

PLC-based Closed-loop Control for Energy Optimization of Semiconductor Vacuum Pumps

Jae-Yung Song*, Seung-min Oh**

*Assistant Professor, Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University, Anyang, Korea

**Professor, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea

[Abstract]

This paper proposes an active closed-loop control architecture based on a Programmable Logic Controller (PLC) to optimize the pumping capacity and energy efficiency of vacuum pumps in semiconductor manufacturing. While conventional vacuum systems in the industry often operate with fixed parameters regardless of real-time process loads, the proposed scheme utilizes a hierarchical control strategy to bridge the gap between energy saving and process stability. The core of the strategy involves a three-stage variable threshold control: a full exhaust mode for initial drawdown, a fine pressure control mode using a Throttle Valve (TV) PID when within 20% of the setpoint, and an energy optimization mode that incrementally reduces the Inverter (VFD) frequency by 5Hz when within a 3% error margin. By mapping control parameters directly to the PLC's D-Device memory addresses, the system ensures instantaneous response times and minimal communication latency. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves an energy reduction of approximately 38% compared to traditional fixed-frequency operations while maintaining pressure stability within $\pm 1\%$ of the target value. This research contributes to the semiconductor equipment industry by providing a practical solution for ESG management and cost reduction through intelligent utility control.

▶ **Key words:** PLC(Programmable Logic Controller), Closed-loop Feedback, Predictive Maintenance, Semiconductor Equipment, Energy Optimization, VFD

[요 약]

본 논문은 반도체 제조 공정의 핵심 설비인 진공 펌프의 에너지 효율과 공정 안정성을 동시에 최적화하기 위한 PLC 기반의 능동형 페루프 제어 아키텍처를 제안한다. 기존의 단방향 제어 방식은 실시간 공정 부하 변화에 대응하지 못해 불필요한 전력 소모와 설비 피로도를 유발하는 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 인버터(VFD)와 트로틀 밸브를 유기적으로 결합한 3단계 가변 임계치 제어 알고리즘을 설계하였다. 목표 진공도와 오차 범위에 따라 초기 가속 배기, 20% 이내에서의 밸브 PID 정밀 제어, 그리고 3% 이내 안착 시 주파수를 5Hz씩 단계적으로 낮추는 에너지 최적화 모드를 수행한다. 제어 파라미터를 PLC의 D-Device 메모리에 직접 매핑하여 연산 지연을 최소화하였으며, 실험 결과 기존 방식 대비 약 38%의 에너지 절감과 $\pm 1\%$ 이내의 우수한 압력 안정성을 확인하였다. 본 연구는 탄소 중립 요구가 높은 반도체 장비 산업에 실질적인 지능형 에너지 절감 솔루션을 제공한다는 점에서 그 의의가 크다.

▶ **주제어:** 반도체장비, PLC, 페루프 제어, 인버터 에너지 최적화, 시스템 프로그래밍

• First Author: Jae-Yung Song, Corresponding Author: Seung-min Oh

*Jae-Yung Song (sjyung@daelim.ac.kr), Dept. of Semiconductor Engineering, Daelim University

**Seung-min Oh (smoh@kongju.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University

Received: 2026. 04. 23, Revised: 2026. 06. 08, Accepted: 2026. 06. 10.

