การทบทวนปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กรณีภาวะโลกหลัว “Global Dimming”

Reviewing the Phenomenon of Climate Change: The Case of Global Dimming

นิกร มหาวัน[1] วันเพ็ญ เจริญตระกูลปีติ[2*]

Nikorn Mahawan[1] Wanpen Charoentrakulpeeti[2*]

Received: 20/02/2023

Revised: 22/05/2023

Accepted: 01/06/2023

บทคัดย่อ

รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีความสำคัญต่อระบบภูมิอากาศเพราะเป็นปัจจัยขับเคลื่อนสำคัญในวัฏจักรของน้ำและวัฏจักรคาร์บอน เป็นแหล่งพลังงานหลักการเจริญเติบโตของพืช แต่ในช่วง ค.ศ. 1960 เป็นต้นมา ประเทศต่าง ๆ ส่วนใหญ่ได้เผชิญกับรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลกมีแนวโน้มลดลง เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า Global Dimming (ภาวะโลกหลัว) ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ยังมีข้อมูลและความเข้าใจน้อยเมื่อเทียบกับภาวะโลกร้อนโดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียที่เกิดภาวะโลกหลัวหลังภูมิภาคยุโรปและอเมริกา บทความนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อทบทวนสถานการณ์ภาวะโลกหลัวในแต่ละภูมิภาคของโลกและในประเทศไทย ด้วยการทบทวนข้อมูลเกี่ยวกับภาวะโลกหลัวที่มีการเผยแพร่สู่สาธารณะที่สำคัญต่าง ๆ เช่น รายงานผลการศึกษาของ IPCC รวมถึงบทความวิชาการที่เผยแพร่ผ่านแหล่งที่สำคัญ เช่น American Geophysical Union, American Meteorological Society, Advancing Earth and Space Science, ScienceDirect, Royal Meteorological Society, Springer, Wiley ผลการศึกษาพบว่าในช่วงทศวรรษ 1960 – 1980 ภาวะโลกหลัวพบในกลุ่มประเทศอุตสาหกรรม โดยรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกลดลงทั้งจากลำแสงอาทิตย์โดยตรงและจากการสะท้อนของละอองลอยในอากาศที่มีองค์ประกอบจำพวกซัลเฟต เขม่าดำ และฝุ่นละออง ที่หนาแน่นในบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องถึงพื้นผิวโลกลดลง นอกจากนี้ยังเกิดจากปัจจัยร่วม คือ การดูดซับมลพิษของละอองลอยในบรรยากาศทำให้เกิดภาวะความร้อนคงที่ในบรรยากาศก่อให้เกิดการยับยั้งการรวมตัวของเมฆ ซึ่งเป็นภาวะโลกหลัว และหลังทศวรรษ 1980 เป็นต้นมา กลุ่มประเทศอุตสาหกรรมได้เผชิญกับภาวะโลกแจ้ง ในขณะที่กลุ่มประเทศกำลังพัฒนาบางประเทศรวมถึงประเทศไทยเริ่มเข้าสู่ภาวะโลกหลัว จากหลักฐานการทบทวนดังกล่าวช่วยสร้างความรู้ความเข้าใจและความเท่าทันต่อสถานการณ์และสาเหตุของภาวะโลกหลัวอันจะนำไปสู่การกำหนดนโยบายการบรรเทาผลกระทบและการรู้รับปรับตัวกับการเปลี่ยนแปลงในอนาคต

คำสำคัญ: ภาวะโลกหลัว ละอองลอย รังสีดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

[1] คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Faculty of Architecture and Environmental Design, Maejo University

[2] ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University

[*]ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: wanpen.c@cmu.ac.th

Abstract

Solar radiation at the Earth's surface is crucial to the climate system because it drives the water and carbon cycles and is the primary energy source for plants growth. Since 1960, surface solar radiation has decreased in most of the world. This phenomenon, known as global dimming, is a climate change component that receives less attention than global warming, particularly in Asia, which experiences it after Europe and the United States. This article aims to enhance understanding of global dimming by reviewing scholarly publications from all world regions, including Thailand i.e., IPCC report, academic papers from American Geophysical Union, American Meteorological Society, Advancing Earth, and Space Science, ScienceDirect, Royal Meteorological Society, Springer, Wiley. The results show that during the 1960s and 1980s, global dimming found in the Industrial regions regarding solar radiation declined due to both the sun's radiation and the energy reflected by aerosols such as sulfate, black carbon, and particulates. This reduces the amount of solar radiation that reaches the surface of the Earth. The minor component is the pollutant absorption of aerosol in the atmosphere, which contributes to the heat and stability of the atmosphere, hence restricting cloud accumulation, which is the global dimming phenomenon. From the 1980s, industrialized nations witnessed a global brightening, whilst Thailand and other developing nations experienced a global dimming. The reviews expand knowledge and perceptions of global dimming, resulting in future actions to mitigate and adapt to climate change.

Keywords: Global Dimming, Aerosols, Solar Radiation, Climate Change

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นวิกฤตปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชากรโลกในปัจจุบันและต่อเนื่องไปถึงอนาคต ภายใต้ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (หรือที่เรียกว่า ภาวะโลกรวน) สามารถอธิบายได้เป็น 3 ปรากฏการณ์ย่อย เนื่องจากมีสาเหตุและผลกระทบที่แตกต่างกัน ได้แก่ (1) ภาวะโลกร้อน “Global Warming” (2) เกาะความร้อนของเมือง “Urban Heat Island” และ (3) ภาวะโลกหลัว[3] “Global Dimming” โดยการศึกษาเชิงประจักษ์เกี่ยวกับภาวะโลกหลัวในภูมิภาคเอเชียยังมีไม่มากนัก (Kambezidis, Kasdaoutis, Kharol, Moorthy, Satheesh, Kalapureddy, Badarinath, Sharma & Wild, 2012) เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ปรากฏการณ์แรก ภาวะโลกหลัวเป็นที่รู้จักต่อสาธารณะเมื่อ Stanhill and Moreshet (1992) ได้เสนอแนวโน้มการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลก ในช่วง 1958-1985 เป็นครั้งแรก จากนั้นได้มีการค้นพบข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่มีลักษณะที่ลดลงเช่นเดียวกันในหลาย

[3] ภาวะโลกหลัว หรือ “Global Dimming” เป็นคำใหม่สำหรับประเทศไทยและยังไม่มีการบัญญัติศัพท์นี้มาก่อน ในการทบทวนของบทความนี้จึงได้ให้คำนิยามว่า “โลกหลัว” เนื่องจากได้เปรียบเทียบลักษณะการเกิดของ Global Dimming กับ Haze ซึ่งราชบัณฑิตยสถาน ได้บัญญัติไว้ว่า “ฟ้าหลัว” ที่เกิดจากการที่อากาศมีอนุภาคของเกลือจากทะเลหรือมหาสมุทร และอนุภาคของควันไฟ ตลอดจนฝุ่นละอองจำนวนมากกระจายล่องลอย ทำให้เกิดเป็นฝ้าขาวในอากาศ (http://legacy.orst.go.th/?knowledges=ฟ้าหลัว-๑๙-มีนาคม-๒๕๕๐) รวมถึงกรมอุตุนิยมวิทยามีการใช้คำว่าฟ้าหลัว ในการอธิบายลมฟ้าอากาศด้วย ในขณะที่ลักษณะของการเกิด “Global Dimming” เกิดจากอนุภาคของละอองลอยในบรรยากาศที่กั้นไม่ให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านมายังพื้นโลกได้และทำให้พื้นผิวโลกได้รับแสงอาทิตย์น้อยลง ด้วยลักษณะดังกล่าว ในบทความนี้จึงให้คำแปล “Global Dimming” ว่า “ภาวะโลกหลัว”

ภูมิภาคของโลกตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา (Stanhill & Cohen, 2001) ด้วยการติดตั้งโครงข่ายสถานีตรวจวัดพลังงานรังสีของโลกด้วยเครื่องตรวจวัดที่มีความแม่นยำและสามารถเปรียบเทียบกันได้ (Stanhill, 2005)

รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกนับว่ามีบทบาทสำคัญต่อระบบภูมิอากาศ ในฐานะพลังงานหลักที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของระบบภูมิอากาศ บริเวณส่วนสัมผัสระหว่างบรรยากาศ (Atmospheric) กับพื้นผิวที่เป็นที่อาศัยของสิ่งมีชีวิต (Biosphere) และส่วนภาคพื้นที่ที่เป็นน้ำแข็งและทะเล (Cryosphere and Ocean Components) ดังนั้นหากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีการเปลี่ยนแปลงย่อมส่งผลต่อระบบภูมิอากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (Wild, 2009) ภาวะโลกหลัว เป็นปรากฏการณ์ที่มีสาเหตุจากการกระจายตัวของละอองลอยในบรรยากาศที่ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลกลดลง และยังลดอัตราการระเหยของน้ำทะเลในซีกโลกเหนือ (Gautam, Hsu, Lau & Kafatos, 2009) รวมถึงเป็นสาเหตุของการเคลื่อนตัวของแนวน้ำฝนบริเวณเขตโซนร้อนไปทางทิศใต้ทำให้เกิดความแห้งแล้งบริเวณทะเลทรายซาฮาร่าในช่วงทศวรรษที่ 1970s และ 1980s (Shah, 2005; Hwang, Frierson & Kang, 2013) ผลกระทบของภาวะโลกหลัว มีความรุนแรงเทียบได้กับผลกระทบของภาวะโลกร้อนเป็นทวีคูณ ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาภาวะโลกหลัวจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการควบคู่ไปกับการแก้ไขปัญหาภาวะโลกร้อน (Shah, 2005) อย่างไรก็ตามข้อมูลเชิงประจักษ์เกี่ยวกับภาวะโลกหลัวในภูมิภาคเอเชียยังมีไม่มากนัก โดยเฉพาะประเทศไทยที่ยังขาดแคลนข้อมูลและความรู้ความเข้าใจในเรื่องภาวะโลกหลัว ดังนั้นบทความนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อรวมรวบข้อมูลเกี่ยวกับภาวะโลกหลัวที่มีการเผยแพร่ในเอกสารวิชาการต่าง ๆ เพื่อการตอบคำถามที่สำคัญ โดยเริ่มจากสาเหตุของการเกิดภาวะโลกหลัว อิทธิพลของกระบวนการเป็นเมืองต่อภาวะโลกหลัว สถานการณ์ภาวะโลกหลัวที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากภาวะโลกหลัว และลักษณะความเชื่อมโยงระหว่างภาวะโลกหลัวและโลกร้อน เพื่อสร้างความรู้ ความเข้าใจ และความเท่าทันต่อสถานการณ์ภาวะโลกหลัวอันจะนำไปสู่การปรับตัวและรับมือหรือบรรเทาผลกระทบของสังคมไทยต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สถานการณ์ภาวะโลกหลัวในแต่ละภูมิภาคของโลกและการปรากฏของภาวะโลกหลัวในประเทศไทย

