

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

**PROJEKT UKŁADU STEROWANIA
LABORATORYJNĄ SUSZARNIĄ KONWEKCYJNĄ**

LABORATORY CONVECTION DRYER CONTROL SYSTEM

Krzysztof Radosław Iwanek

U-13425

Kierunek: Inżynieria i Automatyzacja w Przemysle Drzewnym

Specjalność: Automatyka i Utrzymanie Ruchu

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Tomkiewicz prof. PK

Szczecinek, październik 2020

Spis treści

Streszczenie pracy dyplomowej	5
Diploma thesis abstract.....	6
Wykaz symboli i akronimów.....	7
1. WPROWADZENIE	8
1.1. Cel i zakres pracy	8
1.2. Struktura pracy inżynierskiej	9
2. OPIS STANOWISKA KONWEKCYJNA SUSZARNIA DASZKOWA.....	10
2.1. Budowa suszarń	10
2.2. Podział suszarń.....	10
2.3. Omówienie stanowiska laboratoryjnej suszarni konwekcyjnej	16
2.4. Budowa suszarni daszkowej	18
2.5. Klasyfikacja automatyzowanej suszarni	19
2.6. Wnioski	20
3. WYMAGANIA PROJETOWE, ANALIZA I WYBÓR WARIANTÓW	22
3.1. Wymagania układu pomiarowego	22
3.1.1. Wybór i wymagania układu pomiaru temperatury.....	22
3.1.2. Wybór i wymagania układu pomiaru lokalizacji materiału	23
3.1.3. Podsumowanie wymagań układu pomiarowego	25
3.2. Wymagania układ wykonawczego	25
3.2.1. Grzałki elektryczne	25
3.2.2. Wentylator.....	27
3.2.3. Siłowniki klap dostępu powietrza	27
3.2.4. Układ pneumatyczny.....	29
3.2.5. Podsumowanie wymagań stawianych przed układem wykonawczym	29
3.3. Wymagania układu sterującego	29
3.3.1. Sterowniki mocy	29
3.3.2. Programowalny sterownik logiczny.....	30
3.3.3. Moduły rozszerzeń	30
3.3.4. Panel HMI	32
3.3.5. Falownik.....	33
3.3.6. Podsumowanie wymagań stawianych przed układem sterującym.....	33
3.4. Dobór zasilacza	33
3.5. Wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym	34
3.6. Określenie poziomu ryzyka	35
3.6.1. Oparzenie spowodowane dotknięciem gorących elementów	35

3.6.2. Porażenie prądem elektrycznym	36
3.7. Podsumowanie	36
4. PROJEKT STANOWISKA.....	38
4.1. Elementy modyfikujące stanowisko	38
4.1.1. Zabezpieczenia wlotów powietrza	38
4.1.2. Mocowania czujników pojemnościowych	41
4.1.3. Przejściówki montażowe przewodu odprowadzającego czynnik suszący ...	42
4.2. Podłączenie elementów sterujących do zasilania.....	43
4.3. Połączenie sterownika, modułu ET 200SP, panelu HMI siecią PROFINET	43
4.4. Podłączenie czujników i elementów wykonawczych	44
4.5. Układ sterowania temperaturą	45
4.6. Układ sterowania wysokością zasypu suszarni.....	46
4.7. Układ sterowania prędkością czynnika suszącego.....	48
4.8. Podsumowanie	49
5. PROGRAM STERUJĄCY LABORATORYJNĄ SUSZARNIĄ KONWEKCYJNĄ.....	50
5.1. Konfiguracja sterownika	50
5.2. Konfiguracja modułów rozszerzeń	53
5.3. Konfiguracja HMI.....	56
5.4. Graf stanów	58
5.5. Struktura programu	60
5.5.1. Startup [OB100]	60
5.5.2. Main [OB1]	61
5.5.3. Hardware interrupt [OB40]	62
5.5.4. Wyjścia [FC24]	62
5.5.5. Obliczenia [FC26]	63
5.5.6. Cyclic interrupt.....	64
5.5.7. Stany [FC8]	65
5.6. Opis stanu jałowego [FC12]	66
5.7. Opis stanu załadunku materiału [FC9].....	66
5.8. Opis stanu suszenia materiału [FC11] i uzupełnienia materiału [FC7]	67
5.9. Opis stanu wyładunku materiału [FC13]	68
5.10. Opis stanu awaryjnego [FC10]	69
5.11. Obsługa suszarni	69
5.12. Podsumowanie	72
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	73
Literatura	75
Spis rysunków	77