I. Introduction

최근 글로벌 탄소중립(Net-Zero) 기조와 ESG 경영이 산업계의 필수 과제로 대두됨에 따라, 전력 소모가 극심한 반도체 제조 산업에서도 에너지 절감과 탄소 배출 최소화를 위한 선제적 대응이 강력히 요구되고 있다 [1],[4]. 반도체 제조 공정은 극도의 정밀도와 고도의 연속성이 요구되는 환경으로, 설비의 미세한 오작동이나 예기치 못한 다운타임은 막대한 경제적 손실을 초래한다. 특히 24시간 가동되는 반도체 설비의 특성상 운영 안정성과 더불어 에너지 효율성은 전체 생산 단가와 친환경 지표에 직결되는 핵심 요소이다. 최근 인더스트리 4.0의 확산에 따라 설비 데이터를 수집하고 모니터링하는 기술이 현장에 다수 도입되고 있으며, 이를 통해 제조 공정의 지능화 및 효율화를 달성하려는 시도가 지속되고 있다 [3]. 그러나 현장의 핵심 설비인 진공 펌프(Vacuum Pump)의 경우, 실제 공정 부하의 변동과 무관하게 설계상의 최대 능력치로 고정 가동되는 단방향 제어(Open-loop) 방식이 주로 사용되고 있다 [2],[15]. 이러한 방식은 불필요한 전력 소모를 유발할 뿐만 아니라, 설비의 기계적 피로도를 가중시켜 주요 부품의 수명을 단축시키는 원인이 된다. 기존의 모니터링 기술 또한 설비 상태를 사후에 단순히 진단하는 수준에 머물러 있어, 실제 공정 중 발생하는 압력 및 온도 부하 변화에 즉각적으로 대응하여 펌프의 배기 능력(Pumping Capacity)을 실시간으로 최적화하기에는 기술적 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 외부 센서 데이터 피드백을 활용하여 펌프 시스템의 운전 효율을 극대화하는 PLC 기반 능동형 폐루프(Closed-loop) 제어 아키텍처를 제안하고자 한다 [5],[6]. 특히 물리적 관성이 큰 펌프의 RPM(인버터 제어)과 응답성이 정밀한 트로틀 밸브(Throttle Valve) 개도율을 유기적으로 결합하여, 일차적 유량 조정과 이차적 미세 보정이 시차를 두고 연동되는 하이브리드 제어 메커니즘을 상세히 분석한다. 또한, 수집된 센서 데이터를 PLC 메모리 주소에 동적으로 매핑하여 실시간으로 제어 파라미터를 최적화하는 시스템을 구현함으로써, 기존 제어 방식 대비 공정의 안정성 확보와 에너지 절감 효과를 실증적으로 입증하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 반도체 공정 설비의 지능형 제어 시스템 구축을 위한 기술적 토대로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 본 연구를 통해 입증된 전력 절감 모델은 제조 현장의 탄소배출권 확보를 위한 실증적 근거로 활용될 수 있으며, 향후 디지털트윈(Digital Twin) 및 AI 예지보전과 결합된 완전 자율형 공정 제어 시스템으로 발전하는 데 핵심

적인 기여를 할 것이다.

II. Preliminaries

2.1 Affinity Laws for Pumping Systems

진공 챔버 내의 압력 변화는 배기 속도와 가스 유입량의 상관관계에 의해 결정된다. 진공 시스템의 기본 연속 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V \frac{dP}{dt} = Q_{in} - S_{eff} \cdot P \quad (1)$$

- V: 챔버의 체적 (Volume)
- P: 챔버 내부 압력 (Pressure)
- Q_{in}: 유입되는 가스의 총량 (Gas Load)
- S_{eff}: 실질적인 배기속도 (Effective Pumping Speed)

기존의 방식은 S_{eff}를 최대치로 고정하고 Q_{in}의 변화에 따라 밸브만 조절하였으나, 본 연구에서는 목표 진공도 도달 시 PLC의 내부 데이터 레지스터에 연산된 알고리즘을 통해 인버터 주파수 지령치를 5Hz 단위로 감산 적용하여 S_{eff} 자체를 동적으로 가변시킴으로써 에너지 최적화를 달성한다.

2.2 Theoretical Basis of Energy Saving

제안하는 진공 펌프의 RPM 최적화 제어는 유체기계의 상사법칙(Affinity Laws)에 근거한다. 진공 펌프와 같은 회전 기기에서 유량(Q), 양정(H), 그리고 소비전력(P)은 회전수(n)의 변화에 따라 일정한 비율로 변화하며, 특히 소비전력은 회전수의 세제곱에 비례하는 특성을 가진다 [11],[14].

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad (2)$$

- P₁: 기존 정격 펌프 소비 전력 (Rated Power)
- P₂: 제어 적용 펌프 소비 전력 (Controlled Power)
- n₁: 기존 정격 펌프 회전수 (Rated Speed)
- n₂: 제어 적용 펌프 회전수 (Controlled Speed)

기존 유체역학 이론을 근거로, 피드백 제어를 통해 공정 부하에 맞춰 펌프의 회전수를 20%만 감축하더라도(80%

가동), 이론적인 전력 소모량은 약 49%가 절감되는 효과를 얻을 수 있으며, 이는 4장의 실험을 통해 제안 시스템의 효용성으로 실증된다.