2.2 เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างภาวะโลกหลัวและภาวะโลกร้อน

3. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ ที่ต้องการสร้างความรู้ความเข้าใจในสถานการณ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับภาวะโลกหลัว (Global Dimming) ด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis Technique) โดยมีคำหลักที่สำคัญ คือ “ภาวะโลกหลัว” ด้วยการค้นคว้าและรวบรวบข้อมูลทุติยภูมิจากแหล่งต่าง ๆ ที่มีการเผยแพร่และสามารถเข้าถึงได้ ประกอบด้วย รายงานการศึกษาของ IPCC และบทความวิชาการจากแหล่งเผยแพร่ต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 1992 ถึง 2022 สำหรับฐานข้อมูลทั้งหมด ประกอบด้วย American Geophysical Union, American Meteorological Society, Advancing Earth and Space Science, ScienceDirect, Royal Meteorological Society, Springer, Wiley จากนั้นจึงจัดหมวดหมู่ข้อมูลตามกรอบประเด็นสำคัญที่เกี่ยวกับภาวะโลกหลัว ได้แก่ สถานการณ์ สาเหตุ ผลกระทบ และความเชื่อมโยงกับภาวะโลกร้อน เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ตามประเด็นของวัตถุประสงค์ คือ สถานการณ์ภาวะโลกหลัวในภูมิภาคต่าง ๆ ของโลก และประเทศไทย และความเชื่อมโยงภาวะโลกหลัวและโลกร้อน

นิยามศัพท์ การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก มีคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ดังกล่าวใน 2 ลักษณะ คือ “Global Dimming” และ “Global Brightening” ซึ่งในภาษาไทยยังไม่มีการ

บัญญัติศัพท์ดังกล่าวอย่างเป็นทางการ ดังนั้น การศึกษานี้ ใช้คำว่า “โลกหลัว” และ “โลกแจ้ง” โดยที่ “โลกหลัว” หมายถึง ภาวะที่รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก ณ ภูมิภาคหนึ่งในหนึ่งช่วงเวลา มีแนวโน้มที่ลดลง เกิดจากอนุภาคของละอองลอยในบรรยากาศที่กั้นไม่ให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านมายังพื้นโลกได้และทำให้พื้นผิวโลกได้รับแสงอาทิตย์น้อยลง อันเนื่องมาจากการลดลงของละอองลอยที่ดูดซับรังสีอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศของโลก (Wild, 2014, p. 39-47)

4. ผลการศึกษา

จากการทบทวนเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ พบว่า ปรากฏการณ์ภาวะโลกหลัว ยังไม่เป็นที่รู้จักกันในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนามากนัก รวมถึงประเทศไทย ดังนั้นในส่วนของผลการศึกษา จึงเป็นการให้รายละเอียดเกี่ยวกับสถานการณ์ ภาวะโลกหลัวที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลกและประเทศไทย แล้วจึงทำความเข้าใจถึงสาเหตุของการเกิดภาวะโลกหลัวเพื่อทำความเข้าใจถึงที่มาของปรากฏการณ์ดังกล่าว จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงอิทธิพลของกระบวนการเป็นเมืองที่มีต่อภาวะโลกหลัว และพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์ภาวะโลกหลัว สุดท้ายเป็นการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างภาวะโลกหลัวและภาวะโลกร้อน

4.1 สถานการณ์ของภาวะโลกหลัว

สารละอองลอยที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นปัจจัยหลักที่ส่งเสริมการกระจายและการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ในบรรยากาศ ซึ่งในช่วงเวลาที่สารละอองลอยในบรรยากาศสูงนำไปสู่ภาวะที่ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ผ่านบรรยากาศลงตกกระทบพื้นผิวโลกได้น้อยลง จึงเป็นภาวะแสงหลัว (Solar Dimming) ในทางตรงกันข้าม ในช่วงเวลาที่ในบรรยากาศมีสารละอองลอยน้อย การกระจายและการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ในบรรยากาศน้อย รังสีดวงอาทิตย์ผ่านลงสู่พื้นผิวโลกได้มาก จึงเป็นภาวะแสงแจ้ง (Solar Brightening) (Norris & Wild, 2007) โดยการศึกษาเกี่ยวกับภาวะโลกหลัวนั้นเริ่มให้ความสนใจในปี ค.ศ. 1950 – 1980 ซึ่งพบว่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีแนวโน้มลดลงในช่วงก่อนทศวรรษ 1990 ในกลุ่มประเทศพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในทวีปยุโรปและอเมริกา ต่อมาในช่วงหลังทศวรรษ 1990 ภาวะโลกหลัวได้ปรากฏในทวีปเอเชียมากขึ้น ในขณะที่ทวีปยุโรปและอเมริกากลับมีภาวะโลกแจ้งเกิดขึ้น ดังนั้น สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจึงมีการแบ่งตามช่วงเวลา โดยช่วงเวลาก่อนปี ค.ศ. 1990 เป็นช่วงของการเกิดภาวะโลกหลัว (Dimming Period) และหลังปี ค.ศ. 1990 เป็นช่วงเวลาของการเกิดภาวะโลกแจ้ง (Brightening Period) (Wild, 2009) ดังนี้

4.1.1 ปรากฏการณ์ภาวะโลกหลัว

ปรากฏการณ์ภาวะโลกหลัวอยู่ในช่วงเวลาทศวรรษ 1960-1980 โดยมีการรายงานข้อมูลเกี่ยวกับปรากฏการณ์ภาวะโลกหลัวในภูมิภาคต่าง ๆ เช่น ในทวีปยุโรป ประเทศสวิสเซอร์แลนด์มีอัตราการเกิดภาวะโลกหลัวรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวลดลงเป็นอย่างมากคือ -10 Wm^{-2} ของช่วงปี ค.ศ. 1960 – 1980 ซึ่งเป็นอัตราการเกิดภาวะโลกหลัวที่มากที่สุดบนแผนที่ภาคพื้นทวีปยุโรป รองลงมาเป็นประเทศอิสราเอลมีรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวลดลงอยู่ที่ -8.8 Wm^{-2} ในช่วงเวลาของปี ค.ศ. 1954 – 1994 อัตราการเกิดของภาวะโลกหลัวน้อยที่สุดบนภาคพื้นทวีปยุโรปอยู่ในประเทศตุรกี เท่ากับ -2 Wm^{-2} จากการรายงานข้อมูลในแถบขั้วโลกเหนือพบการเกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกหลัวตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1960 ในขณะที่ทวีปเอเชียพบว่าประเทศที่เกิดภาวะโลกหลัวมักเป็นประเทศที่มีเนื้อที่ขนาดใหญ่ เช่น สหภาพโซเวียต จีน อินเดีย อีกทั้งยังมีประชากรอาศัยมากที่สุดของโลกและเป็นฐานผลิตในภาคอุตสาหกรรมด้วย จึงทำให้การเกิดภาวะโลกหลัวสูง รวมถึงกลุ่มประเทศที่มีเนื้อที่จำกัดแต่มีอัตราความหนาแน่นของประชากรสูงติดอันดับโลกอย่างเช่น ญี่ปุ่น เขตบริหารพิเศษฮ่องกง ก็มีอัตราการเกิดภาวะโลกหลัวสูงในช่วงเวลาดังกล่าวเช่นกัน Alpert and Kishcha (2008) พบอัตราเร่งในการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์จาก -0.05 เป็น -0.32 วัตต์/ตารางเมตร/ปี ในกรณีที่ความหนาแน่นของประชากรเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 200 คน/ตารางกิโลเมตร อย่างไร

ก็ตาม Wang, Wild, Sanchez-Lorenzo and Manara (2017) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์จะไม่มีความแตกต่างตามการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประชากร ในกรณีที่เมืองมีการบริหารจัดการและป้องกันปัญหามลภาวะ เช่น การออกกฎหมายและข้อบังคับ พร้อมทั้งโครงการปรับปรุงฟื้นฟูมลภาวะให้ดีขึ้น ดังนั้น ภาวะโลกหลัวในช่วงหลัง หรือ ทศวรรษที่ 2010 การเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกมีความสัมพันธ์กับมาตรการการป้องกัน ลดและฟื้นฟูมลภาวะของเมืองมากกว่าจำนวนหรือความหนาแน่นของประชากร สำหรับในทวีปแอฟริกา พบว่าพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดภาวะโลกหลัวอยู่ในพื้นที่ที่มีทะเลทรายขนาดใหญ่ คือ ทะเลทรายคาลาฮารี ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปริมาณของละอองลอยจากทะเลทราย และในทวีปออสเตรเลียพบในประเทศนิวซีแลนด์เป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบรายงานการศึกษาภาวะโลกหลัวในช่วงเวลานี้ในทวีปอเมริกาใต้ รายละเอียดดังตารางที่ 1

จากการใช้แบบจำลองการถ่ายโอนการแผ่รังสีและดาวเทียม ของ Hatzianastassiou, Ioannidis, Korras-Carraca, Gavrouzou, Papadimas, Matsoukas, Benas, Fotiadi, Wild and Vardavas (2020) พบว่ารังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวทั่วโลกลดลง เท่ากับ −2.65 Wm^{-2} โดยในซีกโลกเหนือมีค่าเท่ากับ −2.2 Wm^{-2} ในขณะที่ซีกโลกใต้ มีค่าเท่ากับ −3.1 Wm^{-2} ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2009 การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวจะเห็นได้ชัดเจนในซีกโลกใต้ การลดลงของแสงช่วงหลังปี 2000 มีสาเหตุหลักมาจากเมฆ และสาเหตุรองมาจากละอองลอย โดยเมฆปกคลุมทั้งหมดทำให้รังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวลดลง −1.4 Wm^{-2} และความหนาของละอองลอยมีผลให้รังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวลดลง −0.7 Wm^{-2} ผลลัพธ์ของแบบจำลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Stamatis, et al. (2022) ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก ระหว่างค.ศ. 1980-2019 รวม 41 ปี พบว่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวของโลกเท่ากับ -6.301±0.193 Wm^{-2} (บนพื้นฐานข้อมูลเฉลี่ยรายปี) ในขณะที่ขั้วโลกเหนือเท่ากับ -5.716±0.281 Wm^{-2} และขั้วโลกใต้เท่ากับ -6.161±0.379 Wm^{-2} จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าโลกกำลังอยู่ในภาวะหลัวจากก๊าซเรือนกระจกที่มนุษย์ปล่อยสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตรงโดยประมาณของรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิว เปรียบเทียบสองช่วงเวลาโดยประมาณระหว่าง ทศวรรษ 1960 – 1980 และทศวรรษ 1980 - 2010