Spis tabel	79
Zawartość nośnika CD	80

Streszczenie pracy dyplomowej

Szczecinek, październik 2020

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
FILIA w SZCZECINKU

Tytuł: PROJEKT UKŁADU STEROWANIA LABORATORYJNĄ SUSZARNIĄ KONWEKCYJNĄ

Autor: Krzysztof Radosław Iwanek

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Tomkiewicz prof. PK

Celem pracy jest zbudowanie układu automatycznego sterowania stanowiskiem dydaktycznym składającego się z suszarni daszkowej wraz układem grzewczym i wentylacyjnym. W pracy przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematu wraz z celem i zakresem wykonanych czynności. Sformułowano wymagania układu pomiaru temperatury oraz poziomu materiału w suszarni, dobrano czujniki zastosowane w tych układach, określono wymagania układu wykonawczego, wraz z wyborem elementów wykonawczych. Do sterowania urządzeniem zastosowano programowalny sterownik logiczny PLC Siemens S7-1500 wraz z modułami ET 200SP. Zdefiniowano wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym, oraz poziom nienaruszalności SIL. Opracowana dokumentacja stanowiska laboratoryjnego obrazuje sposób podłączenia elementów wykonawczych, pomiarowych i układu sterowania. Zaprezentowano układ sterowania temperaturą, poziomem zasypu oraz ruchem powietrza. Opisano sposób konfiguracji sterownika PLC, stany urządzenia, strukturę programu. Opracowano również instrukcję obsługi suszarni. Do komunikacji z operatorem zastosowano dotykowy panel HMI.

Słowa kluczowe: suszarnia, sterownik PLC, programowanie

Diploma thesis abstract

Szczecinek, October 2020

**KOSZALIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
BRANCH IN SZCZECINEK**

Title: LABORATORY CONVECTION DRYER CONTROL SYSTEM

Author: Krzysztof Radosław Iwanek

Supervisor: dr hab. inż. Dariusz Tomkiewicz prof. PK

The purpose of the thesis is to build an automatic control system of laboratory stand consisting of dryer with a heating and ventilation systems. In the thesis the requirements of temperature measurement and material level systems in the dryer were formulated, sensors used in these systems were selected, requirements of the executive system along with the choice of actuators were specified. A programmable logic controller PLC Siemens S7-1500 with ET 200SP module has been used to control the mechanism. The functional safety requirements and the SIL integrity level were defined. Developed documentation of laboratory stand shows the method of connecting the actuators, measurement elements and control system. The temperature control system, material level system and air movement system were presented. Configuration of PLC controller, device states, program structure were described. Manual of dryer was developed. A touch panel HMI was used to communicate with an operator.

Keywords: dryer, PLC controller, programming

Wykaz symboli i akronimów

Symbole

Av	–	parametr możliwości uniknięcia zagrożenia
Cl	–	klasa narażenia
Fr	–	parametr częstotliwości
I	–	natężenie prądu elektrycznego, A
P	–	moc urządzenia elektrycznego, W
Pr	–	parametr prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji zagrożenia
Se	–	ciężkość zdarzenia
U	–	napięcie prądu elektrycznego, V
X0	–	stan jałowy
X1	–	stan ładowania materiału
X2	–	stan suszenia materiału
X2.1	–	stan uzupełniania materiału
X3	–	stan opróżniania suszarni

Akronimy

HDF	–	plyta z włókien drzewnych o podwyższonej gęstości (ang. <i>high-density fibreboard</i>)
HMI	–	panel sterowniczy (ang. <i>Human-Machine Interface</i>)
PID	–	regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (ang. <i>proportional–integral–derivative</i>)
PLC	–	programowalny sterownik logiczny (ang. <i>programmable logic controller</i>)
RTD	–	rezystancyjny czujnik temperatury (ang. <i>Resistance Temperature Detector</i>)
SCADA	–	nadzorujący system sterowania i gromadzenia danych (ang. <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>)
SIL	–	poziom nienaruszalności bezpieczeństwa (ang. <i>Safety Integrity Level</i>)

1. WPROWADZENIE

Proces suszenia jest jednym z podstawowych procesów technologicznych w wielu gałęziach przemysłu, między innymi w przemyśle drzewnym. Zespół operacji technologicznych, mających za zadanie zredukowanie ilości wody w materiale, nazywamy suszeniem (Glijer, 2011).

