

DÀI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA KHOA HỌC - KỸ THUẬT MÁY TÍNH



MÔ HÌNH HÓA TOÁN HỌC (CO2011)

Đề bài tập lớn (*HK201, thời gian làm bài: 06 tuần*)

“Mô hình Hệ động lực dự báo tiểu khí hâu nhà kính” (Version 0.1)

GV ra đề và HD: Nguyễn Tiến Thịnh
Nguyễn An Khuê

Trợ giảng: Trần Trung Hiếu (tth.sdh20@hcmut.edu.vn)

Nhóm SV thực hiện: Nguyễn Văn A – 22102134 (*Nhóm L0x, CQ*)
Trần Văn B – 88471475 (*Nhóm L0x, KSTN*)
Lê Thị C – 36811334 (*Nhóm L0x, Nhóm trưởng*)
Phạm Ngọc D – 97501334 (*Nhóm L0x, CQ*)
Kiều Thị E – 12341334 (*Nhóm L0x, KSTN*)



Mục lục

1	Giới thiệu đề tài	2
2	Sự trao đổi khí CO_2	2
3	Mô hình Hệ động lực và giả thiết	3
4	Sự quang hợp của thực vật nhóm C3	8
4.1	Mô hình quang hợp cho một đơn vị lá	9
4.1.1	Sự khuếch tán CO_2 vào trong lá	9
4.1.2	Quá trình sinh hóa ở pha tối	10
4.1.3	Tốc độ quang hợp cực đại	10
4.2	Mô hình quang hợp cho cả tán lá	12
4.2.1	Chỉ số diện tích lá	12
4.2.2	Công thức Arrhenius mở rộng	14
4.2.3	Mô hình động lực Michaelis–Menten cho P_{Max}	14
5	Dữ liệu	14
6	Hướng dẫn và yêu cầu chung	15
6.1	Hướng dẫn	15
6.2	Yêu cầu	15
6.3	Nộp bài	15
7	Đề bài	15
8	Cách đánh giá và xử lý gian lận	17
8.1	Dánh giá	17
8.2	Xử lý gian lận	17
Tài liệu tham khảo		17

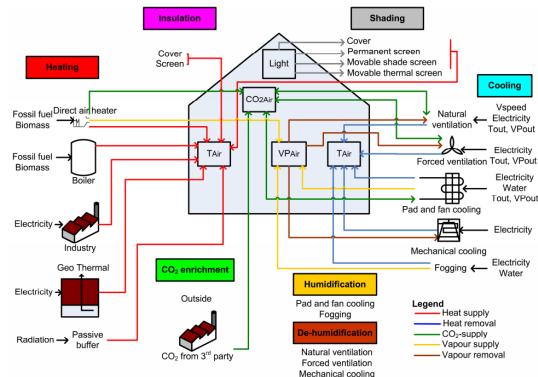
1 Giới thiệu đề tài

Ngày nay với sự hỗ trợ của công nghệ tiên tiến, nhiều giống hoa màu được trồng trọt, thu hoạch và bày bán trên thị trường hầu như quanh năm dù không đúng mùa vụ chính. Các giống hoa màu này chủ yếu được trồng trong các nhà kính hiện đại với các hệ thống điều khiển tự động hoặc bán tự động có chức năng điều chỉnh các yếu tố thời tiết và khí hậu bên trong nhà kính nhằm tạo môi trường tốt nhất cho các vụ mùa.



Hình 1: Nhà kính và bên trong nhà kính ở tỉnh Lâm Đồng (Việt Nam).

Một số thành phần khí hậu chính bên trong nhà kính bao gồm: nhiệt độ, áp suất hơi nước và đặc biệt là nồng độ khí CO_2 ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất của cây trồng. Các thành phần này thông thường bị ảnh hưởng bởi một hay nhiều vật thể có trong nhà kính, cấu trúc nhà kính và sự chuyển động của dòng không khí bên trong nhà kính. Như được mô tả trong Hình 2, nồng



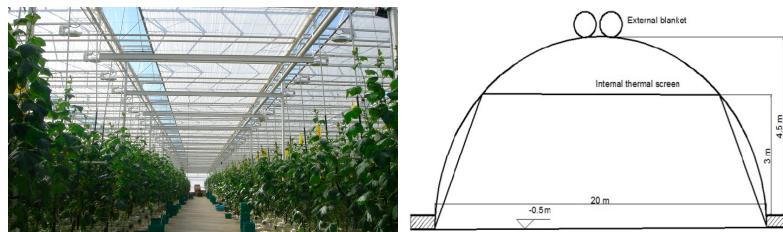
Hình 2: Các yếu tố bên trong nhà kính và chức năng.

độ khí CO_2 trong không khí nhà kính chịu tác động bởi nhiều yếu tố có thể kể đến như lượng khí CO_2 cung cấp từ bên thứ ba, lượng khí CO_2 được đưa vào bởi các luồng gió tự nhiên thổi vào trong nhà kính và thoát ra thông qua các ô gió của nhà kính.

2 Sự trao đổi khí CO_2

Trong phần này, nồng độ khí CO_2 trong không khí nhà kính sẽ được mô tả một cách cụ thể hơn. Để tổng quát hóa bài toán để có thể áp dụng mô hình trong thực tế, mô hình nhà kính với màn chắn nhiệt (thermal screen) được xét trong đề tài này. Màn chắn nhiệt hay còn gọi là tấm chắn

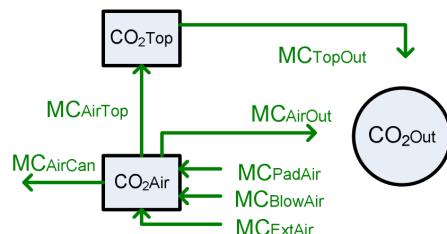
nhiệt được làm từ nhiều loại vật liệu khác nhau như kim loại hoặc nhựa dẻo có tính đàn hồi. Màn chắn nhiệt được sử dụng để bảo vệ cây trồng khỏi thiệt hại gây ra bởi ánh nắng trực tiếp từ mặt trời cũng như chống rét cho cây trồng vào mùa đông ở những nơi có khí hậu ôn đới.



Hình 3: Màn chắn nhiệt có tác dụng che chắn cho cây, điều hòa tiểu khí hậu.

Màn chắn nhiệt chia nhà kính thành hai gian khác nhau gồm gian nhà kính dưới màn chắn nhiệt và gian nhà kính phía trên màn chắn nhiệt. Gian trên thường hẹp hơn gian dưới nhà kính (xem Hình 3). Điều này dẫn đến nồng độ khí CO_2 trong không khí ở gian trên và gian dưới nhà kính cũng khác nhau. Sơ đồ tóm tắt sự lưu thông của lượng khí CO_2 trong nhà kính khi đó được thể hiện ở Hình 4.

Đối với gian dưới của nhà kính, lượng khí CO_2 chủ yếu được đưa vào từ các nguồn như luồng gió tự nhiên thông qua hệ thống thông gió và thoát ra ngoài bởi hệ thống quạt (xem Hình 5 và Hình 6). Ngoài ra, lượng khí CO_2 ở gian này cũng nhận được bởi các máy sưởi không khí (xem Hình 7) trong quá trình đốt nóng tạo nhiệt lượng và bôi bên thứ ba chuyên cung cấp khí CO_2 . Một phần lượng khí CO_2 ở gian dưới nhà kính cũng thất thoát lên gian trên nhà kính dưới sự điều hướng của sự chênh lệch nhiệt độ và mật độ không khí giữa hai gian cũng như một lượng lớn khí CO_2 cũng sẽ được hấp thụ vào trong cây trồng để thực hiện quá trình quang hợp. Đối với gian trên của nhà kính, lượng khí CO_2 chủ yếu nhận từ sự trao đổi CO_2 với gian dưới và có thể thoát ra bên ngoài thông qua các ô thông gió ở trên mái nhà kính (nếu có) như ở Hình 10.



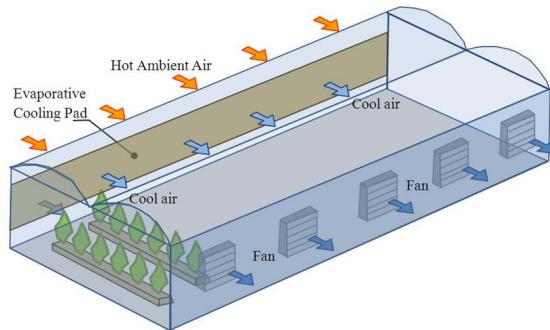
Hình 4: Dòng chuyển động của khí CO_2 bên trong và bên ngoài nhà kính.