ประเทศ	ช่วงปี ค.ศ.	การเปลี่ยนแปลง (Wm^{-2})	ช่วงปี ค.ศ.	การเปลี่ยนแปลง (Wm^{-2})
ทวีปยุโรป	**1971 – 1986**	**-3.1**	**1987 – 2002**	**1.4**
ไอร์แลนด์	1954 – 1995	-3.5		
เอสโตเนีย	1955 – 1986	-5.2	1990 – 2007	เกิดภาวะโลกแจ้ง
เยอรมัน	1964 – 1990	-6	1985 – 2005	4.6
สวิสเซอร์แลนด์	1960 – 1980	-10	1981 – 2005	2.6
คาบสมุทรไอบีเรีย	1950 – 1980	-3	1980 – 2000	4
ตุรกี	1960 – 1994	-2		
อิสราเอล	1954 – 1994	-8.8		
กรุงมอสโค	1958 – 1993	-3.1	1985 – 2006	เกิดภาวะโลกแจ้ง
ทวีปเอเชีย				
โซเวียต	1960 – 1987	-1 ถึง -8		
จีน	1961 – 1989	-7	2000 – 2005	-4.2
ญี่ปุ่น	1971 – 1989	-1.3	1990 – 2002	8
เขตบริหารพิเศษฮ่องกง	1958 – 1992	-18		
อินเดีย	1966 – 1990	-2.9	1984 – 2001	-8.6

ประเทศ	ช่วงปี ค.ศ.	การเปลี่ยนแปลง (Wm^{-2})	ช่วงปี ค.ศ.	การเปลี่ยนแปลง (Wm^{-2})
ไทย*			1991 - 2017	-0.104
ทวีปแอฟริกา				
กรุงไคโร	1968 – 1994	-13		
แอฟริกาใต้/นามิเบีย	1960 – 1990	-5.4		
ทวีปอเมริกาเหนือ				
สหรัฐอเมริกา	1961 – 1990	-6	1995 – 2007	8
แคนาดา	1958 – 1999	-2.6		
แคริบเบียน	1961 – 1990	-10		
ทวีปออสเตรเลีย				
นิวซีแลนด์	1954 – 1990	-4.8	1990 – 2008	0.5
ออสเตรเลีย			1994 – 2003	เกิดภาวะโลกแจ้ง
แถบขั้วโลก				
บริเวณแอนตาร์กติกา	1957 – 1994	-2.8		
บริเวณขั้วโลกใต้	1976 – 1987	เกิดภาวะโลกหลัว	1992 – 2004	4.1
บริเวณอาร์กติก	1950 – 1993	-3.8		

หมายเหตุ: ช่วงเวลาของการศึกษาเป็นโดยประมาณ โดยพิจารณาจากช่วงเวลาส่วนใหญ่ของการศึกษาอยู่ในช่วงทศวรรษใด
ที่มา: Wild (2009)

4.1.2 ปรากฏการณ์ภาวะโลกแจ้ง

ในช่วงทศวรรษ 1986 - 2000 พบว่ารังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวของโลกเพิ่มขึ้น 2.2 Wm^{-2} (Wild, Grieser & Schar, 2008) จากการรายงานข้อมูล พบว่าทวีปยุโรปหลังปี ค.ศ. 1990 เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกแจ้งกล่าวคือ อัตราภาวะโลกหลัวของทวีปยุโรปได้เปลี่ยนไปสู่ภาวะสว่างขึ้น Russak (2009) รายงานภาวะโลกแจ้งในประเทศเอสโตเนียในช่วงระยะเวลาของปี ค.ศ. 1990– 2007 โดยมีอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Wild (2009) พบอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งอยู่ที่ 4.6 Wm^{-2} ในประเทศเยอรมันในช่วงระยะเวลาปี ค.ศ.1985 –2005 ในส่วนของ Sanchez-Lorenzo, Brunetti, Calbo and Martin-Vide (2007) พบว่าคาบสมุทรไอบีเรียพบอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งอยู่ที่ 4 Wm^{-2} และ Norris and Wild (2007) พบว่าในช่วงระยะเวลาของปี ค.ศ. 1987 – 2002 ภาพรวมของทวีปยุโรปนั้นพบอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งอยู่ที่ 1.4 Wm^{-2}

ทวีปเอเชียมีการรายงานข้อมูลปรากฏการณ์ภาวะโลกแจ้งภายหลังปี ค.ศ. 1990 โดย Shi, Hayasaka, Ohmura, Chen, Wang, Zhao, Che and Xu (2008) พบว่าในช่วงระยะเวลาปี ค.ศ. 1990 – 2000 พบอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งในประเทศจีน อยู่ที่ 2.7 Wm^{-2} ส่วน Ohmura (2009) พบว่าในประเทศญี่ปุ่นมีอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งอยู่ที่ 8 Wm^{-2} ในช่วงระยะเวลาปี ค.ศ. 1990 – 2002 ไม่พบรายงานการเกิดภาวะโลกแจ้งทวีปแอฟริกาในช่วงหลังปี ค.ศ. 1990

ทวีปออสเตรเลีย มีอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งในประเทศออสเตรเลียในช่วงปี ค.ศ. 1994–2003 แต่ไม่สามารถแสดงเป็นตัวเลขได้ ในขณะที่ Liley (2009) รายงานอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งอยู่ที่ 0.5 Wm^{-2} ในประเทศนิวซีแลนด์ในช่วงปีระหว่าง ค.ศ. 1990–2008 ส่วนในทวีปอเมริกาเหนือ Riihimaki, Vignola and Long (2009) พบอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งในรัฐออริกอน ในอัตรา 2 Wm^{-2} ถึง 3 Wm^{-2} ในช่วงปี ค.ศ. 1980–2007 บริเวณขั้วโลกมีการรายงานข้อมูล

ปรากฏการณ์ภาวะโลกแจ้งในช่วงระยะเวลาของปี ค.ศ. 1992–2004 มีอัตราการเกิดภาวะโลกแจ้งอยู่ที่ 4.1 Wm^{-2} (Wild, 2009)

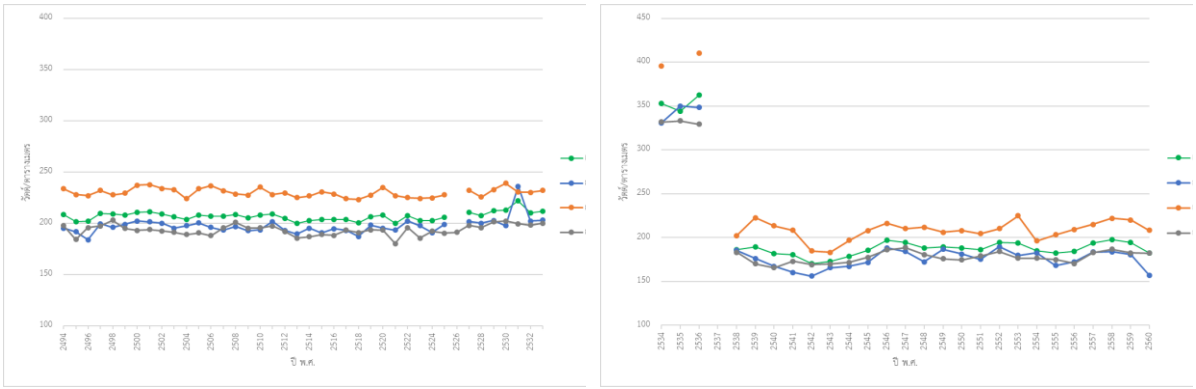
4.1.3 สถานการณ์ภาวะโลกหลัวในประเทศไทย

ในภาพรวมของสถานการณ์ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย นิกร มหาวัน และวันเพ็ญ เจริญตระกูลปีติ (2562) ใช้ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของประเทศไทยและแบบจำลองค่ารังสีรวม พบว่า ในช่วงก่อนปี พ.ศ. 2533 (ก่อนค.ศ. 1990) แนวโน้มค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาก่อนพ.ศ. 2533 ประเทศไทยอยู่ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2530-2534) ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนผ่านการพัฒนาประเทศ มีการวางระบบโครงสร้างพื้นฐานในกรุงเทพมหานคร และเมืองหลักของประเทศ เช่น ระบบขนส่ง ระบบชลประทาน ระบบไฟฟ้า ระบบพลังงานต่าง ๆ รวมถึงเริ่มมีนโยบายการลงทุนด้านอุตสาหกรรม แต่ยังไม่เข้มข้นมากในทางปฏิบัติ ดังนั้นละอองลอยในบรรยากาศจากกิจกรรมดังกล่าวยังไม่เป็นผลต่อการเกิดภาวะโลกหลัวในช่วงเวลานี้ ในขณะที่แนวโน้มความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศในช่วงหลังปี พ.ศ. 2533 (หลังปี ค.ศ. 1990) พบว่า มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ 0.01 โดยเฉพาะใน ภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ลดลงสูงสุดในฤดูหนาว การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์มีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความหนาเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศ (AOT) โดยค่า AOT สูงสุดของภาพรวมทั้งประเทศ คือ เดือนมีนาคม มีค่าเท่ากับ 0.789 (ค่าดัชนีมาตรฐานกรณีท้องฟ้าโปร่ง เท่ากับ 0 – 4 หมายถึง แสงไม่สามารถส่องถึงพื้นผิวได้) อธิบายได้ว่าท้องฟ้าของประเทศไทยมีละอองลอยในบรรยากาศบางส่วน ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการเห็นสูงสุด และมีผลต่อการเห็นดวงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันเล็กน้อย

นอกจากนี้มีงานศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวของจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้ข้อมูลสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ 7 สถานี จังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงปี พ.ศ. 2538-2560 พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ลดลงในสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีกิจกรรมของเมือง ในขณะที่สถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยป่าไม้มีแนวโน้มความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความเข้มข้นของกิจกรรมที่น้อยทำให้มีมลภาวะทางอากาศน้อยกว่า (Promplin & Charoentrakulpeeti, 2020) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศ จากการทดสอบสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear Regression) ของ สุรีย์พร พรหมผลิน (2564) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกถึงร้อยละ 60.4 ส่วนร้อยละ 39.6 ของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกเป็นผลจากปัจจัยอื่น โดยที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกจะลดลง 459.476 หน่วย ในทุก ๆ ร้อยละ 1 ของการเพิ่มของค่าความหนาเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศ และพบว่า ค่าความหนาแน่นเชิงแสงของละอองลอยค่าความหนาแน่นเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศจะเพิ่มขึ้น 0.000289 หน่วย ในทุก ๆ ร้อยละ 1 ของการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนพื้นที่เกษตรกรรม และเพิ่มขึ้น 0.000547 หน่วย ในทุก ๆ ร้อยละ 1 ของการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ในทางตรงกันข้ามค่าความหนาแน่นเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศจะลดลง 0.002141 หน่วย สำหรับการเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ร้อยละ 1 ของสัดส่วนพื้นที่ป่าไม้