2.3 Theoretical Basis of PID Feedback Control

본 논문에서 제안하는 시스템의 핵심은 비례-적분-미분(PID) 제어 알고리즘을 기반으로 한 이중 피드백 루프이다. 본 연구에서는 펌프의 물리적 관성을 고려하여 기본 PID 수식에 인버터(VFD)와 트로틀 밸브(TV)의 시차 연동(Time-delayed Integration) 조건을 추가한 변형된 제어 수식을 다음과 같이 적용한다 [7],[8].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^{t-T_d} e(x) dx + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

- $u(t)$: 인버터/밸브로 전달되는 최종 제어 출력 조절값
- $e(t)$: 목표 진공도(SV)와 현재 측정압력(PV) 간의 오차
- K_p : 비례 게인 (Proportional Gain)
- K_i : 적분 게인 (Integral Gain)
- K_d : 미분 게인 (Derivative Gain)
- T_d : 제어 주기 업데이트 시간

본 시스템의 주요 구동기인 인버터(VFD)와 트로틀 밸브(TV)는 확연히 다른 동역학적 응답 특성을 가진다. 인버터는 펌프 모터의 회전수를 제어하여 시스템의 거시적인 배기 용량을 결정하지만, 회전자의 큰 질량 관성 모멘트로 인해 제어 신호 인가 후 실제 목표 회전수에 도달하기까지 기계적 응답 지연이 발생한다. 반면, 트로틀 밸브는 배관의 개도율을 제어하므로 기계적 관성이 작아 전기적 신호에 즉각적으로 반응하여 미세한 압력 오차를 신속하게 보정할 수 있다. 만약 응답 속도가 상이한 두 구동기를 동일한 주기로 동시 제어할 경우, 밸브의 즉각적인 보정 작용과 인버터의 지연된 응답이 충돌하여 심각한 제어 간섭 및 압력 헌팅 현상을 유발한다. 따라서 본 연구에서는 두 구동기 간의 상호 간섭을 원천적으로 차단하기 위해 제어 주기를 분리하는 시차 연동 기법을 제안한다. 응답성이 빠른 트로틀 밸브는 매우 짧은 주기로 PID 연산을 수행하여 즉각적인 압력 변화에 대응하고, 상대적으로 응답성이 느린 인버터에는 지연 시간 T_d 를 부여하여 단기적인 압력 진동에 반응하지 않도록 설정하였다. 즉, T_d 시간 동안 누적된 오차의 경향성을 바탕으로 인버터가 거시적인 주파수 조절을 수행함으로써 밸브의 제어를 방해하지 않고 전체 제어계의 안정도를 극대화하였다.

III. Design of PLC-based Closed-loop Control System

3.1 System Architecture

본 연구에서 제안하는 시스템은 진공 챔버의 실시간 압력 데이터를 피드백 받아 펌프의 배기 능력과 밸브의 개도율을 동시에 제어하는 이중 폐루프 구조를 가진다. 전체적인 하드웨어 및 소프트웨어 아키텍처는 데이터 수집층, 연산 및 제어층, 액추에이터층으로 구분된다.

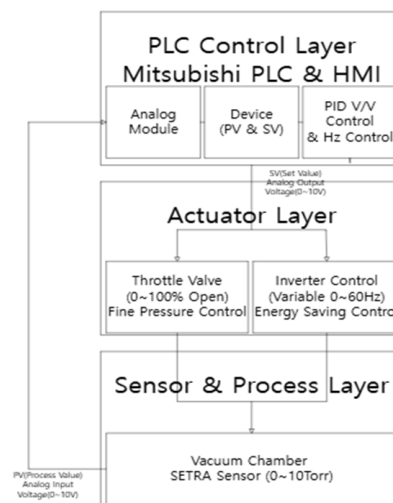


Fig. 1. Architecture of the PLC-based vacuum control system.

