

REVIEW ARTICLE

PID Control for Greenhouse Climate Regulation: A Review

Tae Ho Kim^{1,2}, Ka Young Lee³, Md Razob Ali⁴, Md Nasim Reza^{3,4}, Sun-Ok Chung^{2,3,4}, Na-Rae Kang^{5*}

¹Department of Smart Agriculture System Engineering, Graduate School of Smart Agriculture, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

²Seocheon County Office, NongHyup Bank, Seocheon, Chungnam 33644, Republic of Korea

³Department of Smart Agricultural Systems, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

⁴Department of Agricultural Machinery Engineering, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

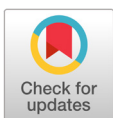
⁵Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

*Corresponding author: rkd5748@naver.com

Abstract

The increasing demand for sustainable agricultural practices has spurred a significant interest in optimizing greenhouse climate regulation to enhance crop yield, quality, and energy efficiency. Proportional-Integral-Derivative (PID) control, a widely used feedback control technique, has emerged as a promising solution for maintaining optimal greenhouse conditions. This paper presents a comprehensive review of the application of PID control in greenhouse climate regulation. A detailed analysis of the PID control algorithm's components, namely Proportional, Integral, and Derivative terms, highlights their respective roles in achieving precise regulation of temperature, humidity, CO₂ levels, and ventilation. Moreover, the review explores the challenges associated with parameter tuning and controller stability in greenhouse settings. The review discusses sensor technologies, and communication protocols, which enable real-time data feedback and enhance the performance of PID controllers. Furthermore, the review presents a comprehensive analysis of recent studies and field applications showcasing the effectiveness of PID control in greenhouse environments. Comparative studies with other control strategies are also discussed, highlighting the advantages and limitations of PID control in addressing varying climate conditions and crop-specific requirements. Additionally, recent advancements in machine learning-based PID tuning techniques are explored, offering promising alternatives for optimizing greenhouse climate management. The review shows that PID control is a promising approach for greenhouse climate regulation. However, there are still some challenges that need to be addressed, such as the uncertainty of the greenhouse climate model and the non-linearity of the greenhouse system. Future research should focus on addressing these challenges and developing more advanced PID control techniques for greenhouse applications.

Keywords: Smart farm, greenhouse, climate control, PID control, plant growth



OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/pastj.20230008>

Received: June 09, 2023

Revised: June 21, 2023

Accepted: June 21, 2023

Copyright: © 2023 Korean Society of Precision Agriculture



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

전 세계 인구가 2030년에는 86억 명, 2050년에는 98억 명에 달할 것으로 예상됨에 따라 식량 및 농작물 생산에 대한 수요가 빠르게 증가하고 있다(Sagheer et al., 2021). 이러한 수요를 충족하기 위해서는 2050년까지 경작지를 42%, 수자원을 120%까지 대폭 늘려야 한다(Sagheer et al., 2021; Godfray et al., 2019). 전통적인 노지 농업이 직면한 물 부족, 노동력 부족 및 기타 문제들을 해결하기 위해 온실 재배는 식량과 작물 생산을 늘리기 위한 최적의 솔루션으로 부상하고 있다.

온실 재배는 현대 농업에서 크게 각광받으며 최근 몇 년 동안 점점 더 많은 관심을 받고 있다(Choab et al., 2019; Rodríguez et al., 2015). 전통적인 노지 생산과 달리 온실 재배는 작물 수확량과 품질을 향상시키는 통제된 환경을 제공함으로써 뚜렷한 이점을 제공한다(Su et al., 2020). 온실 구조는 태양 에너지를 효율적으로 활용하면서 악천후로부터 식물을 보호하는 보호막 역할을 한다. 온실 환경은 온도, 습도, 광량과 같은 중요한 요소를 조절하여 식물의 성장과 발달을 위한 최적의 조건을 조성한다.

재배용 온실을 구현하려면 환경 제어를 위한 다양한 장치를 사용해야 한다. 그러나 여러 환경 매개변수를 효율적으로 관리하고 모니터링하는 것이 매우 중요하다(Postolache et al., 2012). 과거에는 재배자가 수동 관찰에 의존하여 최적의 재배 조건을 유지하기 위해 많은 인력이 필요했다. 그러나 스마트 농업의 등장은 온실 재배에 혁명을 불러왔다(Lytos et al., 2020; López-Cruz et al., 2018).

온실 제어 시스템을 설계하는 데는 (1) 온실 내 열 및 질량 교환의 복잡한 역학, (2) 내부 환경이 작물 성장에 미치는 중대한 영향, (3) 예측할 수 없는 날씨로 인해 제어 프로세스에 상당한 변동이 발생하는 등 몇 가지 과제가 있다. 따라서 효과적인 온실 환경 설계는 온실 환경의 정확한 모델링과 내재된 불확실성 해결이라는 두 가지 핵심 측면에 중점을 둔다.

최근 온실 환경 제어를 위한 다양한 첨단 제어 기법과 전략이 제안되고 있다. 여기에는 예측 제어(Blasco, et al., 2007), 적응 제어(Su et al., 2017; Hu et al., 2011), 비선형 피드백 제어(Su et al., 2017; Hu et al., 2011), 퍼지 제어(Mohamed and Hameed, 2018; Heidari and Khodadadi, 2017), 강인 제어(Bennis et al., 2008; Endo et al., 2022), 최적 제어(Wu et al., 2019; Sciarretta et al., 2015)가 포함된다. 이러한 다양한 접근 방식은 온실 환경의 복잡한 역학, 불확실성 및 특정 요구 사항을 고려하여 온실 환경 제어의 정밀도를 향상시키는 데 기여해 왔다. 이러한 연구는 온실 재배에서 보다 정확하고 효율적인 온도 조절을 달성하기 위한 중요한 통찰력과 기술적 발전을 제공한다. 이러한 연구는 실제 온실 생산에 유용하지만, 이러한 접근 방식 중 상당수는 이론적으로 복잡하거나 실제로 구현하기가 복잡하다. 연구자들은 적응형 알고리즘, 강력한 제어 전략, 고급 튜닝 방법, 다변수 제어 접근법, 에너지 효율적인 최적화 기법을 통해 이러한 한계를 해결함으로써 PID 알고리즘을 사용하여 온실 환경 제어의 정밀도를 향상시키는 것을 목표로 한다. 이러한 노력은 에너지 사용량과 환경 영향을 최소화하면서 작물 생산성을 극대화하는 보다 효과적인 제어 시스템 개발에 기여한다. 그 결과, 온실 환경 제어를 위한 대부분의 컨트롤러 설계는 여전히 기존의 비례, 적분 및 미분(PID) 컨트롤러에 의존하고 있다. PID 컨트롤러는 구조가 간결하고 구현이 쉬우며 성능이 우수하기 때문에 우선시되고 있다. PID 컨트롤러는 공정 제어, 모터 구동, 자동차, 비행 제어, 계측 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있으며, 제어 컨트롤러의 약 95%가 PID 구조를 활용하고 있다(Zheng et al., 2012). 온실을 중심으로 한 에너지 환경 기술로 운영되는 스마트팜에서는 온실 복합 환경 제어 시스템의 요소 기술이 온실 환경 센싱 및 제어 장비로 활용되고 있어 IoT 및 제어 이론을 활용한 원격 제어 기술 개발의 중요성이 증가하고 있다(Lim et al., 2023).