หากพิจารณาแนวโน้มเฉพาะฝุ่นละออง (Particulate Matters) Chirasophon and Pochanart (2020) ใช้ข้อมูลในช่วง 2006-2016 พบว่า ค่า PM10 ในกรุงเทพมหานคร มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ PM2.5 ไม่พบว่ามีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากขาดข้อมูลที่มีการบันทึกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับ นิกร มหาวัน และวันเพ็ญ เจริญตระกูลปีติ (2562) ที่พบว่า ในช่วง ปี พ.ศ. 2538-2560 ค่า PM_{10} ในภาพรวมของประเทศไทยนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงปี พ.ศ. 2494-2533 พบว่าในภาพรวมของประเทศไทยมี

แนวโน้มค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ และในช่วงปี พ.ศ. 2534-2560 พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีในประเทศไทยนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีในประเทศไทย

จะเห็นได้ว่าสถานการณ์ภาวะโลกหลัวของประเทศไทยตรงกันข้ามกับทวีปยุโรปและอเมริกา เนื่องจากในช่วงก่อนทศวรรษ 1990 กลุ่มประเทศพัฒนาแล้วจะเกิดภาวะโลกหลัว และหลังทศวรรษ 1990 จะเกิดภาวะโลกแจ้ง ในขณะที่ประเทศในทวีปเอเชีย เช่น จีน อินเดีย และไทย (ตารางที่ 1 ประกอบ) ในช่วงหลังทศวรรษ 1990 จะเกิดภาวะโลกหลัว ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการย้ายฐานการผลิตอุตสาหกรรมจากโลกตะวันตกมาสู่โลกตะวันออกจึงเป็นเหตุให้เกิดละอองลอยในบรรยากาศสูงขึ้นทำให้เกิดความหนาของเมฆเป็นผลต่อการส่องผ่านของรังสีดวงอาทิตย์มายังพื้นโลก

4.2 สาเหตุของการเกิดภาวะโลกหลัว

การเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวโลกสามารถเกิดขึ้นจากทั้งปัจจัยภายนอกและภายในโลก โดยปัจจัยภายนอกโลกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นโลกต่ำทั้งนี้เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยพลังงานภายนอกโลกที่เข้าสู่ระบบภูมิอากาศของโลกเพิ่มขึ้น 0.17 Wm^{-2}/ทศวรรษ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าพิสัยของการเปลี่ยนแปลงพลังงานของจุดดำในดวงอาทิตย์ที่มีค่าพิสัย +/- 1 Wm^{-2}/ทศวรรษ ดังนั้นอิทธิพลของภาวะโลกหลัวส่วนใหญ่จึงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของความโปร่งแสงของชั้นบรรยากาศภายในโลกเป็นสำคัญ (Wild, 2009) ซึ่งมีสาเหตุจากกลุ่มก๊าซในบรรยากาศ เมฆ และ ละอองลอย ดังนี้

4.2.1 กลุ่มก๊าซในบรรยากาศ

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซที่มีคุณสมบัติต่อการแผ่รังสีในบรรยากาศ โดยเฉพาะไอน้ำที่มีคุณสมบัติในการดูดซับและแผ่รังสีดวงอาทิตย์สูง กลุ่มก๊าซในบรรยากาศ เช่น ไอน้ำเป็นปัจจัยที่มีศักยภาพสูงที่สุดในการปรับเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นโลก แต่จากข้อมูลในช่วงระหว่าง ค.ศ. 1960-2000 อุณหภูมิภาคพื้นเพิ่มขึ้น 0.8 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไอน้ำในแนวตั้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 หรือเทียบได้กับการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นโลกไม่เกิน 0.1 Wm^{-2}/ทศวรรษ กล่าวได้ว่ามีผลกระทบในระดับน้อย นอกจากไอน้ำแล้วการรวมตัวของกลุ่มก๊าซในบรรยากาศ ได้แก่ NO2, H2O, CH4, CO2 ในช่วงก่อนยุคอุตสาหกรรมและช่วงเวลาในปัจจุบันมีผลต่อรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นโลกในภาพรวมลดลง 0.31 Wm^{-2} ซึ่งค่าของไอน้ำและการรวมกลุ่มของก๊าซในบรรยากาศมีค่าน้อยกว่าอิทธิพลจากปัจจัยอื่นจึงมีผลกระทบในระดับน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นโลก (Wild, 2009) ดังนั้นปัจจัยด้านคุณสมบัติของเมฆและละอองลอยจึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อภาวะหลัว (Dimming)

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเมฆ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณเมฆในท้องฟ้าในช่วงแรกยังเป็นการวิเคราะห์เฉพาะบริเวณ เนื่องจากขาดแคลนข้อมูลที่เป็นโครงข่ายทั้งโลก พบว่า ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกลดลงอย่างมากในสภาวะเมฆมาก ถึงร้อยละ 8 ต่อทศวรรษ โดยข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1953-1990 จาก 2 สถานีตรวจวัดในประเทศเยอรมัน (Hohenpeissenberg and Hamburg) บ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของความหนาของเมฆที่มองเห็น (Cloud Optical Thickness) เป็นสาเหตุหลักในการลดลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกที่ตรวจบันทึกได้ในช่วงเวลาเดียวกัน ในกรณีประเทศสหรัฐอเมริกา ช่วงระหว่าง ค.ศ. 1960-1990 ความหนาของเมฆที่มองเห็นได้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ เท่ากับ -18 Wm^{-2} ซึ่งในกรณีดังกล่าวมีสาเหตุโดยตรงจากละอองลอยที่ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ลดลงถึง -8 Wm^{-2} (Liepert, 1997) สอดคล้องกับการรายงานของ Liley (2009) ที่แสดงผลการสังเกตภาวะโลกหลัวและแจ้งในนิวซีแลนด์ และพบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงต่อผลกระทบจากละอองลอย ภายหลังที่เทคโนโลยีด้านการสื่อสารระยะไกล (Remote Sensing) ได้พัฒนาขึ้น ข้อมูลจากดาวเทียมตรวจสภาพภูมิอากาศได้แสดงข้อมูลปริมาณเมฆเฉลี่ยที่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งโลก และพบว่าปริมาณเมฆเฉลี่ยของโลกมีการเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นทศวรรษที่ 1980s และลดลงหลังจากนั้นจนถึงทศวรรษ 2000 (Evan, Heidinger & Vimont, 2007) ซึ่งสอดคล้องข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด

ในขณะที่เมฆที่มีมลพิษเป็นองค์ประกอบ (Atmospheric Brown Clouds: ABC) ก็สามารถดูดซับและกระจายรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้ามายังพื้นโลกซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะโลกหลัวได้เช่นกัน เช่น ในประเทศอินเดีย พบ ABC ปกคลุมเหนือพื้นที่ในช่วงฤดูแล้งส่งผลต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลก ในบริเวณตอนเหนือของมหาสมุทรอินเดียรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยลดลง 14 Wm^{-2} ในทางกลับกันการลดลงของละอองลอยซัลเฟตร้อยละ 29 และเขม่าดำร้อยละ 60 บริเวณเหนืออาร์กติก ประเทศแคนนาดา ในช่วง 1989-2002 ทำให้รังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลกเพิ่มขึ้น (Ramanathan, Crutzen, Lelieveld & Miltra, 2001)

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงของละอองลอยในบรรยากาศ

จากการรายงานของ Liley (2009) กล่าวถึงอิทธิพลของละอองลอยในบรรยากาศว่ามีผลต่อภาวะโลกหลัวทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนี้

1) สาเหตุทางตรง คือ คุณสมบัติของละอองลอยมีผลต่อการกระจายรังสีดวงอาทิตย์กลับคืนสู่บรรยากาศโดยตรงและ/หรือดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ไว้ในบรรยากาศไม่ให้ตกกระทบผิวโลก ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของละอองลอย เช่น ซัลเฟต (Sulfate) เขม่าดำ (Black Carbon) ฝุ่นละออง (Particulate Matter) ซึ่งจากการประมาณการผลกระทบทางตรงต่อการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของละอองลอย คิดเป็นร้อยละ 50 ของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก (Ohmura, 2009) ในขณะที่ Ruckstuhl, Philpona, Behrens, Collaud, Durr, Helmo, Matzler, Nyeki, Ohmura, Vuilleumier, Weller, Wehrli and Zelenka (2008) ประมาณผลกระทบจากการสะท้อนรังสีโดยตรงของละอองลอยมากเป็น 5 เท่า ของผลกระทบจากการสะท้อนรังสีของเมฆ

สาเหตุหลักของภาวะโลกหลัวอันเนื่องมาจากละอองลอยในบรรยากาศสามารถสรุปได้ว่ามีแหล่งที่มาจาก (1) การเพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรมและการปล่อยจากกิจกรรมของเมือง และ (2) การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกที่แปรผันตามละติจูดสัมพันธ์กับแหล่งมลภาวะ จากข้อมูลในช่วงระหว่าง ค.ศ. 1960-1990 พบการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์พื้นโลก ในบริเวณละติจูดที่ 35 องศาเหนือ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปล่อยเชื้อเพลิงฟอสซิลจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมสูงและมีประชากรหนาแน่นมาก ในขณะที่รังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลกลดลง 58 Wm^{-2} ในช่วงระหว่าง ค.ศ. 1958-1985 จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนยานพาหนะบนทางหลวง โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเมฆในเวลาดังกล่าว (Stanhill & Moreshet, 1992) สอดคล้องกับ Alpert, Kishcha, Kaufman and Schwarzbard (2005) ที่พบภาวะโลกหลัวที่ชัดเจนในพื้นที่เมืองที่มีประชากรหนาแน่น ซึ่งบ่งบอกถึงอิทธิพลของมลพิษและละอองลอยที่ส่งผลกระทบต่อรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลก

2) สาเหตุทางอ้อมที่ทำให้เกิดภาวะโลกหลัว คือ ละอองลอยมีคุณสมบัติในการเป็นนิวเคลียสและก่อให้เกิดการรวมตัวของไอน้ำในอากาศให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นกลุ่มเมฆ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานภาพของปริมาณเมฆและช่วงเวลาการปรากฏของเมฆในบรรยากาศ ในขณะเดียวกันละอองลอยก็สามารถดูดซับสารมลพิษและความร้อน และอยู่คงที่อยู่ในบรรยากาศ นำไปสู่การยับยั้งการก่อตัวของเมฆ หรือทำให้เมฆที่มีอยู่บนท้องฟ้าสลายตัวไป (semi-direct effect)