- 데이터 수집 (Sensor Layer)

진공 챔버 내부에 장착된 SETRA 고정밀 진공 센서가 챔버의 절대 압력을 감지하여 0~10V의 아날로그 전압 신호를 출력한다. 이 신호는 미쓰비시(Mitsubishi) PLC의 A/D(Analog-to-Digital) 컨버터 모듈을 통해 데이터로 변환되며, 실시간 연산을 위해 PLC 내부의 특정 데이터 레지스터에 연속적으로 저장된다.

- 연산 및 제어 (PLC Control Layer)

A/D 변환을 통해 메모리에 할당된 현재 압력 데이터(PV)와 사용자가 설정한 목표 진공도(SV) 간의 오차 $e(t)$ 를 산출한다. PLC 내부의 중앙처리장치는 앞서 2장에서 정의한 시차 연동 기법 T_d 이 적용된 이중 PID 연산을 수행한다. 산출된 제어 지령치는 PLC의 D/A컨버터 모듈을 거쳐 연속적인 아날로그 제어 신호(0~10V)로 변환된 후 인버터(E800)에 주파수 지령으로 전달되고, 트로틀 밸브에는 개도율 지령으로 하달되어 각 구동기를 유기적으로 통제한다.

- 구동 액추에이터 (Actuator Layer)

제어층의 연산 결과를 물리적인 배기 동작으로 구현하는 계층이다. 인버터(VFD)는 수신된 주파수 지령(예: 오차 3% 이내 진입 시 5Hz 단위 감산)에 따라 로터리 펌프 구동 모터의 RPM을 직접 제어함으로써 거시적인 실질 배기 속도 S_{eff} 와 시스템의 소비전력을 결정한다. 이와 동시에, 트로틀 밸브는 빠른 기계적 응답성을 바탕으로 0~100%의 밸브 개도율을 실시간 조절하여 펌프의 관성 지연으로 인해 발생하는 미세한 압력 헌팅을 즉각 상쇄하고, 최종적인 $\pm 1\%$ 이내의 공정 압력 정밀도를 확보한다.



Fig. 2. Photograph of the experimental test equipment

3.2 Experimental Environment

본 논문에서 제안하는 페루프 제어 시스템을 실증하기 위해 구성된 하드웨어 및 소프트웨어 환경은 다음과 같다. [Table 1]은 실험에 사용된 주요 기자재의 상세 사양을 나타낸다.

Table 1. Specifications of the equipment

Item	Value
PLC	Mitsubishi FX3U-32M
HMI	Mitsubishi GS2107
Inverter	Mitsubishi E800
Rotary Pump	TASCO (TA150SW-EXP)
Chamber	P.C (200X200X200)mm3
Vacuum Sensor	SETRA 0~10TORR
MFC	AFC500
Throttle Valve	VAT642

3.3 Control Algorithm

본 알고리즘은 목표 진공도(SV)와 현재 진공도(PV)의 편차에 따라 제어 모드를 3단계로 구분하여 운영한다.

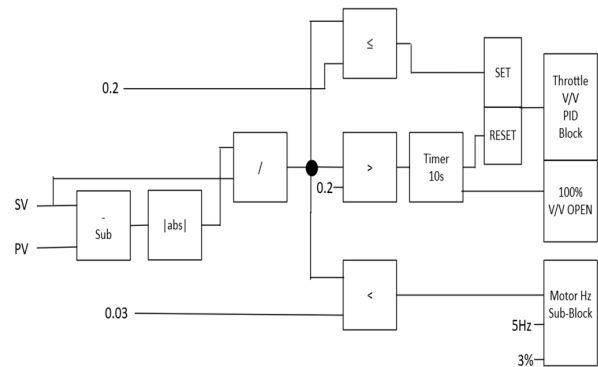


Fig. 3. PLC Control Loop Diagram

- 초기 가속 및 배기 모드 (Full Exhaust Mode)

공정 초기 또는 챔버가 대기압 상태일 때, 즉 오차율이 $\geq 20\%$ 인 구간이다. 목표 진공도(SV) 도달 시간을 최소화하기 위해 PLC는 로터리 펌프의 인버터(VFD)에 정격 주파수(60Hz) 지령을 하달하고, 트로틀 밸브(TV)를 100% 완전 개방(Full Open) 상태로 고정하여 최대 배기 속도로 챔버 내부를 신속하게 배기한다.