3 Mô hình Hệ động lực và giả thiết

Trong mục này mô hình Hệ động lực biểu diễn dòng chuyển động của khí CO_2 bên trong và bên ngoài nhà kính sẽ được đề cập đến. Các mô hình này cũng đã được nghiên cứu bởi nhiều tác giả [Mar94; Van11; De 96]. Dựa trên sơ đồ quan sát được ở Hình 4, sự thay đổi của nồng độ khí CO_2 ở gian dưới và gian trên bên trong nhà kính được biểu diễn qua hệ gồm hai phương trình sau đây.

$$\left\{ \begin{array}{l} cap_{CO_2 Air} \dot{CO_2 Air} = MC_{BlowAir} + MC_{ExtAir} + MC_{PadAir} \\ \quad - MC_{AirCan} - MC_{AirTop} - MC_{AirOut}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} cap_{CO_2 Top} \dot{CO_2 Top} = MC_{AirTop} - MC_{TopOut}. \end{array} \right. \quad (2)$$



Hình 5: Dòng chuyển động của khí CO_2 thông qua hệ thống thông gió và quạt.



Hình 6: Hệ thống thông gió (trái) và quạt (phải).



Hình 7: Hệ thống sưởi.

Trong hệ phương trình vi phân này, một số giả thiết đã được xét đến như lượng khí CO_2 trong không khí ở gian dưới và trên của nhà kính không bị ảnh hưởng bởi nguồn nào khác ngoại trừ những nguồn đã được thể hiện trong sơ đồ ở hình 4. Hơn nữa, nhà kính là một môi trường hoàn hảo theo nghĩa nồng độ CO_2 là phân bố đều nhau ở gian dưới và ở gian trên. Các kí hiệu cap_A , CO_{2A} , $C\dot{O}_{2A}$ và MC_{AB} lần lượt là khả năng chứa khí CO_2 trong A (m), nồng độ khí CO_2 trong A ($mg\ m^{-3}$), tốc độ thay đổi nồng độ khí CO_2 trong A ($mg\ m^{-3}\ s^{-1}$) và lưu lượng khí CO_2 đi từ A vào B ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$), trong đó Air và Top đại diện cho gian dưới và gian trên, $Blow$ đại diện cho máy sưởi, Ext đại diện cho bên thứ ba cung cấp khí CO_2 , Pad đại diện cho hệ thống thông gió, Can đại diện cho tán lá cây trồng và Out đại diện cho không gian bên ngoài nhà kính.

Dưới đây là một số công thức để tính MC_{AB} . Trước hết, xét lượng CO_2 đi từ máy sưởi vào trong gian dưới nhà kính như công thức sau.

$$MC_{BlowAir} = \frac{\eta_{HeatCO_2} U_{Blow} P_{Blow}}{A_{Flr}}. \quad (3)$$

Trong đó, η_{HeatCO_2} là lượng khí CO_2 sinh ra khi 1 Joule nhiệt lượng (cảm nhận được) được sinh ra bởi máy sưởi ($mg\ \{CO_2\} J^{-1}$). Tham số U_{Blow} thể hiện mức cho phép lượng khí CO_2 sinh ra

bởi máy sưởi đi vào nhà kính có thể điều chỉnh được trong khoảng $[0, 1]$ và không có đơn vị. Hệ số P_{Blow} là khả năng sinh ra CO_2 của máy sưởi (W) và A_{Flr} là diện tích nhà kính (m^2).

Tương tự, lượng khí CO_2 được bơm vào nhà kính bởi bên thứ ba chuyên cung cấp khí CO_2 được cho bởi công thức sau.

$$MC_{ExtAir} = \frac{U_{ExtCO_2} \phi_{ExtCO_2}}{A_{Flr}}. \quad (4)$$

Các kí hiệu U_{ExtCO_2} và ϕ_{ExtCO_2} lần lượt là tham số điều chỉnh tốc độ bơm khí CO_2 vào trong nhà kính (không có đơn vị) và khả năng bơm CO_2 của bên thứ ba ($mg\ s^{-1}$).

Mặt khác, lượng khí CO_2 đi vào nhà kính thông qua hệ thống thông gió dựa trên sự chênh lệch của nồng độ khí CO_2 bên trong và bên ngoài nhà kính và khả năng cho dòng không khí đi qua cửa tấm thông gió như hình 6. Hơn nữa, khả năng cho dòng không khí đi qua cửa tấm thông gió có thể điều chỉnh được. Công thức sau dùng để tính MC_{PadAir} .

$$MC_{PadAir} = f_{Pad}(CO_{2Out} - CO_{2Air}) = \frac{U_{Pad}\phi_{Pad}}{A_{Flr}}(CO_{2Out} - CO_{2Air}). \quad (5)$$

Tốc độ của đi qua tấm thông gió f_{Pad} ($m\ s^{-1}$) được tính bởi tích của tham số U_{Pad} , thể hiện mức cho phép lượng khí CO_2 đi qua tấm thông gió điều chỉnh được trong khoảng $[0, 1]$ và không có đơn vị, và ϕ_{Pad} , là khả năng cho phép khí CO_2 đi qua cửa tấm thông gió ($m^3\ s^{-1}$) chia cho diện tích nhà kính.

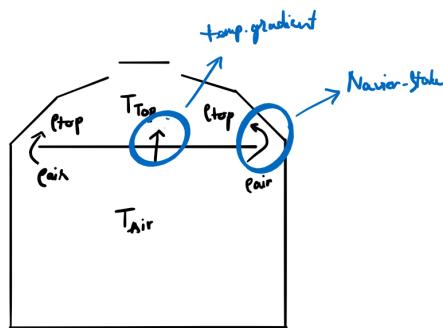
Đối với lượng khí CO_2 đi từ gian dưới lên gian trên nhà kính phức tạp hơn và phụ thuộc vào độ chênh lệch nhiệt độ và độ chênh lệch mật độ của hai gian nhà kính thông qua màn chắn nhiệt.

$$MC_{AirTop} = f_{ThScr}(CO_{2Air} - CO_{2Top}), \quad (6)$$

trong đó tốc độ lưu thông khí CO_2 qua màn chắn nhiệt f_{ThScr} ($m\ s^{-1}$) là tổng của hai tốc độ gồm tốc độ thẩm thấu qua màn chắn nhiệt và tốc độ tại những nơi không bị chắn bởi màn chắn nhiệt (xem Hình 8).

$$f_{ThScr} = U_{ThScr} K_{ThScr} |T_{Air} - T_{Top}|^{\frac{2}{3}} + (1 - U_{ThScr}) \left[\frac{g(1 - U_{ThScr})}{2\rho_{Air}^{Mean}} |\rho_{Air} - \rho_{Top}| \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Ở những nơi có màn chắn nhiệt với độ phủ $U_{ThScr} \in [0, 1]$ (không có đơn vị), tốc độ phụ thuộc



Hình 8: Chuyển động của khí CO_2 qua màn chắn nhiệt.

vào sự chênh lệch giữa nhiệt độ bên trên T_{Top} (K) và bên dưới T_{Air} (K) màn chắn và khả năng

cho không khí thấm thấu của màn chắn là K_{ThScr} ($\text{m K}^{-\frac{2}{3}} \text{s}^{-1}$). Ở những nơi không có màn chắn nhiệt với độ phủ $1 - U_{ThScr}$, tốc độ được cho bởi một phương trình Navier-Stokes phụ thuộc vào sự chênh lệch của mật độ không khí ρ_{Air} và ρ_{Top} cùng tính bằng đơn vị (kg m^{-3}). Lưu ý hệ số $2/3$ trong công thức (7) đến từ thực nghiệm trong công trình của [Bal89]. Trong công trình đó, tác giả đã sử dụng dữ liệu đo đặc được về tốc độ trao đổi không khí thông qua các màn chắn làm từ 12 loại chất liệu khác nhau và sử dụng chúng để huấn luyện mô hình $K_{ThScr}|T_{Air} - T_{Top}|^m$ với m là tham số điều chỉnh được để tìm ra m gần bằng 0.66 là $2/3$. Riêng công thức Navier-Stokes đến từ nghiên cứu [MG], trong đó ông và các cộng sự đã xét mô hình lý thuyết về sự trao đổi không khí thông qua các vết nứt trên bề mặt màn chắn gây ra bởi sự chênh lệch mật độ không khí có dạng