Suszenie jest jednym z procesów, w których zużywana jest duża ilość energii. W związku z tym warto zastosować odpowiednie układy sterowania, aby ograniczyć zużycie energii, a co za tym idzie zredukować koszty. Od samego procesu suszenia materiału zależy również jakość finalna wyrobu, z tego powodu zastosowanie odpowiedniego urządzenia, które zapewni odpowiednią wilgotność substancji jest niezwykle istotne. Każde przesuszenie materiału prowadzi do zwiększenia kosztów energetycznych. Niedosuszenie materiału zaś obniża w sposób znaczący jakość produktu, może również spowodować usunięcie całej partii towaru ze względu na nieodpowiednie właściwości wyrobu.

Innym ważnym aspektem jest czas trwania suszenia. Istotne jest aby proces zmniejszania wilgotności materiału nie był wąskim gardłem ciągu produkcyjnego. W związku z powyższym należy zadbać o wysoką sprawność urządzenia suszącego. Grzałki ogrzewające powietrze powinny charakteryzować się odpowiednią mocą, w sposób ciągły reagować na informacje pozyskane z czujników temperatur zamontowanych w maszynie suszącej. Wentylator bądź zespoły wentylatorów powinny wytwarzać dostosowany do potrzeb procesu strumień powietrza suszącego materiał. Program sterujący suszarnią ma za zadanie doprowadzić materiał do odpowiedniego poziomu wilgotności na podstawie pomiaru wilgotności suszonej substancji w sposób bezpieczny, dokładny oraz energooszczędny.

W Filii Politechniki Koszalińskiej w Szczecinku znajduje się suszarnia konwekcyjna daszkowa, która ma zostać zautomatyzowana na potrzeby dydaktyczne. Niniejsza praca przedstawia część wykonanych prac dotyczących automatyzacji konwekcyjnej suszarni daszkowej. Stanowisko laboratoryjne składa się między innymi z zespołu zbiorników przechowujących materiał i systemu transportu substancji suszonej. Część dotycząca magazynowania oraz transportowania materiału nie jest przedmiotem tej pracy inżynierskiej.

1.1. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest zbudowanie układu automatycznego sterowania stanowiskiem dydaktycznym składającego się z suszarni daszkowej wraz układami grzewczym i wentylacyjnym.

Urządzenie ma posłużyć do celów dydaktycznych dla kierunku Inżynieria i Automatyka w Przemśle Drzewnym.

Zakres wykonanych czynności obejmuje:

- przegląd i uruchomienie części mechanicznej stanowiska laboratoryjnego,
- wybór i montaż elementów wykonawczych oraz pomiarowych,
- wykonanie połączeń elektrycznych oraz szafy sterującej,
- opracowanie programu sterownika,
- uruchomienie stanowiska,
- weryfikację przyjętych założeń.

1.2. Struktura pracy inżynierskiej

Praca inżynierska składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy rozdział pracy uzasadnia podjęcie tematu pracy inżynierskiej, przedstawia wiadomości wstępne o suszarnictwie, określa cel i zakres pracy. Drugi rozdział zawiera opis istniejącego stanowiska przed wykonaniem montażu części elementów wykonawczych oraz pomiarowych. Znajduje się w nim także klasyfikacja suszarni pod względem ciągłości pracy, źródła ciepła, kierunku działania czynnika suszącego i materiału suszonego oraz cech konstrukcyjnych. Trzeci rozdział prezentuje wymagania projektowe układu: sterowania, pomiarowego i wykonawczego oraz zawiera analizę funkcjonowania urządzenia i kryteria związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym. Rozdział trzeci prezentuje wymagania projektowe układu: sterowania, pomiarowego i wykonawczego oraz zawiera analizę funkcjonowania urządzenia i kryteria związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym. Rozdział czwarty przedstawia projekt stanowiska i dokumentację projektu. Opisano w nim również układy sterowania temperaturą, wysokością zasypu oraz ruchem czynnika suszącego wilgotny materiał. Rozdział piąty dotyczy sposobu konfiguracji układu sterowania – przedstawiono w nim program sterowania konwekcyjną suszarnią daszkową. Ponadto rozdział piąty zawiera instrukcję ze korzystania stanowiska przeznaczoną dla studentów. Rozdział szósty obejmuje podsumowanie i wnioski dotyczące zrealizowanej pracy oraz weryfikuje czy cel pracy został osiągnięty.