이 연구의 목적은 온실 환경 관리를 위한 PID 제어에 대한 종합적인 리뷰를 수행하는 것이다. 이 연구는 온실 내 온도, 습도 및 기타 환경 매개변수를 정밀하게 유지하는 데 있어 PID 제어의 효과, 한계 및 발전 사항을 검토하는 것을 목표로 한다. 기존 연구를 종합하여 온실 환경에서의 PID 제어 적용에 대한 귀중한 통찰력을 제공하고, PID 제어가 직면한 과제와 한계를 파악하며, 이러한 한계를 극복할 수 있는 잠재적 솔루션을 모색하고자 한다. 또한 이 연구는 온실 재배에서 작물 생산성, 에너지 효율성 및 환경 지속 가능성을 최적화하는 데 있어 PID 제어의 중요성을 강조하는 것을 목표로 한다. 전반적으로 이 연구는 온실 환경 제어와 관련된 연구자, 엔지니어 및 실무자를 위한 자료로서 보다 효율적이고 정확한 제어 전략을 개발하고 구현하는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

온실 제어

시설농업 분야의 환경 제어에 관한 수많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구의 주요 목표는 두 가지로, 첫째는 온실 환경의 복잡한 역학을 포착하는 정확한 모델을 개발하고, 둘째는 관심 있는 미기후 변수를 조절할 수 있는 효율적이고 유연한 제어를 설계하는 것이다. 이 특정 문제는 전 세계 연구자들로부터 큰 주목을 받아 다양한 환경 제어 시스템에 대한 광범위한 분석, 실험 및 제안으로 이어졌다. 온도, 상대습도(RH), CO₂ 시비, 태양광 등 중요한 변수를 조작하는 것은 성공적인 보호 농업에 필요한 최적의 조건을 만드는 데 매우 중요하다. 연구자들은 온실 환경 내의 복잡한 관계와 역학을 정확하게 표현하는 모델을 개발하기 위해 노력해 왔다. 이러한 모델은 일사량, 환기, 작물 성장, 외부 기상 조건 등 다양한 요인 간의 상호 작용을 고려한다.

또한 연구자들은 효율적이고 유연한 컨트롤러의 설계와 구현에 집중하고 있다. 이러한 컨트롤러는 온실 내에서 원하는 미기후 변수를 조정하고 유지하는 데 중요한 역할을 담당한다. 제어 이론은 일반적으로 시스템의 수학적 표현을 필요로 하기 때문에 제어 알고리즘의 튜닝과 시뮬레이션을 용이하게 하기 위해 다양한 온실 모델이 개발되었다. 이러한 모델은 공기 온도만 나타내는 간단한 모델부터 작물 반응을 포함하는 보다 복합적인 모델까지 다양하다. 기존의 온실 환경 모델은 일반적으로 에너지 및 질량 균형을 기반으로 구축되어 있다. 이러한 모델은 온실 환경 내에서 열 전달, 환기 및 기타 중요한 프로세스의 역학을 이해하기 위한 프레임워크를 제공한다. 연구자들은 이러한 모델을 활용하여 제어 알고리즘을 개발하고 테스트하여 효율적이고 정밀한 온실 환경 제어를 위해 온도, 습도 및 기타 변수의 조절을 최적화할 수 있다. Fig. 1은 다양한 온실 환경 제어 알고리즘을 보여주고 있다.

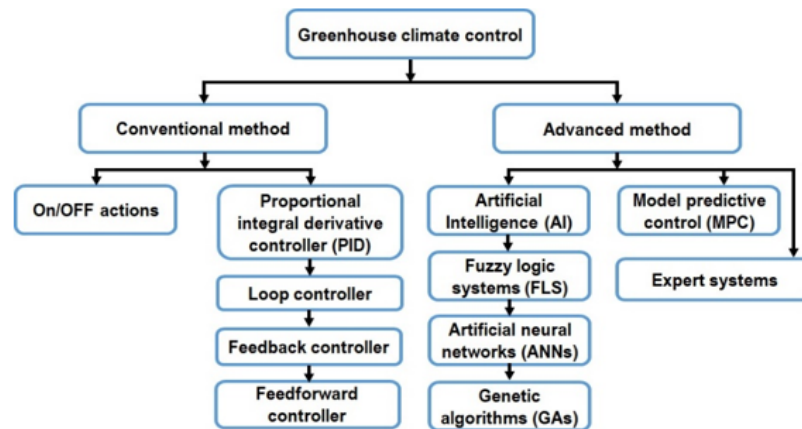


Fig. 1. Classification of greenhouse climate control theories (modified from Duarte-Galvan et al., 2012).

온실에 사용되는 제어 방법으로는 크게 펄스폭 변조(PWM) 제어, PID (Proportional Integral Derivation) 제어, 위상 제어, 인공지능(Fuzzy) 제어가 있다. 펄스폭변조(PWM)제어는 빠른 속도로 ON/OFF를 조절해 제어하는 방식으로 LED 밝기조절(dimming)이나 직류모터의 속도조절 등에 사용된다, 출력은 주기(duty)값에 비례 되는 전류를 얻을 수 있기 때문에 스위칭 파워 서플라이에서 이러한 방식을 주로 사용한다.

위상제어는 펄스폭변조(PWM)제어와 비슷하지만, 집안의 백열전구, 밝기 조정, 청소기, 전동 드릴 속도조절 등에 주로 사용되며 구동모터의 속도를 조절하는 방법이지만 교류전원일 때만 사용 가능하며 주파수가 낮아 노이즈를 발생시킨다. 인공지능(Fuzzy)제어는 내재된 비선형성으로 인해 선형 제어기에 비해 효과적인 제어가 가능하고, 많은 비선형 프로세서의 제어에 효과적으로 대처 가능하다. PID 제어와는 다르게 규칙기반 제어기 이므로 일부 규칙이 조정되어도 국부적으로 변경이 가능하나, 파라미터의 변화에 대해 기존의 제어방법보다 높은 성능을 보여준다(Kabir, 2022).

Park and Lee (2022)에 따르면 PID 제어는 원하는 목표 값과 현재 시스템 출력 값을 이용하여 오차를 만들어내고 이를 비례기, 적분기, 미분기를 이용하여 시스템의 입력으로 사용한다. 이러한 페루프 구성을 통해 목표 값과 피드백 신호만을 이용하여 원하는 시스템의 출력 최종치에 도달할 수 있다. PID 제어는 일부 매개변수를 이용하여 여러 시스템에서 적용이 가능하다는 장점이 있어서 현재까지도 많은 분야에서 사용되고 있다.

특히 시설원에 온실 내 제어는 센서의 수치가 목표 값 근사치에 도달했을 시 ON/OFF의 반복적인 행동을 취하게 된다. 하지만 PID 제어는 이를 방지 할 수 있기 때문에 제어방법 중 PID 제어를 사용했다.