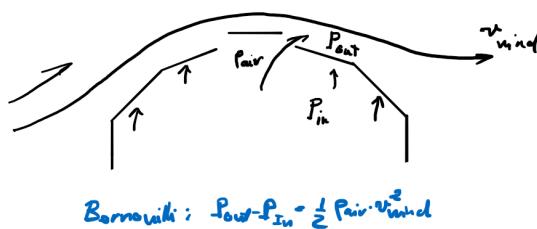
$$\phi_{crack} = \frac{L \cdot SO}{\rho_{mean}} \left[\frac{1}{2} \rho_{mean} \cdot SO \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

trong đó ϕ_{crack} ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) là lưu lượng không khí đi qua màn chắn, L (m) là chiều dài khoảng mở trên màn chắn, SO là khoảng mở trên màn chắn (m), ρ_{mean} (kg m^{-3}) là mật độ trung bình của mật độ phía trên ρ_1 (kg m^{-3}) và phía dưới màn chắn ρ_2 (kg m^{-3}) và g là gia tốc trọng trường (m s^{-2}). Các công trình sau đó và thực nghiệm cũng đã cho thấy công thức Navier-Stokes (8) cho kết quả tốt khi đối chiếu với dữ liệu đo đặc được.

Tương tự, để biểu diễn lượng khí CO_2 từ bên trong ra bên ngoài nhà kính theo hai hướng từ gian dưới và từ gian trên qua các ô thông gió ta sử dụng các công thức như dưới đây.

$$MC_{AirOut} = (f_{VentSide} + f_{VentForced})(CO_{2Air} - CO_{2Out}). \quad (9)$$

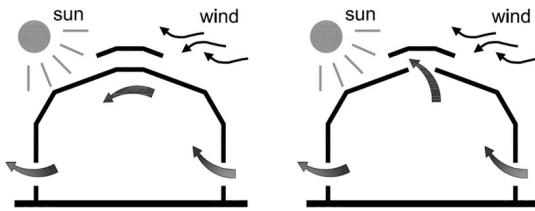
Trong đó, $f_{VentSide}$ là tốc độ gió của hệ thống quạt trên tường bao xung quanh nhà kính và $f_{VentForced}$ là tốc độ gió từ hệ thống quạt bên trong nhà kính, cả hai tốc độ đều được đo với đơn vị (m s^{-1}). Tuy nhiên trong trường hợp này, nguyên lý Bernoulli đóng vai trò quan trọng biểu diễn bởi độ chênh lệch áp suất từ phía ngoài nhà kính gây ra bởi luồng gió tự nhiên và áp suất từ phía trong nhà kính gây ra do luồng không khí bên trong (xem Hình 9), hiệu ứng Stack hay còn gọi là hiệu ứng Chimney cũng cần được xét đến (xem Hình 10). Hiệu ứng Stack là hiệu ứng mà vào mùa đông, dòng không khí lạnh từ bên ngoài vào bên trong nhà kính và bị làm nóng dần bởi hệ thống sưởi và có xu hướng đi lên phía trên mái nhà kính và thoát ra trở lại bên ngoài, vào mùa hè thì theo chiều ngược lại.



Hình 9: Dòng không khí qua ô mở mái nhà kính.

Để tổng quát hóa mô hình cho nhiều loại nhà kính khác nhau, công thức tổng quát dưới đây $f_{VentRoofSide}$ (m s^{-1}) được dùng để thiết lập công thức cho $f_{VentSide}$ [Kit+96].

$$f_{VentRoofSide} = \frac{C_d}{A_{Flr}} \left[\frac{U_{Roof}^2 U_{Side}^2 A_{Roof}^2 A_{Side}^2}{U_{Roof}^2 A_{Roof}^2 + U_{Side}^2 A_{Side}^2} \cdot \frac{2gh_{SideRoof}(T_{Air} - T_{Out})}{T_{Air}^{Mean}} + \left(\frac{U_{Roof} A_{Roof} + U_{Side} A_{Side}}{2} \right)^2 C_w v_{Wind}^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$



Hình 10: Không có hiệu ứng Stack (trái) và có hiệu ứng Stack (phải).

Công thức (10) là tổng của hai thành phần nhau với tỷ lệ giữa hệ số lưu lượng gió C_d không có đơn vị và diện tích nhà kính A_{Flr} (m^2). Thành phần thứ nhất phụ thuộc vào độ chênh lệch nhiệt độ giữa bên ngoài và bên trong nhà kính (ở gian dưới màn chắn nhiệt) đại diện cho hiệu ứng Stack khi diện tích ô thông gió trên mái A_{Roof} (m^2) là khác không. Thành phần thứ hai cho bởi độ chênh lệch áp suất bên trong và bên ngoài nhà kính và được tính bằng tổng diện tích các nơi thông gió trên nhà kính chia hai nhân vận tốc gió tự nhiên v_{Wind} ($m s^{-1}$) và hệ số áp suất gió C_w không có đơn vị. Các hệ số C_d và C_w là các hệ số lý thuyết phụ thuộc vào cấu trúc và hình dáng của nhà kính và có thể ước lượng được thông qua các số liệu đo đặc được trên thực nghiệm.

Ngoài ra, lưỡi chắn côn trùng gây hại trên các nơi thông gió và hệ số rò rỉ của nhà kính cũng sẽ được xét trong đề tài này. Khi có lưỡi chắn côn trùng, tốc độ chuyển động của các luồng không khí qua các nơi thông gió sẽ giảm xuống với hệ số

$$\eta_{InsScr} = \zeta_{InsScr}(2 - \zeta_{InsScr}), \quad (11)$$

trong đó ζ_{InsScr} không có đơn vị là độ rỗ của lưỡi, nghĩa là tỷ lệ diện tích các lỗ trên lưỡi và tổng diện tích lưỡi chắn côn trùng. Với hệ số rò rỉ $c_{leakage}$ không có đơn vị, tốc độ trao đổi không khí thường được xấp xỉ khoảng 50% tốc độ

$$f_{leakage} = \begin{cases} 0.25 \cdot c_{leakage}, & v_{Wind} < 0.25, \\ v_{Wind} \cdot c_{leakage}, & v_{Wind} \geq 0.25. \end{cases} \quad (12)$$

Một cách ngầm hiểu, giả thiết về phân bố đều của sự rò rỉ của nhà kính đã được sử dụng.

Gọi η_{Side_Thr} là ngưỡng Stack, nghĩa là nếu η_{Side} là tỷ lệ giữa diện tích các nơi thông gió trên tường bao quanh nhà kính và diện tích của tất cả các nơi thông gió trên nhà kính và η_{Side} vượt ngưỡng Stack thì hiệu ứng Stack không xảy ra và ngược lại. Khi đó, $f_{VentSide}$ được cho bởi công thức sau.

$$f_{VentSide} = \begin{cases} \eta_{InsScr} f''_{VentSide} + 0.5 f_{leakage}, & \eta_{Side} \geq \eta_{Side_Thr}, \\ \eta_{InsScr} [U_{ThScr} f''_{VentSide} \\ + (1 - U_{ThScr}) f_{VentRoofSide} \eta_{Side}] + 0.5 f_{leakage}, & \eta_{Side} < \eta_{Side_Thr}. \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó, $f''_{VentSide}$ là $f_{VentRoofSide}$ tính tại $A_{Roof} = 0$. Lưu ý, ở những nơi phủ bởi màn chắn nhiệt, hiệu ứng Stack cũng không xảy ra.

Tốc độ $f_{VentForced}$ bởi hệ thống quạt gió bên trong nhà kính được tính bởi công thức sau.

$$f_{VentForced} = \frac{\eta_{InsScr} U_{VentForced} \phi_{VentForced}}{A_{Flr}}. \quad (14)$$

Kí hiệu $U_{VentForced}$ không có đơn vị thể hiện sự điều chỉnh tốc độ gió mà hệ thống có thể $\phi_{VentForced}$ ($m^3 s^{-1}$) và có giá trị trong khoảng $[0, 1]$.



