)L}|}{\ln 10} \quad \dots\dots\dots (2.32) \\ &= 8.686 \operatorname{Im}(k_1 - k_2)L \quad \text{dB} \end{aligned}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอน (C_a) มีค่าเท่ากับ $8.686 \operatorname{Im}(k_1 - k_2) \times 1000$ หรือ

$$C_a = 8,686 \operatorname{Im}(k_1 - k_2) \quad \text{dB/km} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

และผลต่างของการเลื่อนเฟส (DPS) มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} DPS &= \angle E_2(L) - \angle E_1(L) \quad \dots\dots\dots (2.34) \\ &= \operatorname{Re}(k_1 - k_2)L \quad \text{rad.} \\ &= \frac{180}{\pi} \operatorname{Re}(k_1 - k_2)L \quad \text{deg.} \end{aligned}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอน (C_ϕ) มีค่าเท่ากับ

$$C_\phi = \frac{180}{\pi} \operatorname{Re}(k_1 - k_2) \times 1,000 \text{ deg./km} \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอนและสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟส แสดงลักษณะสมบัติของตัวกลางว่า แกนหลักของตัวกลางมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างไร ในขำยสื่อสารที่ใช้ประโยชน์จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงโพลาริเซชันเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอนและสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟสสามารถบอกได้ว่าคลื่นโพลาริเซชันนั้นจะเปลี่ยนโพลาริเซชันมากน้อยเพียงใด แต่ในระบบที่ใช้คลื่นโพลาริเซชันคู่ ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองนี้ไม่ได้บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นในแต่ละโพลาริเซชัน ปริมาณที่ใช้แสดงความสัมพันธ์หรือผลกระทบระหว่างช่องสัญญาณทั้งสองที่ใช้คลื่นโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกันจะแสดงในรูป การตัดแยกโพลาริเซชันไขว้และการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้ ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2. การตัดแยกโพลาริเซชันไขว้ และการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้

ในขำยสื่อสารที่ใช้กรรมวิธีใช้ความถี่ซ้ำโดยอาศัยคลื่นโพลาริเซชันคู่เพื่อเพิ่มความจุช่องสัญญาณ พลังงานจากช่องสัญญาณหนึ่งสามารถถูกถ่ายโอนไปยังช่องสัญญาณที่ใช้คลื่นโพลาริเซชันที่ตั้งฉากได้ การเปลี่ยนโพลาริเซชันมีสาเหตุมาจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ (สายอากาศส่งและรับมีแบบรูปการแผ่พลังงานข้ามไขว้) และผลกระทบเนื่องจากตัวกลาง ฉะนั้นคลื่นที่รับได้ในแต่ละช่องของขำยสื่อสารจะประกอบด้วยคลื่นที่ส่งมาจากภาคส่งในโพลาริเซชันเดียวกัน และคลื่นที่ส่งมาจากภาคส่งในโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกับภาครับ ดังแสดงดังรูป 2.21

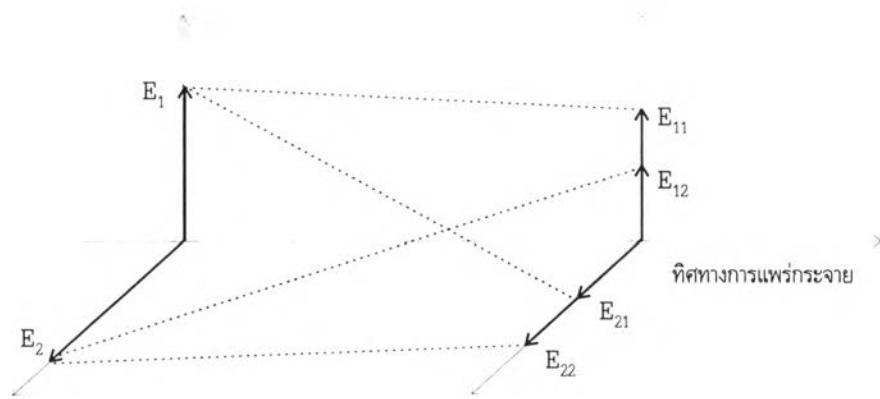
ปริมาณการรบกวนหรือผลกระทบระหว่างช่องสัญญาณแสดงได้ในการตัดแยกโพลาริเซชันไขว้ซึ่งมีนิยาม (Stutzman, 1984) ดังนี้

การตัดแยกโพลาริเซชันไขว้ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างระดับสัญญาณที่ต้องการต่อระดับสัญญาณที่ไม่ต้องการ (crosstalk) ในช่องสื่อสารเดียวกันของเครื่องรับ เมื่อเครื่องส่งส่งสัญญาณทั้งสองโพลาริเซชันพร้อมกัน

จากนิยามของการตัดแยกโพลาริเซชันไขว้และแผนภาพที่แสดงในรูป 2.21 การตัดแยกโพลาริเซชันไขว้สำหรับแต่ละช่องสื่อสาร (แต่ละโพลาริเซชัน) สามารถเขียนในรูปอัตราส่วนของปริมาณต่อไปนี้

การคัดแยกโพลาริเซชันไขว้สำหรับช่องสื่อสารที่ 1 หรือ $xpi_1 = \frac{E_{11}}{E_{12}}$ และ