PID 제어 시스템 개요

Fig. 2 은 PID 제어기를 이용한 피드백제어기를 나타내고 있으며 온도 제어의 경우 제어 대상에 주어지는 조작량은 열선의 전류 값에 제어 대상에서, 제어기에 피드백 되는 제어량은 센서로 측정된 시점의 온도에 대응한다.

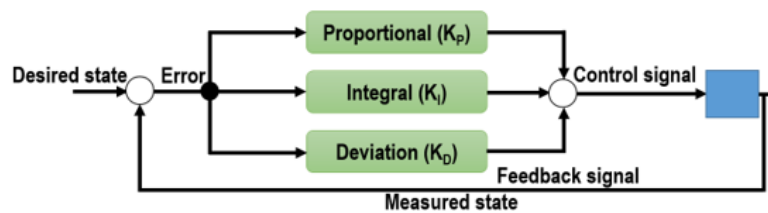


Fig. 2. Block diagram of a PID control (modified from Bansal, 2009).

Lim et al. (2023)은 PID 온도 제어는 비례-미분-적분 제어라고 하며, 응답성을 제어하는 비례동작과 진동을 제어 시키는 미분동작, 동작의 편차를 없애는 적분동작을 조합한 것으로 편차가 적고 적응성이 높은 응답을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다고 하였다.

PID 제어기는 P 동작, I 동작, D 동작을 조합해서 제어량이 목표 값에 빠른 속도로 응답하여 안정되도록 제어해야 한다. Fig. 3 에서는 제어 시 발생하는 오버슈트(over-shoot)와 헌팅(hunting)에 대해서 보여준다.

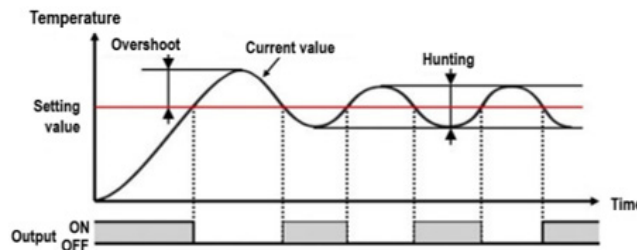


Fig. 3. Over-shoot and hunting of a PID controller (modified from Park and Lee, 2022).

P 동작 (Proportion)

편차, 즉 목표 값에서 제어량을 뺀 값에 비례하는 동작을 P 동작이라고 한다. P 동작의 조작량 M_p 는,

$$M_p = K_p \cdot e + M_\phi \tag{1}$$

$$M_p = \frac{100}{P_p} \cdot e + M_\phi \tag{2}$$

가 된다. 여기서 K_p 는 비례이득, P_p 는 비례대라고하며, P 동작의 강도를 나타낸다. e 는 편차, M_ϕ 는 편차가 정상적일 때의 조작량을 나타낸다.

비례대가 좁아지면 응답성은 좋아지지만 Fig. 3과 같이 오버슈트(제어량이 목표값을 넘어버리는 현상)와 헌팅(목표값에 대해 제어량이 변동하는 현상)의 원인이 되며, 넓어지면 오버슈트나 헌팅은 작아지나 응답성이 저하된다. 따라서 목적과 특성에 맞는 적당한 P_b 값을 정해야 한다.

I 동작 (Integral)

P 동작만으로 제어가 안정상태에 도달하면 제어량은 정상적인 편차를 가지게 된다. 이것을 오프셋이라고 하며, 편차를 시간으로 적분하여 이 오프셋을 없애는 동작을 I 동작 이라고 한다. I 동작의 조작량 M_i 는,

$$M_i = \frac{100}{P_p} \frac{1}{T_i} \int e dt \tag{3}$$

가 된다. 여기서 T_i 는 적분시간이다.

적분시간이 길면 P 동작에 의해 발생하는 오프셋의 제거에 시간이 걸린다. 하지만, 짧게 되면 I 동작에 의해 주기가 긴 헌팅을 일으키는 원인이 된다.

D 동작 (Differential)

D 동작의 조작량 M_d 는,

$$M_d = \frac{100}{P_p} T_d \frac{d_e}{dt} \tag{4}$$

가 된다. 여기서 T_d 는 미분시간이다. D 동작은 오버슈트를 상쇄시키는 기능을 한다.

제어 동작 간 차이점

따라서, 제어기의 입출력 관계식은 다음과같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{d_e}{dt}) \tag{5}$$

Where, μ = output, e = 오차, K_p = 비례이득, T_i = 적분시간, T_d = 미분시간.

정상상태오차는 모두 있지만 Fig. 4에서 알 수 있듯이 P 제어와 PD 제어를 비교하면 PD 제어의 오버슈트가 비교적 줄었음을 알 수 있다. PID 제어의 경우 오버슈트가 P 제어와 비슷하지만, 주기가 길어 졌음을 알 수 있다. 결과적으로, PID 제어기는 정상상태 오차가 없어졌다는 점에 있다.

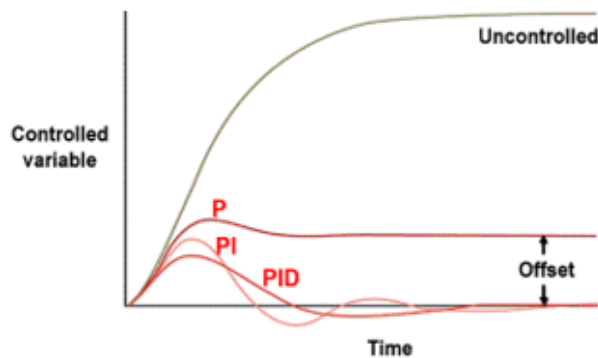


Fig. 4. Comparison between controllers (modified from <https://www.isa.org/>).

최적 계수 설정

PID 제어에서는 파라미터에 따라 제어 성능이 크게 변화 될 수 있다는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 시스템 운영자가 직접 여러 번의 테스트를 거쳐 최적의 PID 파라미터를 찾아야 한다는 번거로움 있다. 이를 해결하는 최적 계수 결정 방법 중에는 Ziegler와 Nichols에 의해 개발된 파라미터 자동 동조 방식이 현재까지 널리 사용되고 있으며, 대부분의 장비에서 제공하는 PID 자동 동조 방식은 Ziegler-Nichols Method (Ziegler and Nichols, 1993)를 따르고 있다. 이 방식은 개루프를 이용하여 원하는 계단응답에 따른 기울기와 지연시간 등을 활용하여 최적의 PID 제어 자동 동조 매개 변수를 선정해준다.

Ziegler & Nichols에 의해 제안된 법칙에 따르면, 비례 이득 K_p , 적분시간 T_i , 미분시간 T_d 는 스텝 응답의 낭비시간 L , 최대 기울기, 그리고 아래 식으로부터 얻어진다.

$$K_p = \frac{1.2}{RL} \quad T_i = 2L, \quad T_d = 0.5L \tag{6}$$

Ziegler & Nichols's의 스텝 응답법에서는 제어대상을 [낭비시간+1]로 근사한다. 또한, 디지털 제어의 경우에는 연산 처리에 걸리는 시간 또는 샘플링 주기를 제어대상 낭비시간의 일부로 간주하여 처리한다.