Tương tự như MC_{AirOut} , lượng khí CO_2 đi từ gian trên nhà kính ra ngoài thông qua ô mở trên mái nhà kính được tính bởi công thức

$$MC_{TopOut} = f_{VentRoof}(CO_{2Top} - CO_{2Out}). \quad (15)$$

Trong đó, $f_{VentRoof}$ là tốc độ luồng không khí đi qua ô mở mái nhà kính và được cho bởi công thức sau.

$$f_{VentRoof} = \begin{cases} \eta_{InsScr} f''_{VentRoof} + 0.5 f_{leakage}, & \eta_{Roof} \geq \eta_{Roof_Thr}, \\ \eta_{InsScr} [U_{ThScr} f''_{VentRoof} \\ + (1 - U_{ThScr}) f_{VentRoofSide} \eta_{Side}] + 0.5 f_{leakage}, & \eta_{Roof} < \eta_{Roof_Thr}. \end{cases} \quad (16)$$

Tuy nhiên, khác với $f_{VentSide}$ trong công thức (13), khi tỷ lệ η_{Roof} giữa diện tích ô mở trên mái nhà kính và tổng diện tích các ô thông gió trên nhà kính vượt ngưỡng Stack là η_{Roof_Thr} , nghĩa là hiệu ứng Stack không xảy ra, ta không thể sử dụng công thức $f_{VentRoofSide}$ trong (10) với $A_{Side} = 0$ để tính $f''_{VentRoof}$ mà phải sử dụng công thức sau bởi [BB95].

$$f''_{VentRoof} = \frac{C_d U_{Roof} A_{Roof}}{2 A_{Flr}} \left[\frac{gh_{Roof}(T_{Air} - T_{Out})}{2 T_{Mean}^2} + C_w v_{Wind}^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Cuối cùng, chúng ta cần mô tả lượng khí CO_2 bị hấp thụ vào trong tán lá thông qua quá trình quang hợp.

$$MC_{AirCan} = M_{CH_2O} h_{C_{Buf}}(P - R). \quad (18)$$

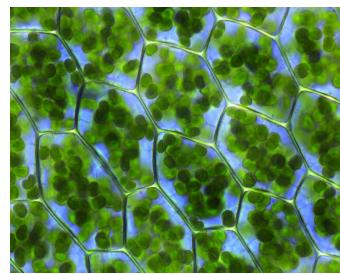
Trong đó M_{CH_2O} là khối lượng mol CH_2O ($\text{mg } \mu\text{mol}^{-1}$), P là tốc độ quang hợp ($\mu\text{mol } \{CO_2\} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), R là tốc độ hô hấp của cây ($\mu\text{mol } \{CO_2\} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) và hệ số

$$h_{C_{Buf}} = \begin{cases} 0, & C_{Buf} > C_{Buf}^{Max}, \\ 1, & C_{Buf} \leq C_{Buf}^{Max}, \end{cases} \quad (19)$$

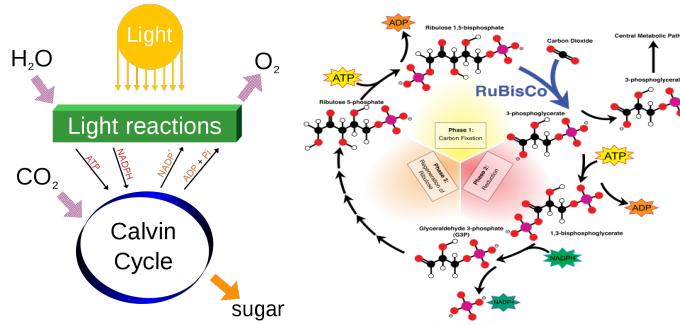
thể hiện sự ngưng quá trình quang hợp khi lượng CH_2O là C_{Buf} ($\text{mg } \{CH_2O\} \text{ m}^{-2}$) sinh ra đã vượt sức chứa của cây C_{Buf}^{Max} ($\text{mg } \{CH_2O\} \text{ m}^{-2}$). Thông thường, tốc độ hô hấp của cây không đáng kể so với tốc độ quang hợp của cây và có thể được lược bỏ hoặc được tính vào khoảng 1% của tốc độ quang hợp của cây. Tốc độ quang hợp của cây sẽ được mô tả chi tiết hơn trong phần tiếp theo.

4 Sự quang hợp của thực vật nhóm C3

Trong đề tài này, chúng ta chỉ xét đến thực vật thuộc nhóm C3 gồm các giống cây trồng và hoa màu chúng ta thường thấy trong đời sống như cà chua, dưa leo,... Quang hợp là quá trình sử dụng khí CO_2 , nước và năng lượng từ ánh sáng mặt trời để tạo thành các hợp chất hữu cơ nuôi cây. Quá trình này chủ yếu được thực hiện nhờ diệp lục (chlorophyll) chứa trong lục lạp (chloroplast), một bào quan đặc biệt, của tế bào lá cây và cây. Sự quang hợp diễn ra theo hai pha gồm pha sáng và pha tối. Ở pha sáng, lá cây hấp thụ ánh sáng mặt trời và thực hiện quá trình chuyển hóa thành năng lượng ở thành phần thylakoid trên lục lạp nhằm cung cấp năng lượng cho pha tối. Sản phẩm của pha sáng là NADPH (Nicotinamide Adenine Dinucleotide phosphate) và ATP (Adenosine Triphosphate). Ở pha tối, thông qua một chu trình Calvin, gồm một chuỗi các phản ứng hóa sinh cố định CO_2 , khử CO_2 , tái tạo chất nhận CO_2 là enzyme Rubisco xảy ra ở chất nền (stroma) của lục lạp mà không cần đến ánh sáng.



Hình 11: *Lục lạp.*



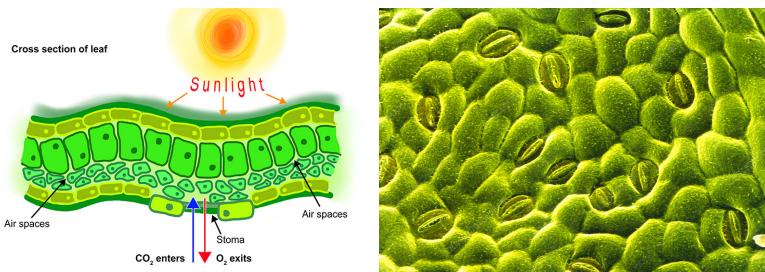
Hình 12: *Pha sáng và pha tối quá trình quang hợp.*

4.1 Mô hình quang hợp cho một đơn vị lá

Có nhiều cách để mô hình tốc độ quang hợp ở cây. Trong khuôn khổ đề tài này chúng ta sẽ kết hợp các mô hình lại với nhau (chi tiết hơn xem [Lom+75]).

4.1.1 Sự khuếch tán CO_2 vào trong lá

Tốc độ quang hợp P của một đơn vị lá có thể được xem như tốc độ khí CO_2 khuếch tán từ không khí vào bên trong tế bào lá thông qua các lỗ khí khổng (stomata) nằm rải rác trên hai mặt lá như trong Hình 13. Quá trình khuếch tán được biểu diễn bởi định luật Fick cho bởi



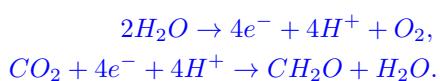
Hình 13: *Sự khuếch tán khí CO_2 vào bên trong lá (trái) và khí khổng (phải).*

$$P = \frac{CO_{2\text{ Air}} - CO_{2\text{ Stom}}}{Res}. \quad (20)$$

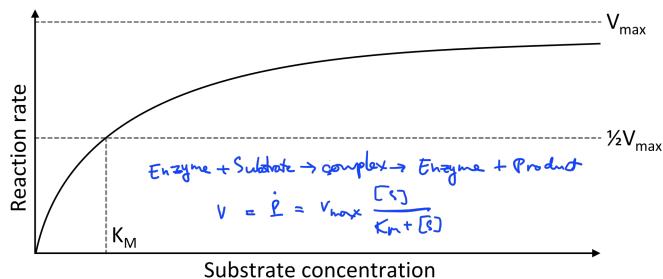
Trong đó $CO_{2\text{ Stom}}$ là nồng độ khí CO_2 hấp thụ vào trong khí khổng ($\mu\text{mol m}^{-3}$) và Res là hệ số cản trở sự hấp thụ CO_2 vào bên trong tế bào lá (s m^{-1}). Hệ số cản trở này phụ thuộc vào nhiều yếu tố trong đó có tốc độ gió thổi qua lá cây.