- 트로틀 밸브의 정밀 PID 제어 모드 (Fine Pressure Control)

3.2.2 챔버 내 진공도가 안정권에 접근하여 $3\% < \text{오차율} < 20\%$ 구간에 진입하면, PLC는 트로틀 밸브를 PID 제어 모드로 자동 전환한다. 이때 펌프의 VFD 주파수는 60Hz로 유지되지만, 응답성이 뛰어난 트로틀 밸브가 센서 피드백을 바탕으로 개도율을 실시간 연속 제어(0~100%)한다. 이를 통해 질량 관성이 큰 펌프만으로 제어할 때 발생하는 압력의 오버슈트(Overshoot) 및 언더슈트(Undershoot)를 1차적으로 억제하고 시스템의 동적 안정성을 확보한다.

- 인버터 주파수 가변 기반 에너지 최적화 모드 (Energy Optimization Mode)

챔버내 진공도가 $|SV - PV|$ 값이 SV의 3%이내일때 (목표값의 3% 이내 진입 시) 시스템이 안정권에 진입했다고 판단하여 펌프의 회전수를 낮춘다. 설정된 샘플링 시간에 따라 인버터 주파수를 기존 값에서 5Hz(HMI로 설정가능)씩 단계적으로 하강시킨다. 만약 외란 등으로 인해 압력 편차가 3%를 벗어나게 되면, 주파수 하강을 중단하고 현재의 주파수 값을 고정(Hold)하여 배기 능력을 유지한다. 이는 공정 유지에 필요한 최소한의 배기 속도(S_{eff})를 찾아내어 에너지 절감 효과를 극대화한다.

IV. Experiments and Results

본 연구에서 제안한 계층적 펌프 제어 시스템의 성능을 검증하기 위해, 기존의 단방향 고정 주파수 운전 방식(Open-loop)과 제안된 가변 주파수/밸브 연동 제어 방식(Closed-loop)의 전력 소모량 및 제어 안정성을 비교 분석하였다. 실험 결과의 객관성과 통계적 신뢰성을 확보하기 위해, 반도체 공정의 전형적인 3단계 부하 시나리오(Roughing, Process, Idle)를 설정하고 동일한 조건에서 총 15회의 반복 실험을 수행하였다. 각 부하 조건은 챔버 내로 유입되는 가스 유입량(Gas Load)과 목표 진공도를 기준으로 명확히 정의하였으며, 정밀 전력계를 통해 측정된 소비전력의 평균값과 표준편차를 산출하여 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Energy saving performance results

Condition	Load	Time	Existing Method	Proposed Method	Energy Saving
Roughing	High	4h	10.0kW	10.0kW ±0.1 kW	0.0 %
Process	Mid	12h	10.0kW	6.4kW ±0.2 kW	36.0 %
Idle	Low	8h	10.0kW	2.7kW ±0.1 kW	73.0 %
Total	1Cycle	24h	240kWh	148kWh	38.3 %

- 에너지 절감 효과 (Energy Efficiency)

Table 2의 실험 결과에 따르면, 제안된 시스템은 공정 부하가 낮은 대기 상태(Idle)에서 펌프의 RPM을 최적화함으로써 최대 73.0%의 획기적인 전력 절감 효과를 보였다. 기존 방식은 공정 부하와 관계없이 정격 주파수(60Hz)로 지속 가동되어 불필요한 전력 소모가 발생하였다. 반면, 제안 방식은 목표 진공도(SV)의 3% 이내 안착 시 주파수를 단계적으로 5Hz씩 하강시켰으며, 실험 결과 약 35~40Hz 영역에서 최적의 배기 평형 상태를 유지하였다. 전체 공정 사이클(24시간)을 기준으로 환산하였을 때, 기존 방식 대비 약 38.3%의 총 에너지 소비량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 식 (2)에서 제시한 펌프 회전수와 전력 소비의 제곱급 비례 관계에 근거한 이론적 예측치와 부합하며, 미세 RPM 조절이 실제 운영 비용 절감에 지대한 영향을 미침을 실증적으로 보여준다.