Ziegler & Nichols 법칙에 따라 최종 출력값은 각 파라미터 변수 K_p , K_i , K_d 값에 따라 크게 변화하며, 따라서 파라미터 크기에 따른 성능변화를 고려하여 PID 제어기의 매개변수는 적절한 값이 선정되어야 만 선정된 매개변수에 따라 사용자가 원하는 성능을 얻을 수 있다(Park and Lee, 2022).

온실의 PID 제어 적용

PID 제어는 환경 상태를 효과적으로 관리하고 조절하기 위해 온실에서 널리 사용되고 있다. 비례, 적분 및 미분 제어 동작을 사용하여 PID 컨트롤러는 온도, 습도 및 기타 중요한 매개 변수의 정확하고 안정적인 수준을 유지한다. 비례 구성 요소는 시스템이 설정 포인트와의 편차에 비례하여 반응하도록 하고, 적분 구성 요소는 시간에 따른 정상 상태 오류를 줄이는데 도움을 주며, 미분 구성 요소는 갑작스러운 변화를 예측하고 대응한다. 온실은 PID 제어를 통해 작물 성장을 최적화하고, 열 스트레스를 방지하며, 에너지 소비를 최소화하고, 성장 단계별로 작물에 유리한 환경을 조성하여 궁극적으로 생산성 향상과 작물 수확량 증대로 이어질 수 있다. Fig. 5는 일반적인 온실 환경 제어 시나리오를 보여준다.

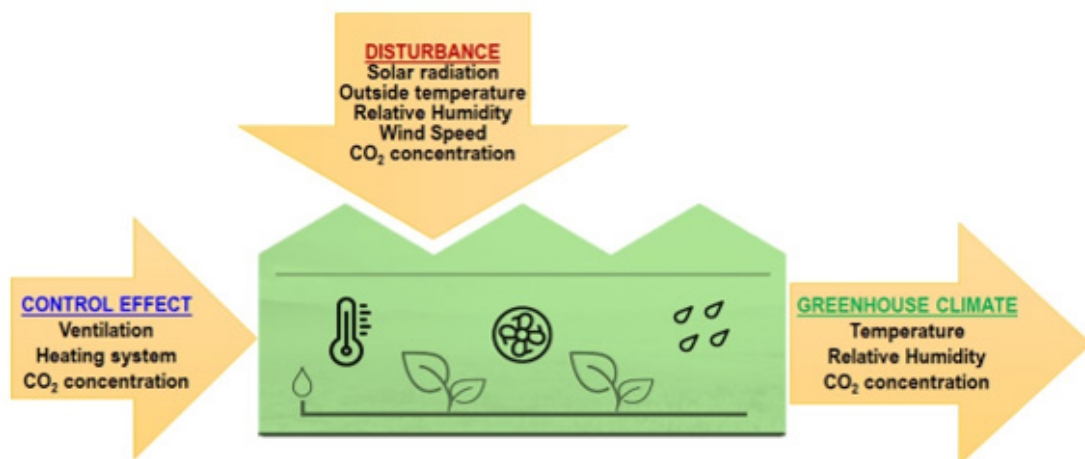


Fig. 5. Greenhouse climate control scenario (modified from El Ghomari et al., 2005).

온실의 온도 및 습도 제어

온실의 효과적인 온도 및 습도 제어는 최적의 작물 성장과 생산성을 보장하는 데 매우 중요하다. 비선형적이고 시간에 따라 변화하는 온실 환경의 문제를 해결하기 위해 지능형 알고리즘을 사용하는 기존 PID, 정량적 피드백 이론(QFT)에 기반한 강력한 컨트롤러, 퍼지 로직 및 PID 컨트롤러를 사용하는 피드백 피드포워드 시스템 등 다양한 제어 접근 방식이 제안되었다. 이러한 혁신적인 제어 방법은 급격한 환경 변화를 완화하고 시스템 응답을 안정화하며 제어 정밀도를 향상시켜 온실에서 작물 개발 및 생산을 개선하는 것을 목표로 한다. Wei (2022)는 단일 칩 마이크로컴퓨터를 사용하여 지능형 온실 온도 제어 시스템을 개발했다. 이 시스템은 PID 알고리즘을 활용하여 온실 온도를 원활하게 조정하고 자동 모니터링 및 제어를 가능하게 한다. 이 혁신적인 솔루션은 낮은 자동화 수준, 과도한 수작업, 작물 재배 환경의 제어 정밀도 저하와 같은 문제를 효과적으로 해결한다. 시뮬레이션과 실제 테스트를 통해 이 시스템은 온도 및 습도 제어 정확도가 10.8% 향상되었음을 입증했다. Heidari and Khodadadi (2017)는 소형 온실을 설계하고 퍼지 로직에 기반한 PID 컨트롤러와 자체 튜닝 PID 컨트롤러를 모두 사용하여 제어 시스템을 구현했다. 이들은 이러한 컨트롤러의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행했다. 이 연구는 온실 내 습도와 온도를 조절하는 데 중점을 두었다. 표준 PID 컨트롤러와 결과를 비교한 결과, 제안된 구조는 온실 환경을 개선하는 데 탁월한 성능을 보였다. 상승 및 안정화 시간을 줄이고 전체 오버슈트를 최소화함으로써 이를 달성했다. Wang et al. (2015)은 단일 뉴런 접근 방식을 사용하여 온실 환경 제어를 위한 적응형 PID 제어 방식을 제안했다. 이들은 제어기의 파라미터를 조정하기 위해 Hebb 학습 알고리즘을 활용했다. 이 방식은 뉴런의 적응성, 자기 조직화, 자가 학습 기능을 활용하므로 쉽게 구현할 수 있다. 연구진은 이 적응형 PID 제어 방식을 온실 환경 제어 문제에 성공적으로 적용하여 기존 PID 방식에 비해 우수한 페루프 성능을 입증했다.