4.1.2 Quá trình sinh hóa ở pha tối

Các mô hình động lực Michaelis–Menten (do nhà sinh học người Đức Leonor Michaelis và nhà vật lý người Canada Maud Menten) có thể được dùng để biểu diễn các quá trình sinh hóa ở pha tối của quá trình quang hợp. Quá trình này xảy ra trong chất nền của lục lạp giữa lượng khí CO_2 đã được hấp thụ và enzyme Rubisco có trong chất nền của lục lạp để tạo thành phức hợp không bền và tiếp tục phân tách tái tạo lại thành enzyme và sinh ra các sản phẩm kèm theo. Một ví dụ về phản ứng hóa học ở pha tối diễn ra như sau. Ở bước đầu tiên nước sẽ được tách ra thành 4 ion H^+ và 4 electron tự do cùng với sản phẩm kèm theo là khí O_2 . Ở bước thứ hai, CO_2 trong chất nền được kết hợp với các electron tự do và ion H^+ để tạo ra carbohydrate CH_2O và nước trở lại.



Michaelis và Menten đã nhận thấy rằng, tốc độ phản ứng cũng là tốc độ thay đổi của sản phẩm sinh ra bởi sự phân tách của phức hợp không bền đúng bằng tốc độ phản ứng ở điểm bão hòa (có thể hiểu như tốc độ tối đa mà phản ứng có thể đạt được) nhân với tỷ lệ giữa nồng độ chất tham gia phản ứng trong chất nền và tổng của chính nó và nồng độ của chất tham gia phản ứng khi tốc độ phản ứng bằng đúng 50% tốc độ phản ứng tại điểm bão hòa (xem Hình 14).



Hình 14: Mô hình động lực Michaelis–Menten.

Khi đó, tốc độ quang hợp cho bởi công thức

$$P = \frac{P_{Max} \cdot CO_2_{Stom}}{CO_2_{Stom} + CO_2_{0.5}}. \quad (21)$$

Trong đó $CO_2_{0.5}$ là nồng độ khí CO_2 trong chất nền khi $P = P_{Max}/2$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Giải tìm CO_2_{Stom} , từ (20) và (21), tốc độ quang hợp P thỏa phương trình

$$ResP^2 - (CO_2_{Air} + CO_2_{0.5} + ResP_{Max})P + CO_2_{Air}P_{Max} = 0. \quad (22)$$

Đối với phương trình bậc 2 trên, ta chỉ quan tâm đến nghiệm P sao cho $P \rightarrow P_{Max}$ khi $CO_2_{Air} \rightarrow +\infty$. Lưu ý, lúc này tốc độ quang hợp P không còn phụ thuộc vào nồng độ CO_2 trong khí không nữa mà chỉ phụ thuộc vào nồng độ CO_2 trong không khí, hệ số cản trở Res và tốc độ quang hợp cực đại.

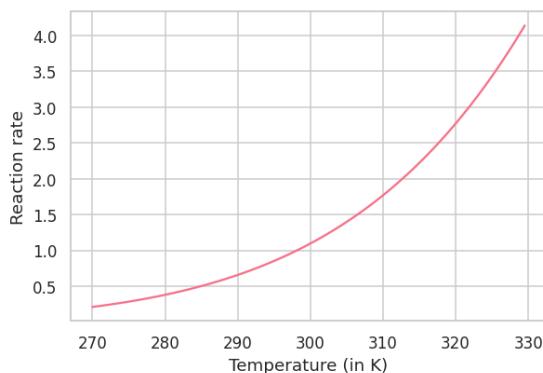
4.1.3 Tốc độ quang hợp cực đại

Để giải phương trình (22), tốc độ quang hợp cực đại cần được xác định. Đối với mô hình cho sự quang hợp của một đơn vị lá, tốc độ quang hợp cực đại được xem như một hàm số phụ thuộc

vào nhiệt độ của lá, năng lượng hoạt hóa và năng lượng ức chế enzyme. Thông thường, tốc độ đó sẽ được xác định bởi mô hình phản ứng hóa học Arrhenius

$$k(T) = k(T_0)e^{-\frac{H_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (23)$$

trong đó $k(T)$ là tốc độ phản ứng tại nhiệt độ T (K), T_0 là nhiệt độ tối ưu mà tốc độ phản ứng đã biết (K), H_a là năng lượng hoạt hóa phản ứng (J mol^{-1}) và R là hằng số khí lý tưởng ($\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

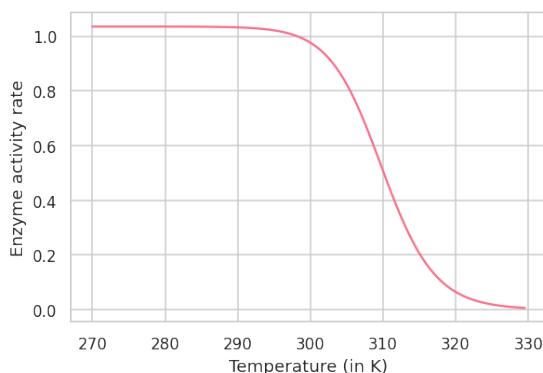


Hình 15: Mô hình Arrhenius với $T_0 = 298.15$, $k(T_0) = 1$ và $H_a = 37000$.

Tuy nhiên, khi nhiệt độ càng cao, đến một ngưỡng nào đó, hoạt động của enzyme sẽ bị ức chế và làm giảm tốc độ của quá trình quang hợp. Khi đó, mô hình Arrhenius không đủ để giải thích sự ức chế của enzyme và mô hình sau được xem như là mô hình cho sự hoạt động của enzyme Rubisco trong quá trình quang hợp và phụ thuộc vào nhiệt độ của lá.

$$f(T) = \frac{1 + e^{-\frac{H_d}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{S} \right)}}{1 + e^{-\frac{H_d}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{S} \right)}}. \quad (24)$$

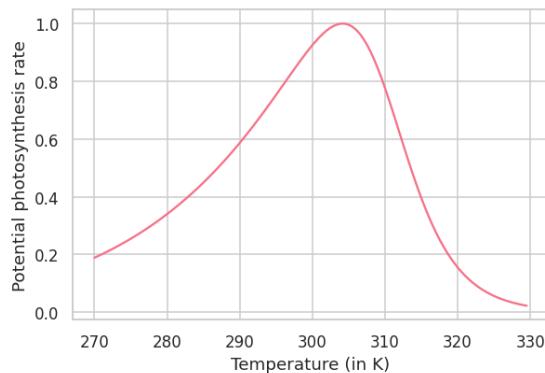
Trong mô hình (24), $f(T)$ đại diện cho sự hoạt động của enzyme ở nhiệt độ T (K), H_d là năng lượng ức chế enzyme (J mol^{-1}) và S là một đại lượng entropy tương ứng ($\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).



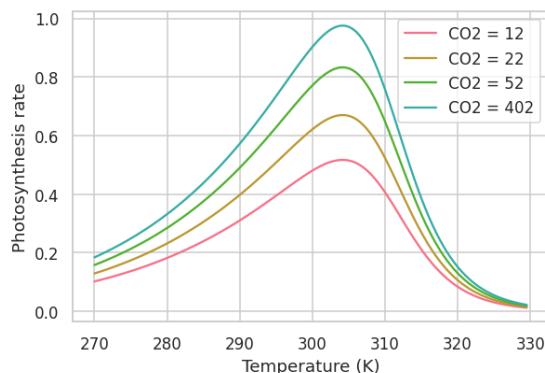
Hình 16: Mô hình hoạt động của enzyme với $H_d = 220000$ và $S = 710$.

Bằng cách kết hợp mô hình (23) và (24), tốc độ quang hợp tối đa trên mỗi đơn vị lá được cho bởi công thức

$$P_{Max}(T) = k(T)f(T). \quad (25)$$



Hình 17: Tốc độ quang hợp cực đại $P_{Max}(T) = k(T)f(T)$ (đã chuẩn hóa).



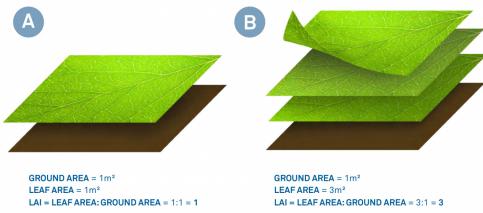
Hình 18: Tốc độ quang hợp với các nồng độ CO_2 khác nhau trong không khí nhà kính và hệ số cản trở $Res = 2.5$ (đã chuẩn hóa).