ละอองลอยมีอิทธิพลกับเมฆในหลายลักษณะขึ้นกับชนิดและระดับของมลภาวะในอากาศ โดยในพื้นที่ที่มีมลภาวะสูง ละอองลอยเป็นนิวเคลียสการควบแน่นของเมฆ (cloud condensation nuclei; CCN) หากเพิ่มเข้าสู่บรรยากาศก็จะทำให้เมฆก่อตัวสะท้อนรังสีที่มากขึ้นนำไปสู่การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลก และคงอยู่เนื่องจากความร้อนที่ถูกดูดซับไว้ในบรรยากาศก่อให้เกิดการสลายไอน้ำจนไม่สามารถขยายตัวไปสู่เมฆฝน ในขณะเดียวกันมลภาวะในอากาศอาจส่งเสริมการแผ่รังสีและกระตุ้นให้เกิดการไหลเวียนที่แปรปรวนในแนวดิ่งและมีความสัมพันธ์ทางบวกกับการก่อตัวของเมฆ cirrus (เมฆที่อยู่ในระดับสูงจากพื้นดิน) ซึ่ง Bell, Rosenfield and Kim (2009) แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ทางบวกระหว่างระดับของละอองลอยจากมลภาวะทางอากาศกับค่าสูงสุดของเมฆในวันทำงาน (weekday maximum) และค่าต่ำสุดในวันหยุด (weekend minimum) ในช่วง 1980s ของประเทศสหรัฐอเมริกาทางตอนใต้ นอกจากปริมาณละอองลอยในบรรยากาศเป็นผลจากกิจกรรมของมนุษย์แล้ว ยังมาจากกระบวนการทางธรรมชาติใช้เวลานานหลายร้อยปี หรือช่วงเวลาสั้น ๆ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ จะมีละอองลอยซัลเฟตที่มีผลต่อความหนาของชั้นละอองลอยที่มองเห็นได้ แต่พบว่ามีผลเพียงเล็กน้อย ยกเว้นการระเบิดของภูเขาไฟขนาดใหญ่ที่ส่งผลกระทบอย่างมากในช่วงเวลาหลายปี เช่น การระเบิดของ El Chichon ใน ค.ศ. 1982 ดังนั้นละอองลอยที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นละอองลอยที่มองเห็นและสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นโลกในหลายพื้นที่ (Wild, 2009)

4.3 อิทธิพลของกระบวนการเป็นเมืองต่อภาวะโลกหลัว

การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ ตั้งแต่ทศวรรษ 1950 – 1980 ในสถานที่ต่าง ๆ ทั่วโลกที่ได้มีการสังเกตและรายงานผลการศึกษากันอย่างกว้างขวางผ่านคำว่า Global Dimming หรือ ภาวะโลกหลัว ที่ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในเมืองขนาดใหญ่ เมืองกับรังสีดวงอาทิตย์จึงเป็นประเด็นที่มีการถกเถียงกันในการศึกษาเกี่ยวกับภาวะโลกหลัวและภาวะโลกแจ้ง เนื่องจากการเพิ่มของละอองลอยในพื้นที่เมืองที่มีประชากรหนาแน่นมีผลต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงและจากเมฆที่มีละอองลอยทั้งในระดับภูมิภาคและระดับโลก (Alpert et al., 2005; Wang, Ma, Wang & Wild, 2014; Imamovic, Tanaka, Folini & Wild, 2016) งานศึกษาของ Yang, Zhang, Xu, Feng, Guan, Yao and Jia (2022) ได้ประเมินผลกระทบของการขยายตัวของเมืองต่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ในประเทศจีนพบว่าในช่วงค.ศ. 1960-1992 มีการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ในขณะที่ระหว่างค.ศ. 1992-2019 เป็นช่วงที่รังสีดวงอาทิตย์มีความสว่างมากขึ้น โดยระบุว่ากระบวนการเป็นเมืองส่งผลต่อแนวโน้มของรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ -0.39 Wm^{-2} ต่อทศวรรษ ในช่วงเกิดภาวะโลกหลัว และ 0.16 Wm^{-2} ต่อทศวรรษในช่วงเกิดภาวะโลกแจ้งในประเทศจีน ซึ่งค่าดังกล่าวจะมีความแตกต่างกันไปตามภูมิภาคของประเทศจีน กระบวนการเป็นเมืองของประเทศจีนเป็นตัวเร่งให้เกิดการลดลงของแสงในช่วงระยะของภาวะโลกหลัวและชะลอความสว่างในช่วงระยะโลกแจ้ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวยังมีการศึกษาร่วมกับความหนาแน่นของประชากร ซึ่ง Imamovic et al. (2016) พบว่า ในช่วงระหว่างค.ศ. 1960-1990 ดัชนีของประชากรที่สูงขึ้นของเมืองในประเทศจีนมีผลต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ -0.35 Wm^{-2} ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ -0.55 Wm^{-2} ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ของประเทศในเอเชียรวมประเทศรัสเซีย ในขณะที่ Alpert et al. (2005) รายงานว่าเมืองขนาดใหญ่ที่มีประชากรมากกว่า 1 แสนคน รังสีดวงอาทิตย์ลดลง -0.41 Wm^{-2} ต่อปี ในขณะที่พื้นที่ที่มีประชากรเบาบาง (น้อยกว่า 1 แสนคน) ค่ารังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น 0.16 Wm^{-2} ต่อปี เช่นเดียวกับเขตบริหารพิเศษฮ่องกงแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีนในช่วง 35 ปีก่อนปี ค.ศ. 1995 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ลดลงมากกว่าหนึ่งในสาม โดยจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นมากกว่าเจ็ดเท่า (Stanhill & Kalma, 1995) โดยพื้นที่ใน

ละติจูดที่ 10°N – 10°N จะมีภาวะหลัวสูงสุด เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมอุตสาหกรรมสูง จะเห็นได้ว่าการเกิดภาวะโลกหลัวในเมืองเนื่องจากเมืองมีการรวมตัวของประชากรที่หนาแน่นและกิจกรรมเมืองก็มีความเข้มข้นและหลากหลายจึงเป็นสาเหตุของการเกิดมลพิษทางอากาศทั้งทางตรงและทางอ้อม (ละอองลอยและเมฆ) ที่ปกคลุมท้องฟ้าซึ่งมีผลต่อความแปรปรวนของรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งนี้ผลกระทบดังกล่าวยังไม่ได้รวมผลที่เกิดจากปรากฏการณ์เกาะแห่งความร้อน (Urban Heat Island) การเปลี่ยนแปลงของค่าอัลบีโดของพื้นผิววัตถุ ภูมิอากาศท้องถิ่น และภูมิประเทศ ซึ่งอาจมีผลให้รังสีดวงอาทิตย์มีความแปรปรวนมากขึ้น

4.4 ผลกระทบของภาวะโลกหลัว

Shah (2005) ได้กล่าวว่า ภาวะโลกหลัวส่งผลกระทบที่รุนแรงเป็นทวีคูณกว่าผลกระทบจากภาวะโลกร้อน โดยผลกระทบของภาวะโลกหลัว มีดังนี้

4.4.1 ผลกระทบต่อน้ำและวัฏจักรของน้ำ

พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกเป็นปัจจัยขับเคลื่อนวัฏจักรของน้ำ โดยพลังงานพื้นผิวสุทธิควบคุมความเข้มข้นของวัฏจักรของน้ำในโลก เช่น อัตราของน้ำฝนและการระเหย ภาวะโลกหลัวเกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกทำให้วัฏจักรของน้ำอ่อนกำลังลงเนื่องจากการลดลงของการระเหยของน้ำบนพื้นผิว จากการประเมินข้อมูลน้ำฝนในศตวรรษที่ 20 ของ IPCC (2007) พบว่า วัฏจักรของน้ำเหนือภาคพื้นทวีปมีทิศทางที่ลดลงตลอดช่วงเวลาปี ค.ศ. 1950 - 1990 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดภาวะโลกหลัวคือมีการลดลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก ในขณะที่ช่วง ค.ศ. 1986 - 2000 การเพิ่มขึ้นของรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวสุทธิในปริมาณคงที่เกิดขึ้นไปพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของน้ำฝนภาคพื้นทวีป (3.5 มม./ปี) (Wild et al., 2008) เนื่องจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกเป็นปัจจัยสำคัญของระยะเวลาการคายน้ำของพืชที่ทำให้ความหนาแน่นของวัฏจักรของน้ำบนภาคพื้นทวีปมากขึ้น

จากการทดลองด้วยโมเดลภูมิอากาศ ECHAM4 (European Center HAMburg 4) พบว่าหากปริมาณละอองลอยที่เพิ่มมากขึ้นในบรรยากาศถูกรวมเข้าไปกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของวัฏจักรน้ำของโลกลดลงในสภาพอากาศที่อบอุ่น (Leipert et al., 2004 as cited in Wild, 2009) ได้ทดลองแบบจำลองภูมิอากาศของก๊าซเรือนกระจกและการรวมตัวของละอองลอย พบว่า ในช่วงกลางทศวรรษ 1980 วัฏจักรของน้ำมีการหมุนเวียนลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาดังกล่าวที่ลดลง 3.8 Wm^{-2} และรังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวสุทธิลดลง 1.9 Wm^{-2} ทั่วโลก การลดลงของพลังงานที่มีอยู่ ณ พื้นผิวนำไปสู่การลดลงในการระเหย รังสีดวงอาทิตย์พื้นผิวสุทธิลดลง 5-8 Wm^{-2} ตลอดช่วงเวลา 30 ปี จากปี ค.ศ.1960 - 1990 บนภาคพื้นทวีป จะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากรังสีความร้อนที่แผ่ลงสู่พื้นผิวตลอดช่วงเวลาดังกล่าว (Wild et al., 2004 as cited in Wild, 2009) การลดลงของพลังงานที่มีอยู่อาจจะลดการระเหย ณ บริเวณผิวพื้น ในช่วงเวลาเดียวกัน

ตัวอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือ ดินแดน Sahel บริเวณเขตรอยต่อแบ่งทวีปแอฟริกาเหนือและใต้ ประสบกับภาวะแห้งแล้งอย่างรุนแรงและขาดแคลนอาหาร ผลของแบบจำลองภูมิอากาศ พบว่า มีสาเหตุมาจากการปล่อยละอองลอยที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบในช่วงเวลาก่อนยุคอุตสาหกรรม และมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับรูปแบบของน้ำฝน โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ด้านทิศใต้ของการตกของฝน ในขณะที่ทางตอนเหนืออุณหภูมิผิวน้ำทะเลเย็นตัวลงจากผลของภาวะโลกหลัวนำไปสู่การระเหยของน้ำที่น้อยลงและอากาศแห้ง ในช่วงทศวรรษ 1990s ละอองลอยในบรรยากาศลดลง ภาวะโลกหลัวหายไป น้ำฝนในดินแดน Sahel กลับฟื้นคืน จึงเป็นสิ่งที่คาดเดาว่าการเปลี่ยนถ่ายจากภาวะโลกหลัวสู่ภาวะโลกแจ้งอาจจะช่วยฟื้นฟูภาวะน้ำฝนที่สำคัญในดินแดน Sahel (Wild, 2008) เช่นเดียวกันระบบมรสุมอาจได้รับผลกระทบจากภาวะโลกหลัว จากแบบจำลองในพื้นที่ประเทศอินเดีย ภาวะโลกหลัวจากมลภาวะอากาศนำไปสู่การอ่อนตัวของมรสุม และสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของภาวะแห้งแล้งในภูมิภาคอินเดีย ในทางตรงข้าม แบบจำลองของ Menon et al. (2002 as cited in Wild, 2009) พบว่า การเพิ่มความสามารถในการดูดซับของละอองลอยในบรรยากาศ จะทำให้น้ำฝนเหนือภูมิภาคอินเดียเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดภาวะน้ำท่วมในฤดูร้อนในบริเวณตอนใต้ของประเทศจีนด้วย

จากการทบทวนงานศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าในการที่วัฏจักรน้ำเปลี่ยนไปเกิดจากภาวะของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกลดลง อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างภาวะโลกหลัวและลักษณะที่หลากหลายของวัฏจักรน้ำยังจำเป็นต้องได้รับการศึกษาค้นคว้าต่อไป

4.4.2 ผลกระทบต่อนิเวศวิทยาของพื้นที่ปกคลุมหิมะและธารน้ำแข็ง

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกเป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับกระบวนการละลายน้ำแข็งและหิมะ เช่น ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ พบการเปลี่ยนแปลงของธารน้ำแข็งอย่างไม่มีนัยสำคัญคิดเป็นร้อยละ 1 ระหว่างปี ค.ศ. 1973 – 1985 ในขณะที่ช่วงเวลา ค.ศ. 1985 - 2000 ขอบเขตธารน้ำแข็งในสวิตเซอร์แลนด์ลดลงร้อยละ 18 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในช่วง 10 ปี จนถึงช่วงทศวรรษ 1980 ซึ่งไม่พบการเปลี่ยนแปลงของธารน้ำแข็งในช่วงเวลาดังกล่าว แต่ทันทีที่ภาวะโลกหลัวหายไปในช่วงกลางทศวรรษ 1980 ธารน้ำแข็งก็เริ่มละลาย เป็นที่น่าสนใจว่า ขอบเขตการปกคลุมหิมะในซีกโลกเหนือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงทศวรรษ 1930s ถึง 1980s แต่มีการลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1980 ถึง 2000 (3 ล้าน ตร.ม.) (Brown, 2000) สิ่งหนึ่งที่สันนิษฐานได้ คือ การเปลี่ยนผ่านจากภาวะโลกหลัวไปสู่ภาวะโลกแจ้งอาจสนับสนุนการลดลงของพื้นที่ปกคลุมของหิมะในซีกโลกเหนือที่ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การลดลงของวันที่มีหิมะตกในสวิตเซอร์แลนด์อย่างมีนัยสำคัญ ตั้งแต่หลังทศวรรษ 1980 อธิบายได้ว่ามีการเปลี่ยนจากภาวะโลกหลัวไปสู่ภาวะแจ้ง

4.4.3 ผลกระทบต่อชีวภาคพื้นดินและวัฏจักรของคาร์บอน

พืชใช้พลังงานสังเคราะห์แสง (Photosynthetic Active Range: PAR) ในช่วงคลื่น 0.4-0.69 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนของชีวมวลและวัฏจักรคาร์บอน รวมถึงรังสีดวงอาทิตย์ทั้งที่เป็นรังสีโดยตรงและรังสีที่เกิดจากการกระจายของอนุภาคในบรรยากาศที่ส่องทะลุผ่านเรือนยอด (Canopy) ก็เป็นแหล่งพลังงานสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชด้วย ดังนั้น การเพิ่ม/ลดของแสงที่เกิดจากการกระจายของอนุภาคในบรรยากาศจึงมีผลต่อการดูดซับคาร์บอนของพืชที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง เช่น ในกรณีการระเบิดของภูเขาไฟพินาตูโบ ทำให้มีการกระจายของแสงที่เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มการสังเคราะห์แสงในเรือนยอดของพืชเป็นผลให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในป่าไม้เนื้อแข็ง เหตุการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการแลกเปลี่ยนในระบบนิเวศสุทธิของคาร์บอน (Carbon Net Ecosystem Exchange: NEE) การหายใจของดินและการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในระบบนิเวศทั้งหมดว่าเป็นชีวมณฑลที่เป็นแหล่งคาร์บอนหรือดูดซับคาร์บอน ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองการศึกษาของ Mercado et al., (2009 as cited in Wild, 2009) พบว่า สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงในรังสีที่กระจายในบรรยากาศที่กระทบต่อการสังเคราะห์แสงของพืชมาจากการดูดซับคาร์บอนบนพื้นดินสะสมร้อยละ 25 นอกจากนี้การกระจายของแสงในบรรยากาศยังชะลอการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศอย่างเห็นได้ชัดด้วยในศตวรรษที่ 20

4.4.4 ภาวะโลกหลัวและภาวะโลกแจ้งมีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตทางการเกษตร

ภาวะโลกหลัวเป็นปรากฏการณ์ที่ปริมาณแสงแดดน้อย และมีผลต่อการใช้พลังงานในการเจริญเติบโตของพืชน้อยลงด้วย เนื่องจากแสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานเคมี ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช โดยสารตั้งต้นในกระบวนการ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) เปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_2$) ออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นหากปริมาณความเข้มของแสงต่ำ พืชก็จะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำ ซึ่งจะทำให้พืชไม่เจริญเติบโตหรือเหี่ยวเฉาและตายในที่สุด

ในขณะที่การเกิดภาวะโลกแจ้งเป็นปรากฏการณ์ที่ปริมาณแสงแดดมาก พืชมีความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภายนอกหรือปัจจัยสภาพแวดล้อม ส่งผลกระทบโดยตรงต่อลักษณะทางสรีรวิทยาการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชต่าง ๆ ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต-B (UV-B) เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น (CO_2) และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเกิดการคายน้ำจากการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้น้ำในพืชระเหยน้ำมากขึ้น ซึ่งน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของพืชทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และช่วยดูดแร่ธาตุอาหาร (Nutrients) ลำเลียงอาหาร (Photosynthates) ไปยังส่วนต่าง ๆ เมื่อเกิดการขาดแคลนน้ำทำให้พืชเกิดภาวะเครียด ส่งผลต่อการสร้างดอกและผลของพืชในระยะสืบพันธุ์และยังส่งผลให้ผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตลดลงด้วย (Teramura, Tevini & Iwanziket, 1983) ผลการศึกษาของสุรีย์พร

พรหมผลิน (2564) ปริมาณแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของข้าวนาปีตามช่วงการเจริญเติบโตจากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่า ในช่วงเดือนมิถุนายน และเดือนสิงหาคม มีพื้นที่ปลูกข้าวนาปีร้อยละ 11.48 และ 11.83 ตามลำดับ ที่มีปริมาณแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงอยู่ในระดับที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงที่ต่ำลง ส่วนในเดือนตุลาคม มีพื้นที่ปลูกข้าวนาปีร้อยละ 83 ที่มีปริมาณแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงอยู่ในระดับที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงที่ต่ำลงด้วย แสดงให้เห็นว่าปริมาณแสงที่ต่ำลงมีผลต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของข้าวนาปีของจังหวัดเชียงใหม่

4.5 ความเชื่อมโยงระหว่างภาวะโลกหลัวและภาวะโลกร้อน

ภาวะการลดลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก เรียกว่า ภาวะโลกหลัว (Global Dimming) มีผลกระทบต่อมนุษยชาติในวงกว้างไม่น้อยไปกว่าภาวะโลกร้อน (Global Warming) สาเหตุของภาวะโลกหลัวมาจากสารอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของละอองลอยในบรรยากาศทำให้รังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่านมาถึงพื้นผิวโลกได้น้อยลงเนื่องจากคุณสมบัติของละอองลอยที่สามารถสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์กลับคืนสู่บรรยากาศและดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ไว้ไม่ให้ส่องมาถึงพื้นโลก ในขณะที่ภาวะโลกร้อนมีสาเหตุจากคุณสมบัติของก๊าซเรือนกระจกในการปล่อยให้รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นผ่านเข้าสู่บรรยากาศโลกแต่ไม่ยอมให้รังสีความร้อนคลื่นยาวออกจากบรรยากาศโลก จึงทำให้เกิดสภาวะกักความร้อนไว้ในบรรยากาศโลกที่มากกว่าสภาวะปกติ อย่างไรก็ตามภาวะโลกหลัวและภาวะโลกร้อนที่ความเชื่อมโยงกันด้วยรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกและผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวโลก จากรายงานการศึกษาหลายฉบับ พบว่า ในช่วงทศวรรษ 1950s ถึง 1980s การเพิ่มขึ้นของละอองลอยมีความสัมพันธ์กับภาวะโลกหลัวและอาจช่วยชะลอภาวะโลกร้อน ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มเมฆที่มีการปนเปื้อนมลภาวะในอากาศบดบังรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก จึงช่วยไม่ให้โลกร้อนขึ้นจากความร้อนของพื้นผิวที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของกลุ่มก๊าซเรือนกระจกบนพื้นโลก (Ramanathan et al., 2001) ซึ่งชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้ในหลายภูมิภาคของโลก เช่น อาร์กติก (Stanhill & Kalma, 1995) ในประเทศจีน ในอเมริกา (Liepert, 1997) ในอินเดีย (Ramanathan et al., 2001) เป็นต้น ในทางกลับกันหากความหนาของชั้นละอองลอยลดลงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น ประเทศในภาคพื้นยุโรป ถึงแม้ว่าภาวะโลกหลัวดูเหมือนจะช่วยชะลอภาวะโลกร้อน ในขณะเดียวกันก็มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเช่นกัน โดย Wild, Ohmura and Makowski (2007) ได้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดรายวันในคาบ 10 ปี ซึ่งพบว่า ในช่วงเวลาที่รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบผิวโลกในปริมาณที่น้อยลง อุณหภูมิสูงสุดรายวันจะลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดกลับเพิ่มขึ้น โดยในช่วงเวลากลางวันอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-20