Su et al. (2020)은 컨트롤러 신뢰성을 향상시키기 위해 파라미터 자체 튜닝 PID 제어 방식(STPID)을 도입했다. 이 방식은 내부 온도, 습도, CO₂ 농도 등 세 가지 환경 출력을 각각 별도의 PID 컨트롤러로 제어되는 네 가지 동등한 단위 출력으로 변환하는 방식이다. 원하는 제어 성능을 달성하기 위해 LM (Levenberg-Marquart) 알고리즘을 사용하여 PID 파라미터를 조정한다. Gurban and Andreescu (2014)는 온실 온도 및 습도를 디커플링으로 제어하기 위해 수정된 스미스 예측기를 사용하는 솔루션을 개발했다. 이 시스템의 성능은 견고성을 평가하기 위해 공칭 조건에서 50%의 변동으로 테스트되었다. 시뮬레이션 결과는 수정된 스미스 예측기와 유전 알고리즘으로 튜닝 된 PID 컨트롤러를 사용하여 온도 및 습도 루프의 제어 시스템 성능을 비교했다. 이 연구는 수정된 스미스 예측기가 온실 환경 제어 시스템을 위한 유망하고 효과적인 솔루션이라는 결론을 내렸다. Grados et al. (2020)은 이상적인 인공 미기후 시스템에 대한 종합적인 분석을 발표했다. 이 시스템은 외부 기상 조건과 독립적으로 작동하여 효율적이고 체계적인 제어를 지원한다. 이 시스템은 PID 유형 제어를 사용하여 온도 및 습도 조절을 자동화하므로 지속적인 모니터링이 필요하지 않다. 주요 목표는 다양한 환경에서 동식물의 번식을 극대화하는 인공 서식지를 조성하여 온도 관련 위협으로부터 동식물을 보호하는 것이다. 이 혁신적인 접근 방식은 극한의 온도를 견디지 못하는 종을 보호하고 지원하여 생물 다양성과 보존 노력을 촉진한다. Gao et al. (2018)은 온실의 비선형적이고 시간에 따라 변화하는 온도 제어 시스템으로 인해 발생하는 문제를 해결하는 데 중점을 둔다. 연구진은 복잡성을 극복하기 위해 기존 PID 제어와 지능형 알고리즘을 통합할 것을 제안했다. PID 제어의 원리와 특징을 분석한 후 칼만 필터링을 사용하여 제어 정밀도를 향상시키는 온실용 온도 PID 컨트롤러를 설계했다. MATLAB 시뮬레이션을 통해 구축된 온도 제어기 시스템의 빠른 응답과 효율적인 성능을 입증한다. 그 결과 제어 효율성이 크게 개선되어 온실 온도 조절을 위한 유망한 솔루션을 제시했다. Nunezz and Corzo (2019)는 자연 환기를 사용하는 온실에서 갑작스러운 환경 변화로 인한 피해를 연구했다. 이 문제를 해결하기 위해 그들은 데드 타임 시스템에 대한 스미스 예측기 구조를 갖춘 정량적 피드백 이론(QFT)에 기반한 강력한 컨트롤러 설계를 제안했다. 이 설계는 시스템 출력의 계인 마진, 위상 마진, 교란 제거를 고려하여 높은 안정성을 제공했다. 변화하는 조건에서 과도 응답과 오류를 고려하여 성능 지표를 기반으로 PID 컨트롤러와 비교했다. 그 결과 QFT 컨트롤러가 향상된 동적 응답과 제어 효과를 보여줌으로써 PID 컨트롤러보다 성능이 우수하다는 것을 입증했다. Ahmed et

al. (2020)는 온실 환경 제어 시스템의 선형화 및 디커플링을 위한 피드백-피드포워드 접근법을 도입했다. 이들은 환기, 냉각, 가습 작업에 중점을 두었다. 연구진은 피드백 피드포워드, 퍼지 로직, PID 컨트롤러를 포함한 컨트롤러를 결합하여 효과적이고 강력한 제어 시스템을 만들었다. 이 접근 방식을 적용하여 온실 내부 온도와 습도를 성공적으로 조절하여 최적의 작물 성장을 위한 향상된 환경 제어를 달성했다.

온실의 효과적인 온도 및 습도 제어는 최적의 작물 성장을 위해 매우 중요하다. 지능형 알고리즘을 사용한 PID 제어, QFT 기반의 강력한 컨트롤러, 퍼지 로직 및 PID 컨트롤러를 사용한 피드백 피드포워드 시스템 등 다양한 기술적 접근 방식을 통해 안정성과 정밀도를 향상시킬 수 있다. 이러한 발전은 작물 수확량 향상, 수작업 감소, 경제적 이익 증가로 이어져 지속 가능하고 효율적인 농업 방식을 지원한다.

온실의 조명 제어

빛은 온실 내 작물의 성장에 중요한 역할을 한다. 식물이 받는 빛의 양은 성장 속도와 활동 수명에 직접적인 영향을 준다. 빛의 에너지는 식물의 기본적인 대사 과정인 광합성에 사용된다(Darko et al., 2014). 빛이 식물 성장에 미치는 영향을 평가하려면 빛의 품질, 강도, 광기간(낮의 길이)이라는 세 가지 주요 측면을 고려해야 한다. 이 세 가지 빛의 특성은 모두 식량 작물의 성장과 발달에 큰 영향을 끼친다. 따라서 최적의 식량 생산을 위해서는 빛의 제어가 시급한 과제이다.

Contreras and Begovichan (2022)의 최근 연구에서는 실내 온실에서 자동 조명 제어 시스템을 설계하고 구현했다. 이 제어 시스템에는 "입자 군집 최적화"(PSO)라는 기술로 조정된 윈드업 방지 PID 컨트롤러가 사용되었다. 또한 직관적인 사용자 인터페이스가 개발되어 사용자가 조도 수준과 일조 적분(DLI)을 실시간으로 모니터링할 수 있다. 프로토타입 시스템은 온실 내에서 24시간 동안 연속적으로 작동했다. 조명 제어 기능은 매일 오전 6시에 활성화되고 오후 8시에 비활성화되었다. 이 일정을 통해 식물은 지정된 기간 동안 성장에 필요한 빛을 받을 수 있었다.

Mahdavian and Wattanapongsakorn (2013)은 온실 전기 조명 제어 시스템에서 PID 컨트롤러의 다중 목표 최적화에 대한 연구를 수행했다. 이들은 전력 에너지 시장을 조사하고 온실 조명을 위한 제어 시스템을 최적화했다. 스마트 그리드에서 실시간 가격 책정(RTP)을 고려하여 온실 애플리케이션에서 인공 조명 시스템의 성능을 향상시키는 PID 컨트롤러 계수를 성공적으로 결정했다. 설계 및 시뮬레이션 결과는 제어 시스템의 실행이 크게 개선되었음을 보여주었으며, 접근 방식의 효과를 입증했다. Mahdavian and Wattanapongsakorn (2014)은 온실 조명 제어 시스템에서 비례-적분-미분(PID) 컨트롤러를 최적화하는 데 초점을 맞춘 연구를 수행했다. 이들의 접근 방식에는 PID 컨트롤러의 계수를 조정하는 것이 포함되었다. 다양한 연구 및 엔지니어링 시나리오에서 다중 목표 최적화 방법을 사용하는 것은 연구자와 엔지니어들 사이에서 논의의 대상이 되어 왔다. 시뮬레이션 결과는 향상된 시스템을 위해 더 많은 수의 독립적인 목적 함수를 통합함으로써 출력 응답을 달성할 수 있음을 확인했다. 이 접근 방식은 온실 조명 제어 시스템의 성능을 개선하는 데 유망한 것으로 평가된다. Belkadi et al. (2019)은 온실을 위한 IoT 기반 조명 제어 시스템을 제안했다. 이들은 조명을 모니터링하고 제어함으로써 에너지 소비와 농산물 품질 측면에서 온실 효율성을 크게 향상시킬 수 있음을 입증했다. 센서 데이터를 기반으로 조명을 조절하는 PID 컨트롤러를 사용하여 위치에 따라 달라지는 평균 조도 수준을 달성했다. 그 결과 구역별로 에너지 소비량과 운영 시간을 12%, 기존 제어 방식에 비해서는 58%나 크게 줄일 수 있었다.

IoT 기반 솔루션 및 PID 컨트롤러와 같은 기술을 사용하여 온실에 조명 제어 시스템을 구현하면 기대할 만한 기술적 성과를 거둘 수 있다. 조명의 모니터링과 제어는 온실 효율성, 작물의 품질 및 전반적인 온실 성능을 향상시키는 것으로 입증되었다. 이러한 발전은 지속 가능하고 경제적으로 실행 가능한 온실 농업 방식을 위한 길을 열어준다.