4.2 Mô hình quang hợp cho cả tán lá

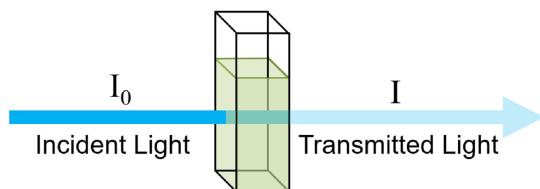
Trong phần này, chúng ta sẽ thắc triển mô hình cho cả tán lá bên trong nhà kính.

4.2.1 Chỉ số diện tích lá

Trước hết ta cần xét đến khái niệm chỉ số diện tích lá (leaf area index - LAI). Chỉ số LAI được tính bởi tổng mật độ lá trên một đơn vị diện tích đất trong nhà kính. Khi đó, nếu tán lá càng dày thì chỉ số LAI càng cao (xem Hình 19). Chỉ số này rất quan trọng đối với mô hình quang hợp cho cả tán lá vì độ hấp thụ ánh sáng phụ thuộc chặt chẽ vào LAI . Thông qua LAI và định luật Beer, năng lượng ánh sáng đi đến tán lá trước khi vào tán lá là I_0 ($\mu\text{mol}\{\text{photons}\} \text{ m}^{-2}$



Hình 19: Chỉ số diện tích lá.



Hình 20: Định luật Beer, cường độ tia tối giảm sau khi đi qua một dung dịch.

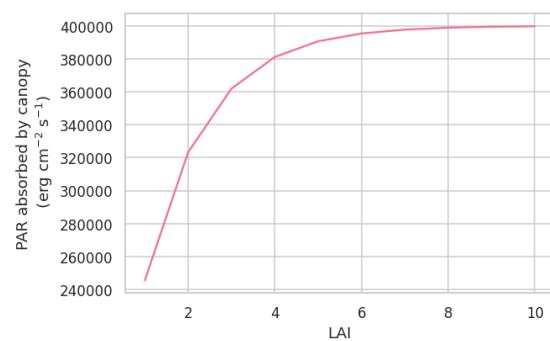
s^{-1}) và sau xuyên qua tán lá là I ($\mu\text{mol}\{\text{photons}\} m^{-2} s^{-1}$) đúng bằng

$$I = \frac{I_0 \cdot K \cdot e^{-K \cdot LAI}}{1 - m}, \quad (26)$$

trong đó K là hệ số tắt có giá trị từ 0.7 đến 1.0 nếu lá cây phân tầng ngang như cây cà chua và từ 0.3 đến 0.5 nếu lá cây nằm nghiêng như trong trường hợp cây lúa nước và m là hệ số truyền ánh sáng của lá cây thường mặc định là 0.1. Khi đó, năng lượng ánh sáng lá cây nhận được là sự chênh lệch của lượng năng lượng của tia tới trước khi vào tán lá và năng lượng của tia ló sau khi đi qua tán lá và được tính bởi công thức

$$L = L_0 \left(1 - \frac{K \cdot e^{-K \cdot LAI}}{1 - m} \right). \quad (27)$$

Kí hiệu L là lượng photon nhận vào bởi lá cây ($\mu\text{mol}\{\text{photons}\} m^{-2} s^{-1}$) và L_0 là lượng photon ban đầu phía trên tán lá. Lưu ý, công thức (27) chưa xét đến yếu tố phản xạ ánh sáng và sự hấp thụ bức xạ từ nền nhà kính và các vật dụng khác. Công thức đầy đủ hơn có thể xem [Van11].



Hình 21: Sự phụ thuộc của lượng bức xạ ánh sáng nhận được bởi lá cây vào chỉ số diện tích lá.

4.2.2 Công thức Arrhenius mở rộng

Để tính giá trị P_{Max} , là tốc độ quang hợp tối đa của toàn bộ lá cây trong nhà kính, công thức mở rộng sau của Arrhenius được sử dụng trong công thức (25) thay cho (23).

$$k(T) = LAI \cdot k(T_0) \cdot e^{-\frac{H_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}. \quad (28)$$

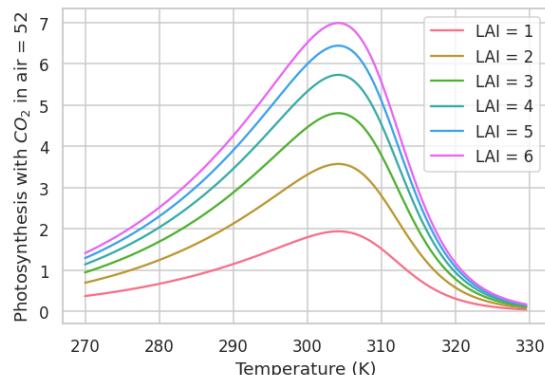
Ở đây, $k(T)$ là tốc độ phản ứng cho toàn bộ lá cây ở nhiệt độ T (K) và $k(T_0)$ là tốc độ phản ứng ở điều kiện tối ưu T_0 (K) của một đơn vị lá và H_a cũng là năng lượng hoạt hóa cho một đơn vị lá cây.

4.2.3 Mô hình động lực Michaelis–Menten cho P_{Max}

Khác với mô hình quang hợp cho một đơn vị lá, lượng năng lượng ánh sáng hấp thụ vào trong tán lá bị ảnh hưởng bởi LAI cần được thêm vào và ảnh hưởng đến tốc độ quang hợp cực đại P_{Max} . Do đó, ta xét mô hình sau cho P_{Max} , là hàm số phụ thuộc vào L và T .

$$P_{Max}(L, T) = \frac{P_{MLT} \cdot P_{Max}(T) \cdot L}{L + L_{0.5}}. \quad (29)$$

Trong đó, $L_{0.5}$ là năng lượng ánh sáng khi $P_{Max}(L, T) = P_{Max}(T)/2$ ($\mu\text{mol}\{\text{photons}\} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), $P_{Max}(T)$ được tính bởi công thức (25) với $k(T)$ tính theo công thức (28) và P_{MLT} là tốc độ quang hợp cực đại tại điểm bão hòa ánh sáng và nhiệt độ tối ưu T . Thông thường P_{MLT} được xác định dựa trên các nghiên cứu trước đó và thực nghiệm.



Hình 22: Quang hợp của tán lá với các nồng độ CO_2 khác nhau trong không khí và các giá trị LAI khác nhau.

5 Dữ liệu

Trong đề tài này, ta sẽ sử dụng dữ liệu nhà kính đã được công bố tại <https://github.com/CEAOD/Data>. Một số dữ liệu khác liên quan đến các hệ số của mô hình có thể tìm thấy từ [Mar94; Van11; De 96] và các nguồn liên quan.



6 Hướng dẫn và yêu cầu chung

6.1 Hướng dẫn

SV cần tuân thủ theo đúng yêu cầu và HD như bên dưới, *GV không giải quyết các trường hợp phát sinh do SV làm không đúng theo HD.*

SV có thể chia nhóm giữa các lớp L01-06 với nhau chứ không nhất thiết cùng một lớp, mỗi nhóm chỉ được phép có từ 4-5 người. Nếu nhóm có nhiều thành viên từ các lớp khác nhau thì trên bìa file report phải mở ngoặc sau MSSV để ghi tên lớp. Trong danh sách thành viên cần phải chỉ ra “Nhóm trưởng.” SV đang học hệ KSTN cần ghi rõ sau MSSV trong file report và tự nộp lại bài vào site của BKEL của nhóm KSTN (site của học phần mở rộng - MR).

BTL sẽ không được báo cáo trực tiếp trên lớp nên mọi khía cạnh liên quan đến BTL này sẽ được hỏi thi trắc nghiệm (khoảng từ 10-12 CH trong tổng số khoảng 25 CH trắc nghiệm) trong đề thi cuối kì của môn học. Do đó các nhóm SV thực hiện nên tổ chức, phối hợp làm BTL này sao cho đảm bảo mọi thành viên đều hiểu rõ cả mọi khía cạnh của nó, nhằm đảm bảo kết quả học tập, thi cử trong BTL này lẫn trong đề thi cuối kì. Nhóm trưởng cần tổ chức nhóm làm việc sao cho yêu cầu này được đảm bảo.