อย่างไรก็ตามภาวะโลกร้อนที่ถูกชะลอด้วยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกลดลงได้หายไปในช่วงหลังทศวรรษ 1980s ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยในช่วงกลางทศวรรษ 1980s หน่วยวิจัยด้านภูมิอากาศ (Climate Research Unit: CRU) พบว่า ชั้นละอองลอยในบรรยากาศลดลงถึงร้อยละ 60 ส่งผลให้อุณหภูมิเหนือพื้นดินเพิ่มขึ้น +0.38°C ในคาบ 10 ปี จากผลการตรวจวัด 6 สถานีในยุโรป ที่เรียกว่าภาวะโลกแจ้ง (Ruckstuhl et al., 2008) และสามารถทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวันของยุโรปตะวันออกอุ่นขึ้นร้อยละ 50 ดังนั้นในช่วงหลังทศวรรษ 1980s อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดบนพื้นผิวทั่วโลกมีลักษณะเพิ่มขึ้นเหมือนกันในช่วงภาวะโลกหลัวลดลง (Wild et al., 2007)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในช่วงศตวรรษที่ 20 ยังมีสาเหตุหลักจากภาวะโลกร้อนที่เกิดจากก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวในภาพรวมยังคงเพิ่มสูงขึ้น ถึง 0.8 เซลเซียส หากปราศจากความร้อนจากก๊าซเรือนกระจก อุณหภูมิพื้นผิวของโลกควรจะลดลงมากกว่านี้ในช่วงที่เกิดภาวะโลกหลัว และต้องสูงมากในช่วงภาวะโลกแจ้ง อย่างไรก็ตาม หากจะคงระดับภาวะโลกหลัวไว้ก็จะส่งผลกระทบให้เกิดฝนกรด ปัญหาหมอกควัน (Jiangfeng & Huijun, 2004) โรคทางเดินหายใจในมนุษย์ ความสามารถในการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง (Hunt, 2000) และที่สำคัญคือการทำให้น้ำในซีกโลกเหนือเย็นลง เป็นผลให้มีอัตราการระเหยของน้ำลดลง (Gautam et al., 2009) ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะกระทบต่อลักษณะลมมรสุมเอเชียให้มีปริมาณลดลง ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างภาวะโลกหลัวกับภาวะโลกร้อนยังมีความซับซ้อนและต้องการความเข้าใจที่ชัดเจน นั่นคือข้อเท็จจริงของสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตในปัจจุบันและในอนาคต ที่ไม่ได้มีเพียงเรื่องภาวะโลกร้อนเพียงเรื่องเดียว ยังมีเรื่องภาวะโลกหลัว ที่อาจจะทวีความ

รุนแรงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการสร้างความรู้ให้สามารถรับมือและรู้เท่าทันต่อสถานการณ์จะช่วยบรรเทาผลกระทบและสร้างภูมิคุ้มกันให้กับประชาชนชาวไทย

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาวะโลกหลัวเริ่มได้รับความสนใจในปี ค.ศ. 1950 – 1980 ซึ่งพบว่าสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในช่วงเวลาก่อนปี ค.ศ. 1980 เป็นช่วงของการเกิดภาวะโลกหลัว (Dimming Period) ในทวีปยุโรปและอเมริกา และหลังปี ค.ศ. 1980 ทวีปยุโรปและอเมริกาเกิดภาวะโลกแจ้ง (Brightening Period) ในขณะที่ภาวะโลกหลัวปรากฏในทวีปเอเชียโดยเฉพาะประเทศจีนและอินเดีย ในขณะที่ประเทศไทยพบว่าในช่วงเวลาก่อน 1980 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญ แต่ภายหลังปี ค.ศ. 1980 พบว่า มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ 0.01 โดยเฉพาะใน ภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยสาเหตุหลักของภาวะโลกหลัว สรุปได้ว่าเกิดจากอนุภาคของละอองลอยในบรรยากาศ ที่ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่านมาถึงพื้นผิวโลกได้น้อยลงเนื่องจากคุณสมบัติของสารประกอบละอองลอยที่สามารถสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์กลับคืนสู่บรรยากาศและดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ไว้ไม่ให้ส่องมาถึงพื้นโลกทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของละอองลอย โดยเฉพาะละอองลอยที่มีองค์ประกอบของ ซัลเฟต (Sulfate) เขม่าดำ (Black Carbon) ฝุ่นละออง (Particulate Matter) ซึ่งจากการประมาณการผลกระทบทางตรงต่อการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของละอองลอย คิดเป็นร้อยละ 50 ของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก จากสาเหตุดังกล่าวพบว่ามีความสัมพันธ์กับกระบวนการกลายเป็นเมือง โดยในเมืองที่มีการรวมตัวของประชากรที่หนาแน่นและกิจกรรมเมือง ที่เข้มข้นโดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุของการเกิดมลพิษทางอากาศกล่าวได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของละอองลอยและเมฆในบรรยากาศ ที่ปกคลุมท้องฟ้าซึ่งมีผลต่อความแปรปรวนของรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่ง He, Han and Zhang (2016) พบว่าเมืองที่มีประชากรมากกว่า 1 ล้านคน ร้อยละ 78 จะเผชิญกับปัญหา มลภาวะจาก $PM_{2.5}$

หากพิจารณาถึงผลกระทบของภาวะโลกหลัว ข้อมูลและรายงานต่าง ๆ ได้กล่าวถึงผลกระทบที่หลากหลาย โดยเฉพาะ ผลกระทบที่มีต่อวัฏจักรของน้ำโดยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกเป็นปัจจัยขับเคลื่อนวัฏจักรของน้ำ โดยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกที่ลดลงทำให้วัฏจักรของน้ำอ่อนกำลังลงเนื่องจากการลดลงของการระเหยของน้ำบนพื้นผิว ผลกระทบต่อชีวภาคพื้นดินและวัฏจักรของคาร์บอน การเพิ่ม/ลดของแสงที่เกิดจากการกระจายของอนุภาคในบรรยากาศจึงมีผลต่อการดูดซับคาร์บอนของพืชที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงในรังสีที่กระจายในบรรยากาศที่กระทบต่อการสังเคราะห์แสงของพืชมาจากการดูดซับคาร์บอนบนพื้นดินสะสมร้อยละ 25 ในขณะเดียวกันมีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตทางการเกษตร หากปริมาณความเข้มของแสงต่ำ พืชก็จะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำ ซึ่งจะทำให้พืชไม่เจริญเติบโตหรือเหี่ยวเฉาและตายในที่สุด

ภาวะโลกหลัวมีความต่างและเชื่อมโยงกับภาวะโลกร้อน คือ ภาวะโลกหลัวคือการพิจารณาภาวะการลดลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก ส่วนภาวะโลกร้อนคือการพิจารณาภาวะความร้อนที่ถูกกักเก็บในบรรยากาศโลก ภาวะโลกหลัวมีสาเหตุหลักจากปริมาณสารละอองลอยในบรรยากาศ ส่วนภาวะโลกร้อนเกิดจากกลุ่มก๊าซเรือนกระจกเป็นสำคัญ ในขณะที่สถานการณ์อุณหภูมิของโลกที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภาวะโลกหลัวที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ย และผลกระทบจากภาวะโลกหลัวและภาวะโลกร้อน มีลักษณะที่ส่งเสริมซึ่งกันและกัน กล่าวคือ ความเข้มแสงที่น้อยลงส่งผลต่อวัฏจักรน้ำและความสามารถในการสังเคราะห์แสงที่ทำให้พืชมีการเติบโตได้ไม่ดี ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกส่งผลต่อความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศและความรุนแรงของภัยพิบัติธรรมชาติ โดยเฉพาะประเด็นที่เกี่ยวข้องกับน้ำฝนทั้งในด้านความขาดแคลนและการท่วมขัง อันนำไปสู่ความเสียหายของผลผลิตทางการเกษตรและส่งผลต่อการลดลงของความมั่นคงทางอาหารของประชากรโลก

ความเสียหายจากผลกระทบของภาวะโลกหลัวมีความซับซ้อน และยังต้องการการศึกษาวิเคราะห์อีกมาก ตัวอย่างที่น่าสนใจคือกรณีภาวะภัยแล้งที่เกิดขึ้นในภูมิภาคซาฮาร่า (Sahel region) ตั้งแต่ประเทศเซเนกัลไปถึงเอธิโอเปีย ในช่วง 1970-1985 ที่นำไปสู่ภาวะอดอยากทำให้มีคนตายถึง 1.2 ล้านคน ซึ่งนักวิทยาศาสตร์หลายคนเชื่อว่าเกิดจากสาเหตุหลักมาจากการขยายตัวของพื้นที่ปศุสัตว์ที่มากกว่าที่จะรองรับได้ไปจนถึงปรากฏการณ์เอลนิโญ แต่จากการศึกษาในปี 2001 ของรามานาธานได้ศึกษาพื้นที่ปกคลุมของหมอกควันจากอุตสาหกรรมที่พบว่าปกคลุมพื้นที่เกือบ 4 ล้านตารางไมล์ และทำให้วัฏจักรของน้ำในอนุทวีปเอเชียปั่นป่วน โดยมลภาวะในบรรยากาศจะก่อตัวเป็นเมฆและคงสภาพอยู่เช่นนั้นแทนที่จะควบแน่นเป็นหยดน้ำและตกลงมาเป็นฝน ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับสภาวะขาดฝนที่เกิดขึ้นในภูมิภาคซาฮาร่า (Verrengia, 2002) และ Essoungou (2013) ได้สรุปผลกระทบจากภาวะแห้งแล้งในภูมิภาคซาฮาร่า นำไปสู่ปัญหา วิกฤติการทางอาหาร ที่ทำให้ผู้คนหลายล้านคนมีสถานะไม่มั่นคงทางอาหารในทุกปี วิกฤติการทางสิ่งแวดล้อม ที่เกิดจากการแปรผันทางภูมิอากาศและความไม่ปกติของการตกของฝนที่มีช่วงเวลาการขาดฝนอันยาวนาน (1970-1993) ทำให้เกิดภาวะภัยแล้งที่รุนแรง และพื้นที่ดินร้อยละ 80 เสื่อมโทรม ความเปราะบางทางเศรษฐกิจ อันเนื่องจากการเกษตรเป็นแหล่งจ้างงานและสร้างผลผลิตมวลรวมหลักของประเทศ ภาวะภัยแล้งในศตวรรษที่ 1970 และ 1980 เป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียผลผลิตทางการเกษตรและปศุสัตว์ การสูญเสียชีวิตจากผู้หิวโหยและขาดสารอาหาร

การกำหนดมาตรการแก้ไขภาวะโลกหลัวจำเป็นต้องพิจารณาแนวทางตามแหล่งกำเนิดมลภาวะทางอากาศด้วยการสำรวจและจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ เพื่อกำหนดแนวทางที่เหมาะสมตามแหล่งมลพิษ รวมถึงกำหนดมาตรการลดและบรรเทาในระยะสั้น เช่น การฉีดพ่นละอองน้ำในอากาศอย่างทั่วถึงและต่อเนื่อง และการพัฒนาเครื่องกรองอากาศในระดับเมือง มาตรการควบคุมและป้องกันปัญหาในระยะยาว เช่น การกำหนดและควบคุมเขตก่อสร้างและเขตพัฒนาอุตสาหกรรมที่ชัดเจนไม่ให้มีการพัฒนาแบบกระจัดกระจาย พร้อมกับการควบคุมหรือโยกย้ายกิจกรรมที่ไม่เกี่ยวข้องกับเมืองออกไปอยู่ชานเมือง การพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะเพื่อลดปริมาณยานพาหนะส่วนตัว การส่งเสริมการเพิ่มพื้นที่สีเขียว รวมถึงการผลักดันประเด็นปัญหามลภาวะทางอากาศในกระบวนการวางผังเมืองอย่างแท้จริง ซึ่งจะช่วยสร้างภูมิคุ้มกันต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั้งที่เกิดจากปรากฏการณ์โลกหลัวและโลกร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย เรื่อง สถานการณ์และแนวทางบรรเทาผลกระทบจาก Global Dimming กรณีศึกษาประเทศไทย ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ ปีงบประมาณ 2560

เอกสารอ้างอิง

นิกร มหาวัน และวันเพ็ญ เจริญตระกูลปีติ. (2562). **สถานการณ์และแนวทางบรรเทาผลกระทบจาก Global Dimming กรณีศึกษาประเทศไทย.** กรุงเทพฯ: สำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ.