2. OPIS STANOWISKA KONWEKCYJNA SUSZARNIA DASZKOWA

2.1. Budowa suszarń

Suszarnie muszą być przystosowane do pracy w wysokich temperaturach, w procesie suszenia wykorzystuje się zwykle temperatury oscylujące w zakresie od 40°C do 110°C (Strumiłło 1983). Producent suszarni RIELA POLSKA Sp. z o.o. wykorzystywanych w rolnictwie podaje temperatury maksymalne powietrza dla poszczególnych zbóż podczas suszenia w stacjonarnych suszarniach przepływowych. Dla pszenicy jest to 90°C, rzepaku 75°C, kukurydzy 130°C (www.riela.pl). Suszenie materiałów drzewnych np. płyty HDF przeprowadzane jest w suszarni bębnowej, gdzie temperatura osiąga nawet 240°C.

Do automatycznego sterowania suszarniami wykorzystywane są programowalne sterowniki logiczne (PLC). Sterują one elementami wykonawczymi suszarni oraz pobierają sygnały z czujników ulokowanych na urządzeniu. Urządzeniami wykonawczymi są urządzenia poruszające czynnikiem suszącym, silniki wprawiające w ruch mechanizmy przesuwające materiał w suszarni, oraz elementy grzewcze. Instrumentami pomiarowe dostarczające informacji na temat przebiegu procesu suszenia to czujniki: temperatury, położenia materiału, przepływu oraz wilgotności.

2.2. Podział suszarń

Suszenie jest procesem technologicznym stosowanym w wielu gałęziach przemysłu np.: chemicznego, spożywczego, rolnego oraz drzewnego. Procesowi suszenia poddawana jest cała rozpiętość materiałów: od surowca - po gotowe wyroby. Skutkuje to powstaniem wielu typów urządzeń dostosowanych do suszenia konkretnych typów materiału (Strumiłło 1983).

Ze względu na ciągłość działania suszarnie możemy podzielić na następujące rodzaje (Strumiłło 1983):

1. Suszarnie o działaniu ciągłym.
2. Suszarnie o działaniu periodycznym.

Suszarnie działające w sposób ciągły charakteryzują się bezustanną pracą, materiał mokry podawany jest do nich równocześnie z równomiernym odprowadzaniem wysuszonego. Wilgotność substancji suszonej zmienia się wraz z położeniem w urządzeniu. Przy użyciu suszarni o działaniu ciągłym otrzymujemy substancję wysuszoną w sposób jednolity. Maszyny tego typu wymagają mniej ciepła do skutecznego działania i są mniej skomplikowane pod względem obsługi. Do ich wad można zaliczyć złożoność oraz wysoki

koszt. Suszarnie pracujące w trybie ciągłym stosowane są do suszenia materiałów o podobnych wymiarach i składzie na przykład: papieru, ceramiki, warzyw (Strumiłło 1983).

Suszarnie periodyczne charakteryzują się pracą przerywaną. Mokry surowiec wprowadza się do suszarni, a po zakończeniu procesu suszenia wyprowadza się suchy surowiec z maszyny. Urządzenie działa w sposób okresowy - można wyróżnić w nim stan: załadunku materiału, suszenia oraz opróżniania po zakończeniu procesu. Stan materiału w suszarniach periodycznych nie zależy od miejsca położenia materiału. Główną rolę pełni czas suszenia oraz temperatura, w której przebiega proces. Suszarnie periodyczne wymagają dużo więcej ciepła od suszarni ciągłych. Na początku procesu, dzięki dużej różnicy wilgotności między czynnikiem suszącym a materiałem, mają wysoką sprawność, lecz wraz ze zmniejszeniem wilgotności materiału ich sprawność spada, przez co ich wydolność całkowita jest niska. Kolejną wadą suszarni okresowych jest nierównomierne suszenie materiału. Surowiec bliżej wlotów powietrza może zostać w łatwy sposób przesuszony, zaś materiał położony w pobliżu kanału odlotowego wolniej oddaje wilgoć, przez co może zostać niedosuszony. Do zalet suszarni periodycznych zaliczamy prostotę - łatwo można przystosować je do różnorodnych wymogów działania. Kolejnym atutem jest nieskomplikowane sterowanie procesem suszenia przeprowadzane przy ich wykorzystaniu. Suszarnie periodyczne wykorzystywane są do procesów suszenia, w których wilgotność produktu jest ustalona i nie można dopuścić do przesuszenia materiału (Strumiłło 1983).