Trong thời gian làm bài, SV nên email hỏi bài đến đồng thời cả hai GVHD và trợ giảng (xem thông tin email trên trang bìa) để các thầy trả lời chung cho cả 06 nhóm L01-L06.

Về kiến thức nền tảng liên quan đến đề tài, SV cần đọc kỹ thông tin của mô hình trong các chương 2, 3 hoặc 8, 9 (là tóm tắt của chương 2 và 3) trong [Van11] và các trích dẫn liên quan đến các công thức.

6.2 Yêu cầu

- Hạn nộp bài: 3/1/2010. Đối với mỗi câu hỏi, yêu cầu sinh viên trình bày bố cục rõ ràng, mạch lạc.
- Viết báo cáo theo đúng **bố cục** như trong file **mẫu** bằng LaTeX.
- Mỗi nhóm khi nộp bài **cần phải nộp theo file log (nhật ký)** ghi rõ: **tiến độ công việc theo tuần cho cả 06 tuần**, phân công nhiệm vụ, nội dung ý kiến trao đổi của các thành viên,...

6.3 Nộp bài

- SV chỉ nộp bài qua hệ thống BK-eLearning (sẽ được mở trong các tuần tới): nén tất cả các file cần thiết (file .tex, file .py, ...) thành một file tên là “*BTL-CO2011-MT201-Các-MSSV.zip*” và nộp trong mục Assignment trên trang BK-eLearning.
- Lưu ý: mỗi nhóm **chỉ cần một thành viên là nhóm trưởng nộp bài, ngay cả đối với nhóm có các thành viên ở các lớp khác.**

7 Đề bài

Sinh viên thực hiện các yêu cầu sau.

Bài toán 1 (Bắt buộc). Viết báo cáo và chia thành các chương sau.

1. Phần kiến thức chuẩn bị:



- (a) Trình bày định nghĩa, phân loại theo các tiêu chuẩn khác nhau, dạng tổng quát của hệ động lực nói chung, và đặc biệt là của hệ phương trình vi phân bậc nhất với điều kiện đầu tại thời điểm t_0 là mô hình hệ động lực liên tục được sử dụng trong BTL này.
- (b) Giới thiệu điều kiện cần và đủ để hệ phương trình vi phân trên tồn tại và duy nhất nghiệm.
- (c) Cho một số ví dụ về hệ phương trình vi phân bậc nhất giải được và công thức nghiệm chính xác.
- (d) Giới thiệu và trình bày các bước xấp xỉ của giải thuật Explicit Euler và Explicit Runge–Kutta bậc 4 giải hệ phương trình vi phân bậc nhất tổng quát.
- (e) Sử dụng công thức nghiệm xấp xỉ Explicit Euler và Explicit Runge–Kutta bậc 4, thực hiện tính xấp xỉ nghiệm chính xác của các ví dụ phía trên tại các thời điểm $t_0, t_0 + h, t_0 + 2h, \dots, t_0 + 5h$ với h tự chọn.

2. Phần ứng dụng: Thực hiện các câu hỏi 2, 3, 4 và 5.

Bài toán 2 (Bắt buộc). Thực hiện các công việc sau.

- a) Trình bày lại chi tiết mô hình đối với nồng độ khí CO_2 trong nhà kính như đã mô tả ở các Phần 2, 3 và 4 và viết vào báo cáo.
- b) Viết chương trình tính các công thức (3)-(7), (9)-(19), (22), (25), (28), (24), (27) và (29). Mỗi công thức là một hàm với các tham số đầu vào là các hệ số và biến số tham gia vào từng công thức tương ứng. Sau đó, viết chương trình trả về về phái của hệ (1) và (2) đã chia cho $capCO_{2Air}$ và $capCO_{2Top}$ tương ứng đặt tên hàm này là dx . Trình bày chi tiết vào trong báo cáo.

Bài toán 3 (Bắt buộc). Với giả thiết độ chênh lệch nhiệt độ và mật độ không khí không đổi, nghiên cứu từ [Van11] và các trích dẫn liên quan các giá trị cụ thể hợp lý cho từng tham số đầu vào của hàm dx kể cả khoảng chênh lệch nhiệt độ và mật độ không khí ngoại trừ biến số CO_{2Air} và CO_{2Top} . Lưu ý các giá trị này cần đúng với đơn vị được xét trong bài báo cáo hoặc có công thức chuyển đổi tương ứng. Chạy thử nghiệm với các giá trị trên và một số số liệu cụ thể cho CO_{2Air} và CO_{2Top} . Trình bày chi tiết vào trong báo cáo.

Bài toán 4 (Bắt buộc). Thực hiện các công việc sau.

- a) Tìm hiểu và nghiên cứu thuật giải explicit Euler và Runge–Kutta bậc 4 cho hệ các phương trình vi phân thường bậc nhất (xem tham khảo [ESG93; EG96]). Viết chương trình cho hai thuật giải này đặt tên lần lượt là **euler** và **rk4** với tham số đầu vào là một hàm callable dx , giá trị đầu vào tại thời điểm t của hai biến số CO_{2Air} và CO_{2Top} , kích thước bước xấp xỉ h . Các solver này trả về là giá trị xấp xỉ của CO_{2Air} và CO_{2Top} ở thời điểm $t + h$. Trình bày chi tiết vào trong báo cáo.
- b) Dùng các solver trên tìm giá trị xấp xỉ của CO_{2Air} và CO_{2Top} ở thời điểm sau thời điểm t đúng 5 phút, 10 phút, 20 phút, ... và tính ra độ chênh lệch của kết quả so với dữ liệu thật. Bình luận về độ chính xác của mô hình và trình bày chi tiết vào trong báo cáo.

Bài toán 5 (Bắt buộc). Thực hiện lại các câu 2-4 cho áp suất hơi nước VP_{Air} và VP_{Top} như mô tả ở chương 2 và 8 trong [Van11]. Trình bày chi tiết vào trong báo cáo.

Bài toán 6 (Nâng cao và là bắt buộc đối với hệ tài năng, tùy chọn đối với hệ CQ). Thực hiện các công việc sau.



- a) Đọc và tìm hiểu phương pháp giải các phương trình vi phân bằng các kỹ thuật Deep Learning như đã giới thiệu trong <https://arxiv.org/pdf/1711.10561.pdf>. Đề xuất thuật giải (không cần quá phức tạp) tương tự cho mô hình ODE tổng quát

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x), \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \quad (30)$$

Trong đó, f là hàm số phụ thuộc vào t và $x(t)$ (lưu ý, kí hiệu này ở dạng vector). Trình bày chi tiết vào trong báo cáo.

- b) Tìm hiểu về cách sử dụng pytorch hoặc tensorflow và một số kiến thức về cách xây dựng và huấn luyện mô hình Deep Learning cơ bản. Sử dụng giải thuật đề xuất ở câu a), xây dựng và huấn luyện mô hình Deep Learning đơn giản thử nghiệm cho ít nhất một phương trình vi phân dạng (30) mà công thức nghiệm chính xác đã biết (dữ liệu huấn luyện cho thử nghiệm này được sinh ra từ công thức nghiệm chính xác). Trình bày chi tiết vào trong báo cáo.
- c) Nghiên cứu cách sử dụng dữ liệu về nồng độ khí CO_2 trong nhà kính (xem <https://github.com/CEAOD/Data>), giải thuật đề xuất ở câu a) và kiến thức ở câu b) để xây dựng và huấn luyện mô hình Deep Learning giải hệ phương trình vi phân liên quan đến $CO_2 Air$ và $CO_2 Top$ đã nói đến trong đề tài này. So sánh với nghiệm tìm được bằng kỹ thuật cỗ điển Euler và Runge–Kutta.

8 Cách đánh giá và xử lý gian lận

8.1 Đánh giá

Mỗi bài làm sẽ được đánh giá như sau.