สุรีย์พร พรหมผลิน. (2564). **การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ต่อปริมาณแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของข้าวนาปีในจังหวัดเชียงใหม่**. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่).

Alpert, P. and Kishcha, P. (2008). Quantification of the effect of urbanization on solar dimming. **Geophysical Research Letters**. 35, L08801, https://doi.org/10.1029/2007GL033012.

Alpert, P., Kishcha, P., Kaufman, Y. J., and Schwarzbard, R. (2005). Global Dimming or Local Dimming?: Effect of Urbanization on Sunlight Availability. **Geophysical Research Letters**. 32(17), 1-4.

Bell, T. L., Rosenfield, D. and Kim, K. (2009). Weekly Cycle of Lightening: Evidence of Storm Invigoration by Pollution. **Geophysical Research Letters**. 36, 1-50.

Brown, R.D. (2000). Northern Hemisphere Snow Cover Variability and Change. ***Journal of Climate***. **13,** 2339–2355.

Chirasophon, S. and Pochanart, P. (2020). The long-term characteristics of PM10 and Pm2.5 in Bangkok, Thailand. **Asian Journal of Atmospheric Environment**. 14(1), 73–83.

Essoungou A. (2013). **The Sahel: One region, many crises. Sahel**. United Nations Africa Renewal. Retrieved from: https://www.un.org/africarenewal/magazine/december-2013/sahel-one-region-many-crises.

Evan, A. T., Heidinger, A. K., and Vimont, D. J. (2007). Arguments Against a Physical Long-term Trend in Global ISCCP Cloud Amounts. **Geophysical Research Letters**. 34, L04701.

Gautam R., Hsu, C.N., Lau, K.M. and Kafatos, M. (2009). Aerosol and Rainfall Variability over the Indian Monsoon Region: Distributions, Trends and Coupling. **Annales Geophysicae**. 27, 3691-3703.

Hatzianastassiou, N., Ioannidis, E., Korras-Carraca, M. B., Gavrouzou, M., Papadimas, C. D., Matsoukas, C., Benas, N., Fotiadi, A., Wild, M. and Vardavas, I. (2020). Global Dimming and Brightening Features during the First Decade of the 21st Century. ***Atmosphere***. *11*, 308.

He, C., Han, L. and Zhang. R. Q. (2016). More than 500 million Chinese urban residents (14% of the global urban population) are imperiled by fine particulate hazard. **Environmental Pollution**. 218, 558-562.

Hunt, S. (2000). Effects of Irradiance on Photosynthetic CO_2 Uptake and Chlorophyll Fluorescence. In Karcher, S.J. (Ed.), **Tested Studies for Laboratory Teaching**. (pp. 225-247). 21 Proceedings of the 21st Workshop Conference of the Association for Biology Laboratory Education (ABLE).

Hwang, Y. T., Frierson, D. M. W. and Kang. S.M. (2013). Anthropogenic Sulfate Aerosol and the Southward Shift of Tropical Precipitation in the Late 20th Century. **Geophysical Research Letters**. 40, 1-6.

Imamovic, A., Tanaka, K., Folini, D. and Wild, M. (2016). Global Dimming and urbanization: did stronger negative trend collocate with regions of population growth?. **Atmos. Chem. Phys**. 16, 2719-2725.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Groupl Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC**. . Cambridge: Cambridge University Press.

Jiangfeng, W. and Huijun, W. (2004). A Possible Role of Solar Radiation and Ocean in the Mid-Holocene East Asian Monsoon Climate. **Advances in Atmospheric Sciences**, 21. 1-12. doi.org/10.1007/BF02915675

Kambezidis, H. D., Kasdaoutis, D. G., Kharol, S. K., Moorthy, K. K., Satheesh, S. K., Kalapureddy, M. C. R., Badarinath, K. V. S., Sharma, A. R. S. and Wild, M. (2012). Multi-decadal Variation of the Net Downward Shortwave Radiation over South Asia: The Solar Dimming Effect. **Atmospheric Environment**. 50, 360-372.

Liepert, B. G. (1997). Recent Changes in Solar Radiation Under Cloudy Conditions in Germany. **International Journal Climatology**. 17, 1581-1593.

Liley, B. (2009). New Zealand dimming and brightening**. Journal of Geophysical Research**. 114, D00D10.

Norris, J. R. and Wild, M. (2007). Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar ‘‘dimming,’’ and solar ‘‘brightening,’’. **Journal of Geophysical Research**. 112, D08214, doi:10.1029/2006JD007794.

Ohmura, A. (2009). Observed Decadal Variations in Surface Solar Radiation and their Causes. **Journal of Geophysical Research**. 114, D00D05, doi:10.1029/2008JDO11290.

Promplin, S. and Charoentrakulpeeti, W. (2020). A Trend of Surface Solar Radiation in Chiang Mai, Thailand. **IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science 538**. 2020(012025), 1-8. doi:10.1088/1755-1315/538/1/012025.

Ramanathan, V., Crutzen P. J., Lelieveld, J. and Miltra, A. P. (2001). Indian Ocean Experiment: An Integrated Analysis of the Climate Forcing and Effects of the Great Indo-Asian Haze. **Journal Geophysical Research**. 106*,* 28371-28398.

Riihimaki, L. D., Vignola, F. E. and Long, C. N. (2009). Analyzing the contribution of aerosols to an observed increase in direct normal irradiance in Oregon. **Journal of Geophysical Research**. 114, D00D02.

Ruckstuhl, C., Philpona., R., Behrens, K., Collaud, M. C., Durr, B., Helmo, A., Matzler, C., Nyeki, S., Ohmura, A., Vuilleumier, L., Weller, M., Wehrli, C. and Zelenka, A. (2008). Aerosol and Cloud Effects on Solar Brightening and the Recent Rapid Warming. **Geophysical Research Letters**. 35*,* L127080.

Russak, V. (2009). Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955–2007). **Journal Geophysical Research**. 114, D00D01.

Sanchez-Lorenzo, A., Brunetti, M., Calbo, J. and Martin-Vide, J. (2007). Recent spatial and temporal variability and trends of sunshine duration over the Iberian Peninsula from a homogenized data set. **Journal Geophysical Research**. 112*,* D20115.

Shah, A. (2005). **Global Dimming**. Retrieved from: http://www.globalissues.org/article/529/global-dimming#Rootcausesofglobalwarmingalsomustbeaddressed.

Shi, G. Y., Hayasaka, T., Ohmura, A., Chen, Z. H., Wang, B., Zhao, J. Q., Che, H. Z. and Xu, L. (2008). Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. **J. Appl. Meteorol. Climatol**. 47*,* 1006–1016.

Stamatis, M., Hatzianastassiou, N. Korras Carraca, M. B., Matsoukas, C., Wild, M. and Vardavas, I. (2022). Detailed analysis of the Global Dimming & Brightening from 1980 to 2020 based on MERRA-2 reanalysis data. **EGU General Assembly 2022**. EGU22-586.

Stanhill, G. (2005). Global Dimming: A New Aspect of Climate Change. **Weather**. 60(1), 11-14.

Stanhill, G. and Cohen, S. (2001). Global Dimming: A Review of the Evidence for a Widespread and Significant Reduction in Global Radiation with Discussion of Its Probable Causes and Possible Agriculture Consequences. **Agricultural and Forest Meteorology.** 107, 255-278.

Stanhill, G. and **Kalma**, J. D. (1995). **Solar dimming and urban heating at Hong Kong. International Journal of Climatology.** Retrieved from: https://doi.org/10.1002/joc.3370150807.

Stanhill, G., and Moreshet S. (1992). Global Radiation Climate Changes: The World Network. **Climate Change**. 21, 57–75.

Teramura, A. H., Tevini, M. and Iwanzik, W. (1983). Effects of Ultraviolet-B irradiation on Plants during Mild Water Stress. **Physiologia Plantaum**. 57(2), 175-180.

Verrengia, J. B. (2002). **1970-85 Famine Blamed on Pollution**. Retrieved from: https://www.cbsnews.com/news/1970-85-famine-blamed-on-pollution/.

Wang, K., Ma, Q., Wang, X. and Wild, M. (2014). Urban impacts on mean and trend of surface incident solar Radiation. **Geophys. Res. Lett**. 41, 4664–4668.

Wang, Y., Wild, M., Sanchez-Lorenzo, A. and Manara, V. (2017). Urbanization effect on trends in sunshine duration in China. **Annales Geophysicae**. 35, 839-851.

Wild, M. (2008). Decadal changes in surface radiative fluxes and their importance in the context of global climate change, in Climate Variability and Extremes During the Past 100 Years. In: S. Bronnimann (Eds.), **Advances in. Global Change Research Series 33**. (pp 155– 167). New York.

Wild, M. (2009). Global Dimming and Brightening: A Review. **Journal of Geophysical Research**. 114, 1-3.

Wild, M. (2014). Global Dimming and Brightening. In Freedman, B. (Eds.), **Global Environmental Change. Handbook of Global Environmental Pollution**. Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_27

Wild, M., Grieser, J. and Schar, C. (2008). Combined Surface Solar Brightening and Increasing Greenhouse Effect Support Recent Intensification of the Global Land-based Hydrological Cycle. **Geophysical Research Letters**. 35, L17706.

Wild, M., Ohmura, A., and Makowski, K. (2007). Impact of Global Dimming and Brightening on Global Warming. **Geophysical Research Letters**. 34, L04702.

Yang, S., Zhang, X., Xu, J., Feng, C., Guan, S. Yao, Y. and Jia, K. (2022). Quantification of the urbanization impacts on solar dimming and brightening over China. **Environ. Res. Lett**. 17, 1-9. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac7e61/pdf