온실의 공기 순환 및 환기 제어

공기 순환과 환기는 작물 성장에 도움이 되는 환경을 조성하고 유지하는 데 중요한 역할을 하므로 온실 관리에서 매우 중요한 요소이다. 적절한 공기 이동과 환기 제어는 작물의 건강과 생산성에 직접적인 영향을 미치는 온도, 습도, 이산화탄소의 최적 분포를 제공한다. 수많은 연구에서 온실 내부의 물리적 현상을 기반으로 한 모델을 사용하여 온실의 환기 제어 시스템을 개발했다(Han et al., 2019; Hong and Lee, 2014). 이와 유사하게 일부 연구자들은 날씨 및 관련 환경 데이터와 같은 외부 요인을 사용하여 환기 조정을 안내하는 유사한 접근 방식을 탐구했다(Francik and Kurpaska, 2020). 이러한 방법은 물리적 에너지 보존 또는 경험적 모델링에 기반한 제어 로직을 활용하여 온실 조건을 효과적으로 최적화한다.

Montoya-Ríos et al. (2020)은 외기 온도, 일사량, 풍속과 같은 외부 교란에 직면하여 성능을 향상시키기 위해 피드포워드 보정기와 결합된 PI(비례-적분) 컨트롤러를 포함하는 온실 환경 제어를 위한 제어 전략을 개발했다. 온실 프로세스 역학의 복잡성과 수학적으로 복잡한 물리적 비선형 모델을 해결하기 위해 연구진은 시스템 식별 방법론을 제안했다. 이 방법론을 통해 고차 다항식 및 저차 전달 함수와 같은 더 간단한 모델을 얻을 수 있었다. 이렇게 단순화된 모델을 사용하여 PI 컨트롤러 파라미터를 조정하고 피드포워드 보정기의 식을 도출하는 더 쉬운 절차를 수립했습니다. Hu et al. (2011)은 온실 환경 제어를 위한 MIMO 프로세스 컨트롤러에서 두 개의 PID 루프 튜닝을 조사했다. 이들은 진화 알고리즘(EA)과 정적-동적 사양 및 원활한 프로세스 제어를 포함한 여러 성능 측정을 사용했다. 그 결과 작은 오버슈트, 빠른 안정화 시간, 상승 시간 및 정상 상태 오차 감소로 우수한 제어 성능을 달성하는 데 있어 이 방법이 효과적임을 입증했다. 이렇게 얻은 이득을 PID 제어기에 적용하여 온실 환경 제어에 대한 접근 방식의 유용성과 실용성을 입증했다. Jung et al. (2020)은 딸기 생산에 사용되는 다중창 온실을 위한 새로운 환기 제어 로직을 소개했다. 이들은 15개의 입력이 있는 출력 피드백 신경망(OFNN) 예측 모델을 활용했으며, R^2 값이 0.94로 인상적인 정확도를 보여주었다. 또한, 연구진은 6가지 창문 열림 동작을 효과적으로 관리하기 위해 OFNN 알고리즘에 기반한 최적화 방법을 제안했다.

Chouchaine et al. (2011)은 병렬 분산 보상(PDC) 컨트롤러를 사용하여 복잡하고 비선형적인 시스템을 위한 제어 전략을 제안했다. 이 솔루션은 규칙이 많은 타카기-스게노 이산 시스템의 안정성 문제를 해결한다. PDC 컨트롤러는 안정성을 보장하기 위해 각 규칙에 고전적인 컨트롤러(예: PI, PID 또는 RST)를 극 배치 전략과 통합한다. 퍼지 컨트롤러는 다중 제어 접근 방식과 고전적 컨트롤러 성능을 결합하여 시간 가변 시스템에 적합한 강력한 비선형 제어를 수행한다. 이 방법은 환기율 변화를 통해 온도를 조절하기 위해 작은 온실에 적용되어 비선형적이고 복잡한 시스템을 제어하는 데 있어 이 접근법의 효율성을 입증했다. Susanto et al. (2018)는 회전식 픽처용 PID 컨트롤러가 포함된 PLC 기반 제어 시스템을 설계했다. 시스템의 안정성은 Routh-Hurwitz 기준과 나이퀴스트 플롯을 사용하여 분석했다. Premkumara and Manikandan (2018)은 브러시리스 DC 모터를 위해 ANFIS로 튜닝된 PID 컨트롤러의 안정성과 견고성을 조사했다. 이들은 모터의 관성, 자속, 저항을 50%에서 200%까지 변화시키며 견고성 분석을 수행했다. 또한 나이퀴스트 플롯을 사용하여 안정성 분석을 수행했다.

PID 제어 시스템은 온도, 습도 및 CO₂ 수준과 같은 환경 매개 변수를 지속적으로 모니터링하고 비례, 적분 및 파생 동작의 조합을 활용하여 이러한 변수를 원하는 설정 포인트 내에서 제어한다. PID 제어는 온실의 공기 순환 및 환기 제어를 위한 신뢰할 수 있고 기술적으로 견고한 접근 방식이다. 일관되고 제어된 환경을 유지하는 능력은 식물 성장을 위한 최상의 조건을 보장하고 궁극적으로 농업 생산성 향상과 지속 가능한 재배 방식에 기여한다.

온실 환경 제어에서 PID 제어의 이점과 한계

온실 환경 제어는 자연 조건을 모방한 이상적인 환경을 조성하여 작물의 성장과 생산성을 최적화하는 데 중추적인 역할을 한다. PID 제어는 온실 환경을 조절하기 위해 널리 채택된 제어 전략이다. PID 제어는 견고성, 구현 용이성, 실시간 조정 등 다양한 이점을 제공하기 때문에 온실 자동화에 널리 사용되고 있다. 그러나 다른 제어 방법과 마찬가지로 PID 제어에도 한계가 있다. 여기에서는 온실 환경 제어에서 PID 제어의 이점과 한계, 기술적 측면의 인사이트를 소개한다.

이점:

정확도: PID 컨트롤러는 온실 환경 변수를 제어할 때 높은 수준의 정확도를 달성하는 데 사용할 수 있다. 이를 통해 식물이 이상적인 조건에서 성장할 수 있도록 보장할 수 있다.

견고성: PID 컨트롤러는 비교적 견고하며 광범위한 온실 환경 변수를 제어하는 데 사용할 수 있다. 또한 소음과 방해 요인에 비교적 영향이 적다.

구현의 용이성: PID 컨트롤러는 비교적 구현하기 쉽고 다양한 온실 환경 제어 시스템과 함께 사용할 수 있다.

유연성: PID 컨트롤러는 온실의 특정 요구 사항을 충족하도록 사용자 지정할 수 있다.

한계:

복잡성: PID 컨트롤러는 튜닝이 복잡할 수 있으며 자격을 갖춘 엔지니어의 전문 지식이 필요할 수 있다.

비용: PID 컨트롤러는 특히 대형 온실의 경우 상대적으로 비용이 많이 들 수 있다.

모든 애플리케이션에 적합하지 않음: PID 컨트롤러는 모든 온실 환경 제어 애플리케이션에 적합하지 않을 수 있다.