การคัดแยกโพลาริเซชันไขว้สำหรับช่องสื่อสารที่ 2 หรือ $xpi_2 = \frac{E_{22}}{E_{21}}$



- โดยที่ E_1 และ E_2 คือ สัญญาณที่ส่งจากอุปกรณ์ภาคส่งในโพลาริเซชันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 E_{11} และ E_{12} คือ สัญญาณที่อุปกรณ์ภาครับในโพลาริเซชันที่ 1 และ 2 รับได้จากสัญญาณที่ส่งมาจากโพลาริเซชันเดียวกันตามลำดับ
- และ E_{21} และ E_{22} คือ สัญญาณที่อุปกรณ์ภาครับในโพลาริเซชันที่ 1 และ 2 รับได้จากสัญญาณที่ส่งมาจากโพลาริเซชันที่ตั้งฉากตามลำดับ

รูป 2.21 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
 เพื่อใช้อธิบายการคัดแยกและการแยกแยะโพลาริเซชัน

อัตราส่วนทั้งสองนี้อาจจะเป็นปริมาณเชิงซ้อน สำหรับขนาดของอัตราส่วน สามารถที่จะแสดงในรูปเดซิเบลได้โดยใช้สัญลักษณ์ XPI_1 ในหน่วยเดซิเบลแทน xpi_1 และใช้ XPI_2 ในหน่วยเดซิเบลแทน xpi_2

การวัดปริมาณการคัดแยกโพลาริเซชันไขว้ จะต้องให้อุปกรณ์ภาคส่งส่งสัญญาณทั้งสองโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกันออกมา ขณะเดียวกันอุปกรณ์ภาครับในแต่ละช่อง จะต้องสามารถแยกองค์ประกอบที่รับมาจากแต่ละช่องได้ นั่นคืออุปกรณ์ภาครับในช่องที่ 1 จะต้องสามารถแยกองค์ประกอบของสัญญาณที่รับได้ว่าเป็น E_{11} หรือ E_{12} ได้ ขณะเดียวกันอุปกรณ์ภาครับในช่องที่ 2 ก็จะต้องสามารถแยกองค์ประกอบของสัญญาณที่รับได้ว่าเป็น E_{22} หรือ E_{21} ได้ ซึ่งเป็นการไม่สะดวก ในทางปฏิบัติการวัดปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชัน จะทำการบันทึกค่าในรูปการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้ ซึ่งมีนิยาม (Stutzman, 1984) ดังนี้

การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างระดับสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับที่มีโพลาริเซชันเดียวกันกับเครื่องส่งต่อระดับสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับที่มีโพลาริเซชันตรงข้ามกับเครื่องส่ง โดยเครื่องส่งส่งสัญญาณในโพลาริเซชันเดียวเท่านั้น

จากนิยาม สามารถเขียนการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้สำหรับแต่ละช่องสื่อสารในรูปอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้สำหรับช่องสื่อสารที่ 1 หรือ } xpd_1 &= \frac{E_{11}}{E_{21}} \text{ และ} \\ \text{การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้สำหรับช่องสื่อสารที่ 2 หรือ } xpd_2 &= \frac{E_{22}}{E_{12}} \end{aligned}$$

ในข่ายสื่อสารจริงที่ใช้คลื่นโพลาริซซ์คู่ ปริมาณที่ต้องการคือการตัดแยกโพลาริเซชันไขว้ แต่การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้เป็นปริมาณที่สะดวกในการวัด ในทางปฏิบัติจึงใช้การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้แทนการตัดแยกโพลาริเซชันไขว้ โดยถือว่าปริมาณทั้งสองมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้โดยอาศัยสมมติฐานดังนี้

1. อุปกรณ์ภาครับมีแบบรูปการแผ่พลังงานร่วมขั้วและแบบรูปการแผ่พลังงานข้ามขั้วที่เหมือนกันทั้งสองช่อง
2. แนวแกนหลักของตัวกลางทั้งสองแนวตั้งฉากกัน

การใช้การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้ (หรือการตัดแยกโพลาริเซชันไขว้) แสดงปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชัน จะสื่อความหมายในข่ายสื่อสารที่ใช้คลื่นโพลาริซซ์คู่ กล่าวคือ ปริมาณนี้จะแสดงระดับการรบกวนระหว่างสัญญาณในแต่ละช่อง แต่ค่าที่ได้เป็นเพียงค่าในขณะหนึ่ง (instantaneous value) เท่านั้น ส่วนการเก็บข้อมูลในระยะยาวหรือการเก็บข้อมูลในเชิงสถิติ สำหรับข่ายสื่อสารหนึ่ง ๆ จะบันทึกข้อมูลในลักษณะร้อยละของเวลาที่มีการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้มีค่าต่ำกว่าที่กำหนด ในระยะเวลาหนึ่งซึ่งโดยทั่วไปคือ 1 ปี ในบางครั้งค่าร้อยละของเวลาอาจจะบันทึกเป็นจำนวนชั่วโมงแทน หรืออาจจะบันทึกในลักษณะกลับกันคือ บันทึกเป็นร้อยละของเวลาที่ข่ายสื่อสารนั้นมีความเชื่อถือได้ในระยะเวลา 1 ปี