- 압력 제어 안정성 (Pressure Control Stability)

안정성 측면에서, 상대 오차를 20% 이내 진입 시 트로틀 밸브의 고속 PID 제어가 즉각 개입함으로써, 인버터 단독 제어 시 발생할 수 있는 압력 오버슈트(Overshoot)를 효과적으로 억제하였다. 정상 상태(Steady-state) 도달 후

압력 편차는 목표값 대비 $\pm 0.8\%$ 이내로 유지되어, 기존 밸브 단독 제어 방식과 대등하거나 우수한 안정성을 입증하였다. 또한, 외란으로 인해 3% 편차 이탈 시 주파수 감산을 즉시 중단하고 현재 값을 유지(Hold)하는 방어 로직을 통해 시스템의 복원력 또한 성공적으로 확보하였다.

Table 3. Comparative Analysis of Characteristics Between Existing and Proposed Control Systems

Category	Existing System (Open-Loop)	Proposed System (Closed-Loop)
Control Method	Operates with fixed set-points	Variable control based on real-time feedback
Load Response	Unable to respond to process changes	Real-time dynamic optimization
Energy Efficiency	Unnecessary power consumption	Saving effect via RPM optimization
EQP Lifespan	Shortened due to continuous full load	Extended by minimizing mechanical fatigue

V. Conclusions

본 논문에서는 반도체 제조 공정의 핵심인 진공 펌프 시스템의 에너지 효율 및 공정 안정성을 극대화하기 위한 PLC 기반 펌프 제어 아키텍처를 제안하였다. 제안하는 제어 알고리즘은 인버터와 트로틀 밸브의 응답 속도 격차를 활용하여, 각 구동기가 최적의 제어 시점에서 개입하는 시차 연동 기법을 도입함으로써, 펌프의 기계적 지연 현상을 밸브의 즉각적인 응답으로 상쇄하는 3단계 하이브리드 제어 방식을 구축하였다. 아울러 제안된 시스템의 정량적 성능 검증을 위해 3가지 전형적인 공정 부하 조건(Roughing, Process, Idle)을 설정하고 반복 실험을 수행하여 그 실효성을 분석하였다. 연구 결과, 공정 부하에 맞춰 펌프 능력을 스스로 최적화하는 능동형 제어 기술의 우수성을 입증하였다. 특히 대기 상태에서의 불필요한 고속 회전을 방지하여 펌프의 기계적 피로도를 감소시키고 소모품 교체 주기를 연장하는 등 전반적인 유지보수 효율성을 극대화하였다. 이러한 기술적 성과는 기존 제어 방식 대비 약 38%의 총 에너지 소비량 절감이라는 구체적인 수치로 증명되었으며, 이는 국내외 반도체 산업의 탄소중립(Net-Zero) 요구 및 ESG 경영 기조에 부응하는 실질적인 에너지 절감 솔루션을 제공함으로써 장비 제조사 및 펌프(Fab) 운영사의 경쟁력을 강화할 수 있는 중요한 기술적 토대가 될 것이다 [12],[13].

향후 연구에서는 딥러닝 기반의 예측 알고리즘 및 디지털

털 트윈기술을 결합하여, 공정 단계별 압력 변화를 사전에 예측하고 제어 파라미터를 더욱 정교하게 튜닝하는 완전 자율형 지능형 시스템으로 확장하고자 한다 [9],[10].