Nội dung	Tỉ lệ điểm (%)
- Phân tích, trả lời mạch lạc, có tính hệ thống, đúng trọng tâm các câu hỏi và yêu cầu	30%
- Các chương trình được viết gọn gàng và thực thi được	30%
- Biểu đồ và đồ thị đúng, rõ ràng và trực quan	20%
- Trình bày kiến thức chuẩn bị rõ ràng, phù hợp	15%
- Trình bày văn bản đẹp, đúng chuẩn	5%

8.2 Xử lý gian lận

Bài tập lớn phải được sinh viên (nhóm) TỰ LÀM. Sinh viên (nhóm) sẽ bị coi là gian lận nếu:

- Có sự giống nhau bất thường giữa các bài thu hoạch (nhất là phần kiến thức chuẩn bị). Trong trường hợp này, TẤT CẢ các bài nộp có sự giống nhau đều bị coi là gian lận. Do vậy sinh viên (nhóm) phải bảo vệ bài làm của mình.
- Sinh viên (nhóm) không hiểu bài làm do chính mình viết. Sinh viên (nhóm) có thể tham khảo từ bất kỳ nguồn tài liệu nào, tuy nhiên phải đảm bảo rằng mình hiểu rõ ý nghĩa của tất cả những gì mình viết.

Bài bị phát hiện gian lận thì sinh viên sẽ bị xử lý theo quy định của nhà trường.



References

- [Bal89] LJ Balemans. *Assessment of criteria for energetic effectiveness of greenhouse screens.* 1989.
- [BB95] Thierry Boulard and Alain Baille. “Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents”. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* 61.1 (1995), pp. 37–47.
- [De 96] HF De Zwart. *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model.* 1996.
- [EG96] Hairer Ernst and Wanner Gerhard. *Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems.* Springer, 1996.
- [ESG93] Hairer Ernst, P. Nørsett Syvert, and Wanner Gerhard. *Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems.* Springer, 1993.
- [Kit+96] C Kittas et al. “Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings”. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* 65.1 (1996), pp. 37–49.
- [Lom+75] Paul W Lommen et al. “Photosynthetic model”. In: *Perspectives of Biophysical Ecology.* Springer, 1975, pp. 33–43.
- [Mar94] LFM Marcelis. “A simulation model for dry matter partitioning in cucumber”. In: *Annals of botany* 74.1 (1994), pp. 43–52.
- [MG] N.J.van de Braak MIGUEL A.F. and 1995 G.P.ABot. “Mass flow through materials with pores and openings: II-natural convection”. In: *submitted for publication in International Journal of Heat and Mass Transfer ()*.
- [Van11] Bram HE Vanthoor. *A model-based greenhouse design method.* 2011.

Giải thích kí hiệu

Một số kí hiệu được sử dụng trong đề tài này được cho bởi bảng sau.

- *Top/Air*: the compartment above/below the thermal screen;
- *Out/Ext*: outside the greenhouse/external source;
- *Blow/Pad*: the direct air heater/pad and fan;
- *Can*: the canopy inside the greenhouse;
- MC_{AB} : the net CO_2 flux from A to B;
- $cap_{CO_2 Top/Air}$: capacity of the compartment above/below the thermal screen to store CO_2 (m);
- $\dot{CO_2}_{Top/Air}$: the rate change of CO_2 concentration in the compartment above/below the thermal screen in time ($mg\ m^{-3}\ s^{-1}$);
- MC_{AB} : the net CO_2 flux from A to B ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$);
- η_{HeatCO_2} : the amount of CO_2 released when 1 Joule sensible energy is produced by the direct air heater ($mg\ \{CO_2\} J^{-1}$);



- $H_{BlowAir}$: the heat flux from the direct air heater to the greenhouse air (W m^{-2});
- U_{Blow} : the control valve of the direct air heater ranging in $[0, 1]$;
- P_{Blow} : the heat capacity of the direct air heater (W);
- A_{Flr} : the area of the greenhouse floor (m^2);
- U_{ExtCO_2} : the control valve of the external CO_2 source ranging in $[0, 1]$;
- ϕ_{ExtCO_2} : the capacity of the external CO_2 source (mg s^{-1});
- f_{Pad} : the ventilation flux due to the pad and fan system (m s^{-1});
- U_{Pad} : the control valve of the pad and fan system ranging in $[0, 1]$;
- ϕ_{Pad} : the capacity of the air flux through the pad ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);
- f_{ThScr} : the air flux through the thermal screen (m s^{-1});
- U_{ThScr} : the control of the thermal screen ranging in $[0, 1]$;
- K_{ThScr} : the screen flux coefficient determining the permeability of the screen ($\text{m K}^{-\frac{2}{3}} \text{s}^{-1}$);
- g : the gravitational acceleration (m s^{-2});
- $\rho_{Air/Top}$: the density of the greenhouse air below/above the thermal screen (kg m^{-3});
- ρ_{Air}^{Mean} : the mean density of the greenhouse air (kg m^{-3});
- $T_{Air/Top}$: the temperature below/above the thermal screen (K);
- $f_{VentSide}$: the rate for the sidewall ventilation system (m s^{-1});
- $f_{VentForced}$: the rate for the forced ventialtion system (m s^{-1});
- $f_{VentRoofSide}$: the ventilation rate through both the roof and side vents (m s^{-1});
- $C_{d/w}$: discharge/global wind pressure coefficient depending on the greenhouse shape and the use of an outdoor thermal screen (-);
- $U_{Roof/Side}$: the control of the roof/side openings ranging in $[0,1]$;
- $A_{Roof/Side}$: the roof/side opening area (m^2);
- $h_{SideRoof}$: the vertical distance between mid-points of side wall and roof ventilation openings (m);
- T_{Air}^{Mean} : the mean temperature between the indoor and outdoor temperatures (K); v_{Wind} : wind speed (m s^{-1});
- η_{InsScr} : reduction factor (-);
- ζ_{InsScr} : the screen porosity i.e. the area of holes per unit area of the insect screen (-);
- $f_{leakage}$: the leakage rate depending on wind speed (m s^{-1});
- $c_{leakage}$: the leakage coefficient depending on the greenhouse type (-);



- η_{Side} : the ratio between the side vents area and total ventilation area (-);
- η_{Side_Thr} : the threshold value above which no chimney effect is assumed to occur (-);
- $U_{VentForced}$: the control valve of the forced ventilation ranging in $[0, 1]$;
- $\phi_{VentForced}$: the air flow capacity of the forced ventilation system ($m^3 s^{-1}$);
- h_{Roof} : the vertical dimension of a single ventilation opening (m);
- M_{CH_2O} : the molar mass of CH_2O ($mg \mu mol^{-1}$);
- $h_{C_{Buf}}$: the inhibition of the photosynthesis rate by saturation of the leaves with carbohydrates (-);
- C_{Buf}/C_{Buf}^{Max} : the capacity/maximum capacity of carbonhydrates storage in the canopy buffer ($mg \{CH_2O\} m^{-2}$);
- P/R : the photosynthesis/photorespiration rate of the canopy during the photosynthesis process ($\mu mol \{CO_2\} m^{-2} s^{-1}$);
- CO_2_{Stom} : the amount of CO_2 in the chloroplasts ($\mu mol m^{-3}$);
- Res : the resistance to CO_2 diffusion ($s m^{-1}$);
- P_{Max} : the photosynthesis rate at saturating CO_2_{Chl} ($\mu mol \{CO_2\} m^{-2} s^{-1}$);
- $CO_{2.0.5}$: the amount of CO_2_{Chl} such that $P = P_{Max}/2$ ($\mu mol m^{-3}$);
- T : the temperature of the leaf (K);
- T_0 : a specific temperature of the leaf that we know the reaction rate (K);
- $K(T)$: the reaction rate (-);
- H_a : the activation energy ($J mol^{-1}$);
- R : the ideal gas constant ($J mol^{-1} K^{-1}$);
- $f(T)$: the enzyme activity rate (-);
- H_d : the deactivation energy ($J mol^{-1}$);
- S : the entropy term ($J mol^{-1} K^{-1}$);
- K : the extinction coefficient in between 0.7-1.0 if the leaves are not inclined. Otherwise 0.3-0.5;
- I : the L measured at the ground surface ($\mu mol \{\text{photons}\} m^{-2} s^{-1}$);
- I_0 : the L measured above the canopy ($\mu mol \{\text{photons}\} m^{-2} s^{-1}$);
- m : the transmittance of the leaves, which set as default 0.1;
- L : the photosynthetically active radiation absorbed by the canopy ($\mu mol \{\text{photons}\} m^{-2} s^{-1}$);
- $L_{0.5}$: the photosynthetically active radiation at which $P_{Max}(L, T) = P_{MLT} \cdot P_{Max}(T)/2$ ($\mu mol \{\text{photons}\} m^{-2} s^{-1}$);
- P_{MLT} : the value of P_{Max} at saturation L and optimum T ($\mu mol \{CO_2\} m^{-2} s^{-1}$).