위의 내용 외에도 온실 환경 제어에서 PID 제어를 위한 몇 가지 기술적 고려 사항은 다음과 같다:

온실 환경 변수의 측정과 액추에이터의 반응 사이의 시간 지연은 PID 컨트롤러를 튜닝할 때 고려해야 한다.

온실 환경 시스템의 비선형성도 PID 컨트롤러를 튜닝할 때 고려해야 한다.

태양 복사 또는 풍속의 변화와 같이 온실 환경 시스템에 영향을 줄 수 있는 장애 요인도 PID 컨트롤러를 튜닝할 때 고려해야 한다.

향후 동향 및 요약

최근 기술 발전으로 기존 PID 컨트롤러에 비해 더 효과적이고 비용 효율적인 것으로 입증된 스마트 PID 컨트롤러와 하이브리드 PID 컨트롤러가 도입되었다. 온실 환경 조절을 위한 PID 제어의 향후 트렌드는 농업 환경에서 정밀하고 효율적인 제어의 필요성에 의해 주도되고 있다. 이러한 트렌드에는 고급 제어 전략의 통합, 다변수 제어 접근 방식, 데이터 기반 및 머신 러닝 기술의 활용을 포함한다. 이러한 트렌드를 활용하면 PID 제어를 통해 작물 생산성을 높이고 자원 활용을 최적화하며 지속 가능한 온실 운영에 기여할 수 있다. 온실 환경 제어를 위한 PID 제어의 주요 동향:

고급 제어 전략: 온실 환경 제어를 위한 PID 제어의 향후 동향은 첨단 제어 방식의 융합을 포함한다. 기계 학습 및 신경망과 같은 다양한 제어 시스템 및 인공 지능 기반 접근 방식이 각광을 받고 있다.

다변수 제어: 온실 환경 제어에서 다변수 제어에 대한 선호도가 높아지고 있다. 개별 변수를 독립적으로 제어하는 대신 다양한 환경 변수 간의 상호 의존성과 상호 작용을 고려하는 방향으로 초점이 이동하고 있다.

실시간 모니터링 및 감지: 이러한 기술은 환경 변수, 작물 성장 및 시스템 성능에 대한 광범위한 데이터를 제공한다. PID 제어 시스템은 이 데이터를 활용하여 정보에 입각한 의사 결정을 내리고 제어 정확도를 개선하며 데이터 활용을 최적화할 수 있다.

IoT와 자동화의 통합: IoT 지원 장치와 센서는 실시간 데이터를 수집하고 전송하여 원격 모니터링 및 제어를 용이하게 한다.

에너지 최적화 및 지속 가능성: 에너지 최적화와 지속 가능성은 온실 환경 제어의 핵심 동향이다. PID 제어 알고리즘을 더욱 최적화하여 원하는 환경 조건을 유지하면서 에너지 소비를 최소화할 수 있다.

데이터 기반 및 기계 학습 접근법: 빅 데이터의 활용도 증가와 머신 러닝 기술 발전은 온실 환경 제어에 있어 PID 제어에 새로운 기회를 제공한다.

가상물리시스템(Cyber-Physical System): 센서, 액추에이터, 컨트롤러, 데이터 분석의 원활한 연동을 통해 온실 환경 제어를 최적화할 수 있다. 가상물리시스템과 통합된 PID 제어 시스템은 제어 정확도, 효율성 및 적응성을 향상시킬 수 있다.

요약하면, 온실 환경 제어를 위한 PID 제어의 향후 동향은 고급 제어 전략, 다변수 제어, 실시간 모니터링 및 감지, IoT 및 자동화, 에너지 최적화 및 지속 가능성, 데이터 기반 접근 방식, 가상물리시스템의 통합을 중심으로 전개될 것이다. 이러한 트렌드는 온실 운영의 제어 정확성, 적응성, 에너지 효율성 및 지속 가능성을 개선하는 것을 목표로 한다.

결론

PID 제어는 간단한 구조, 사용용이성, 뛰어난 성능으로 인해 온실 환경 제어를 위해 광범위하게 연구되고 활용되어 왔다. 이번 리뷰에서는 온실 내 온도, 습도 및 기타 환경 매개변수를 정밀하게 유지하는 데 있어 PID 제어의 중요성이 강조되었다. 이 분야에서 수행된 연구는 온실 환경의 복잡한 역학, 환경 변화가 작물 성장에 미치는 영향, 날씨 변동과 관련된 불확실성을 해결하는 데 중점을 두었다. PID 제어는 효과적인 것으로 입증되었지만 비선형 역학, 불확실성 및 튜닝 문제를 처리하는 데 어려움이 있는 등 한계가 확인되었다. 연구자들은 이러한 한계를 극복하기 위해 적응형 알고리즘, 퍼지 기반 PID 제어, 강인제어, 고급 튜닝 기법 등 다양한 방법을 제안했다. 이러한 발전은 온실 환경 제어에서 PID 제어의 정밀도와 견고성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

또한 이 리뷰에서는 온실 역학에 대한 정확한 모델링과 예측 제어 및 인공 지능 기반 접근 방식과 같은 다른 고급 제어 전략과 PID 제어의 통합이 중요하다는 점을 강조했다. 이러한 통합 접근 방식은 제어 성능, 에너지 효율성 및 작물 생산성을 개선하는 데 유망한 것으로 나타났다. PID 제어는 온실 환경 제어를 위해 여전히 인기 있고 효과적인 선택이다. 지속적인 연구 노력은 PID 제어와 관련된 한계와 과제를 해결하고 제어 정밀도와 효율성을 향상시키기 위한 혁신적인 접근 방식을 모색하는 데 중점을 두고 있다. 제어 기술과 모델링 방법론이 지속적으로 발전함에 따라 온실 환경 제어의 미래는 작물 생산, 자원 활용, 환경 지속 가능성을 최적화할 수 있는 큰 잠재력을 지니고 있다.

Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부(이하 농식품부)가 지원하는 ‘농식품 기술융합 창의인재양성사업’(사업번호: 320001-4)을 통해 농림식품기술기획평가원(이하 IPET)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ahmed M, Abdelhafidh M, Noureddine OC. 2014. Climate Control of Greenhouse Using Fuzzy Logic and PID Controllers. *International Journal of Electrical Energy*, 2(3): 232-237.
- Bansal HO. 2009. Tuning of PID Controllers Using Simulink. *International journal of Mathematical modeling, Simulation and Applications*, 2(3): 337-344.
- Belkadi A, Mezghani D, Mami A. 2019. IoT and lighting control for smart greenhouse. Zenodo. DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3813434>.
- Bennis N, Duplaix J, Enéa G, Haloua M, Youlal H. (2008). Greenhouse climate modelling and robust control. *Computers and electronics in agriculture*, 61(2): 96-107.
- Contreras C, Begovich O. 2022. Automatic Lighting Control and IoT Monitoring on an Indoor-Greenhouse. In *2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 1232-1237). IEEE.