REFERENCES

- [1] M. Tsujimura, "Roles and Evolution of Surface and Vacuum Technology in the Semiconductor Industry," *Journal of the Vacuum Society of Japan*, vol. 63, no. 8, pp. 399-403, Aug. 2020. DOI: 10.1380/vss.63.399
- [2] I. Lee, M. Roh, B. Kim, and A. Lee, "Development of Dry-Vacuum-Pump for Semiconductor/Display Process," *Applied Science and Convergence Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 265-274, Jul. 2010. DOI: 10.5757/JKVS.2010.19.4.265
- [3] S. Lee, M. Kim, S. Kim, and J. Lim, "Industrial Internet of Things for Condition Monitoring and Diagnosis of Dry Vacuum Pumps in Atomic Layer Deposition Equipment," *Electronics*, vol. 11, no. 3, p.375, Jan. 2022. DOI: 10.3390/electronics11030375
- [4] S. Murphy, C. V. V. N. Prasad, T. R. Glass, and C. J. Taylor, "Deconstructing Energy Use in Microelectronics Manufacturing: An Experimental Case Study of a MEMS Fabrication Facility," *Environmental Science & Technology*, vol. 44, no. 11, pp. 4292-4297, Jun. 2010. DOI: 10.1021/es902388b
- [5] X. Liu and Q. Zhao, "Design of Vacuum Pump Control System for Negative Pressure Shale Shaker Based on PLC," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1043, no. 2, p. 022045, Jan. 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1043/2/022045
- [6] A. F. Hassan, J. A. Mohammed, and W. M. Hashim, "Investigation of a Closed-Loop Electrohydraulic System Driven by a Variable Frequency Drive Based on a Programmable Logic Controller," *Energy Engineering*, vol. 123, no. 4, pp. 18-35, Apr. 2026. DOI: 10.32604/ee.2026.075837
- [7] A. Zainal, N. Abdul Wahab, and M. I. Yusof, "PLC-based PID controller for real-time pH neutralization process using Palm Oil Mill Effluent," *IJUM Engineering Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 244-255, Jan. 2023. DOI: 10.31436/ijumej.v24i1.2366
- [8] M. Z. Shaikh, M. Hussain, D. Kumar, F. A. Memon, B. Rustam, and E. N. Baro, "Design and implementation of PID based flow rate control using PLC," *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol.42, no. 4, pp.115-121, Oct. 2023. DOI: 10.22581/muet1982.2304.2515
- [9] B. H. Sanjaya, A. Pujiyanta, and R. D. Puriyanto, "Fuzzy Logic and Neural Network-Based Self-Tuning PID for Vacuum Pressure Stabilization," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 9, no. 5, Oct. 2025. DOI: 10.30871/jaic.v9i5.10945
- [10] E. C. C. M. Silva, et al., "An emotional discrete controller PSO tuned and designed for a real industrial pumping system," *PLoS One*, vol. 17, no. 3, e0264426, Mar. 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0264426
- [11] Ö. B. İnal and G. Koçak, "A case study on the variable frequency drive for ship engine room ventilation," *Marine Science and Technology Bulletin*, vol. 12, no. 3, pp. 252-258, Sep. 2023. DOI: 10.33714/masteb.1299692
- [12] A. Ali and E. Erçelebi, "A Low cost modelling of the variable frequency drive optimum in industrial applications," *Journal of Engineering Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 1-13, Mar. 2018. DOI: 10.30521/jes.405774
- [13] S. Hebri, "Variable Frequency Drive Importance in an LPG Plant: Case Study," *Journal of Electrical & Electronic Systems*, vol. 1, p. 101, Jan. 2012. DOI: 10.4172/2167-101X.1000101
- [14] I. U. Khan, et al., "Performance Evaluation Using Variable Frequency Drive in Pumping Application: A Case Study at Akim Oda Upstream Water Treatment Plant," *International Journal of Electrical Engineering and Ethics*, vol. 9, no. 2, Apr. 2026. DOI: 10.5281/zenodo.19427774
- [15] J. Chu, S. W. Yan, and H. L. Jia, "How energy is consumed in vacuum preloading treatment of soft clay," *Géotechnique*, vol. 74, no. 12, pp. 1304-1316, Dec. 2024. DOI: 10.1680/jgeot.21.00394

Authors



Jae-Yung Song received his M.S. degree in Mechatronics Engineering from Korea University of Technology and Education in 2018. He is currently pursuing a Ph.D. in Computer Engineering at Kongju National

University since 2026. Since 2024, he has been an Assistant Professor in the Department of Semiconductor and Engineering at Daelim University. His research and technical interests are focused on industrial automation and the convergence of PLC (Programmable Logic Controller) and PC-based programming to create intelligent control systems.



Seung-min Oh received the B.S. and Ph.D. degrees in computer engineering from Chungnam National University, Republic of Korea, in 2009 and 2015, respectively. From 2016 to 2019, he was a Postdoctoral

Researcher with the Network Research Laboratory, University of California at Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. Since 2019, he has been an Associate Professor with the Department of Computer Science and Engineering, Kongju National University. His research interests include routing protocols and applications for sensor networks, the Internet of Things (IoT), and the Internet of Vehicles (IoV).