- Choab N, Allouhi A, El Maakoul A, Kousksou T, Saadeddine S, Jamil A. 2019. Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191: 109-137.
- Chouchaine A, Feki E, Mami A. 2011. Stabilization using a discrete fuzzy PDC control with PID controllers and pole placement: application to an experimental greenhouse. *Journal of Control Science and Engineering*, 2011: 1-9.
- Darko E, Heydarizadeh P, Schoefs B, Sabzalian MR. 2014. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1640): 20130243.
- Duarte-Galvan C, Torres-Pacheco I, Guevara-Gonzalez RG, Romero-Troncoso RJ, Contreras-Medina LM, Rios-Alcaraz MA, Millan-Almaraz JR. 2012. Advantages and disadvantages of control theories applied in greenhouse climate control systems. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(4): 926-938.
- El Ghoumari MY, Tantau HJ, Serrano J. 2005. Non-linear constrained MPC: Real-time implementation of greenhouse air temperature control. *Computers and electronics in agriculture*, 49(3): 345-356.
- Endo A, Cartagena O, Ocaranza J, Sáez D, Muñoz C. 2022. Fuzzy and neural prediction intervals for robust control of a greenhouse. In 2022 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) (pp. 1-8). IEEE.
- Francik S, Kurpaska S. 2020. The use of artificial neural networks for forecasting of air temperature inside a heated foil tunnel. *Sensors*, 20(3): 652.
- Gao Z, He L, Yue X. 2018. Design of PID controller for greenhouse temperature based on Kalman. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Information Processing* (pp. 1-4).
- Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, Pretty J, Robinson S, Thomas SM, Toulmin C. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327(5967): 812-818.
- Grados J, Auccahuasi W, Rubiños S, Teran C, Rafael G, Enoky W. 2020. Prototype Of A PID Type Temperature And Humidity Control System Of An Artificial Habitat For Animals And Plants Of Different Climate. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(4): VOLUME 9, ISSUE 04, 392-394.
- Gurban EH, Andreescu GD. 2014. Comparison of modified Smith predictor and PID controller tuned by genetic algorithms for greenhouse climate control. In 2014 IEEE 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI) (pp. 79-83). IEEE.
- Han S, Li Y, Zhou B, Liu Z, Feng J, Xiao Y. 2019. An in-situ accelerated experimental testing method for drip irrigation emitter clogging with inferior water. *Agricultural Water Management*, 212: 136-154.
- Hong SW, Lee IB. 2014. Predictive model of micro-environment in a naturally ventilated greenhouse for a model-based control approach. *Journal of Bio-Environment Control*, 23(3): 181-191.
- Heidari M, Khodadadi H. 2017. Climate control of an agricultural greenhouse by using fuzzy logic self-tuning PID approach. In 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC) (pp. 1-6). IEEE.
- Hu H, Xu L, Wei R, Zhu B. 2011. Multi-objective control optimization for greenhouse environment using evolutionary algorithms. *Sensors*, 11(6): 5792-5807.

- Jung DH, Kim HJ, Kim JY, Lee TS, Park SH. 2020. Model predictive control via output feedback neural network for improved multi-window greenhouse ventilation control. *Sensors*, 20(6): 1756.
- Kabir MS, Islam S, Ali M, Chowdhury M, Chung SO, Noh DH. 2022. Environmental sensing and remote communication for smart farming: a review. *Precision Agriculture Science and Technology*, 4(2):81-90.
- Lim JW, Reza N, Chung SO, Lee KY, Lee SY, Lee KN, Lee B. 2023. Application of artificial neural network in smart protected horticulture: A review. *Precision Agriculture Science and Technology*, 5(1): 29:41.
- López-Cruz IL, Fitz-Rodríguez E, Salazar-Moreno R, Rojano-Aguilar A, Kacira M. 2018. Development and analysis of dynamical mathematical models of greenhouse climate: A review. *Eur. J. Hortic. Sci*, 83(5): 269-280.
- Lytos A, Lagkas T, Sarigiannidis P, Zervakis M, Livanos G. 2020. Towards smart farming: Systems, frameworks and exploitation of multiple sources. *Computer Networks*, 172: 107147.
- Mahdavian M, Wattanapongsakorn N. 2013. PID controller tuning and optimizing for greenhouse lighting application considering real-time pricing in the smart grid. In *International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)* (pp. 85-90). IEEE.
- Mahdavian M, Wattanapongsakorn N. 2014. Optimizing PID controller tuning for greenhouse lighting control system by varying number of objectives. In *11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mohamed S, Hameed IA. 2018. A GA-based adaptive neuro-fuzzy controller for greenhouse climate control system. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2): 773-779.
- Montoya-Ríos AP, García-Mañas F, Guzmán JL, Rodríguez F. 2020. Simple tuning rules for feedforward compensators applied to greenhouse daytime temperature control using natural ventilation. *Agronomy*, 10(9): 1327.
- Nuñez RRA, Corzo RCL. 2019. Real-time QFT Control for Temperature in Greenhouses. *Maskay*, 9(2): 58-62.
- Park YS, Lee DJ. 2022. Optimal PID Control for Temperature Control of Chiller Equipment. *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 45.3 (2022): 131-138. [in Korean]
- Postolache O, Pereira JM, Girão PS, Monteiro AA. 2012. Greenhouse environment: Air and water monitoring. *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring*, 81-102.
- Premkumar K, Manikandan BV. 2018. Stability and performance analysis of ANFIS tuned PID based speed controller for brushless DC motor. *Current Signal Transduction Therapy*, 13(1): 19-30.
- Sagheer A, Mohammed M, Riad K, Alhajhoj M. 2020. A cloud-based IoT platform for precision control of soilless greenhouse cultivation. *Sensors*, 21(1): 223.
- Sciarretta A, De Nunzio G, Ojeda LL. 2015. Optimal ecodriving control: Energy-efficient driving of road vehicles as an optimal control problem. *IEEE control systems magazine*, 35(5): 71-90.
- Shi P, Luan X, Liu F, Karimi HR. 2012. Kalman filtering on greenhouse climate control. In *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference* (pp. 779-784). IEEE.

- Su Y, Yu Q, Zeng L. 2020. Parameter self-tuning PID control for greenhouse climate control problem. *IEEE Access*, 8: 186157-186171.
- Su Y, Xu L, Goodman ED. 2017. Greenhouse climate fuzzy adaptive control considering energy saving. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15: 1936-1948.
- Susanto A, Sampurno S, Suhardjono S. 2019. Design of PLC Based Control System for Rotary Flexible Fixture with PID Compensator. *IPTEK The Journal of Engineering*, 4(3): 26-32.
- Wang W, Xu L, & Hu, H. (2015). Neuron adaptive PID control for greenhouse environment. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32(5), 291-297.
- Wei X. 2022. Intelligent Temperature Control System of Greenhouse Based on STM32 Single Chip Microcomputer. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2254 (1), p. 012046). IOP Publishing.
- Wu Y, Li L, Li S, Wang H, Zhang M, Sun H, Sygrimis N, Li M. 2019. Optimal control algorithm of fertigation system in greenhouse based on EC model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3): 118-125.
- Zeng S, Hu H, Xu L, Li, G. 2012. Nonlinear adaptive PID control for greenhouse environment based on RBF network. *Sensors*, 12(5): 5328-5348.
- Ziegler JG, Nichols NB. 1993. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*. 115(2B): 220-222.