Ze względu na źródło ciepła suszarnie można podzielić w następujący sposób (Strumiłło 1983):

1. Suszarnie parowe.
2. Suszarnie ogniowe.
3. Suszarnie powietrzne.
4. Suszarnie ogrzewane cieczami.
5. Suszarnie z ogrzewaniem elektrycznym.

Suszarnie parowe

to suszarnie, w których czynnikiem suszącym jest przegrzana para. Strumień gorącej pary może transportować nawet o 30% większą energię w porównaniu ze strumieniem powietrza, co skutkuje jego mniejszym ochładzaniem. Zwiększa to znacząco sprawność suszarni w zestawieniu z suszarnią wykorzystującą powietrze jako czynnik suszący (heckmann-mt.de).

Suszarnie ogniowe – suszarnie ogrzewane gazami spalinowymi. Ogrzewanie tego typu używa się w suszarniach suszących duże ilości surowca. Surowiec musi wykazywać odporność na wysokie temperatury (Strumiłło 1983).

Suszarnie powietrzne – powietrze jest czynnikiem ogrzewanym wtórnie przez inne źródło ciepła, np. grzałki elektryczne. Zaletą powietrza jest jego duża higroskopijność (Strumiłło 1983).

Suszarnie ogrzewane cieciami – suszenie materiału przeprowadzane jest przy użyciu płynów, zwykle stosowane są oleje mineralne. W praktyce suszarnie tego typu stosowane są niezwykle rzadko (Strumiłło 1983).

Suszarnie z ogrzewaniem elektrycznym – ogrzewanie elektryczne stosowane jest zazwyczaj w suszarniach laboratoryjnych, spowodowane jest to potrzebą dokładnej regulacji temperatury (Strumiłło 1983).

Ze względu na kierunek ruchu powietrza i surowca suszarnie można sklasyfikować na poniższe rodzaje (Strumiłło 1983):

1. Suszarnie współprądowe.
2. Suszarnie przeciwprądowe.
3. Suszarnie o prądach skrzyżowanych.

Suszarnie współprądowe – są to suszarnie, w których materiał o największej wilgotności jest suszony przez czynnik suszący o najwyższej temperaturze i najniższej wilgotności. Materiał wilgotny jest suszony na wejściu do suszarni, dzięki czemu jest intensywnie suszony. Materiał częściowo wysuszony jest bliżej wyjścia z suszarni, gdzie jest suszony przez czynnik suszący o wyższej wilgotności i niższej temperaturze. Suszenie współprądowe stosowane jest w procesach, w których substancja susząca charakteryzuje się niską odpornością na wysokie temperatury w stanie suchym. Suszarnie współprądowe wykorzystywane są również do materiałów cechujących się niską higroskopijnością (Strumiłło 1983).

Suszarnie przeciwprądowe – wykorzystywane są do suszenia materiałów odpornych na wysokie temperatury w stanie niskiej wilgotności oraz cechujących się niską tolerancją na energiczne suszenie. Czynnik suszący o stosunkowo niskiej temperaturze spotyka się z materiałem wilgotnym na wejściu do suszarni. Wraz z przejściem w dalszą część urządzenia materiał jest ogrzewany i suszony pod wpływem coraz to cieplejszego i suchszego powietrza. Suszarnie tego typu stosowane są do suszenia drewna litego, owoców, grzybów i warzyw. W wypadku tych artykułów ważne jest, aby proces suszenia na początku nie przebiegał zbyt szybko, suszenie nie może przebiegać sprawniej od dyfuzji wilgoci

w substancji suszonej. Podczas zbyt szybkiego suszenia tego typu materiału tkanka zewnętrzna zostaje wysuszona, co skutkuje brakiem możliwości przejścia wody z części wewnętrznych surowca (Strumiłło 1983).

Suszarnie o prądach skrzyżowanych – wykorzystywane są podczas suszenia materiałów odpornych na wysoką temperaturę w stanie wilgotnym i suchym. Kolejną cechą substancji suszonych w tego typu urządzeniach jest wysoka wytrzymałość na gwałtowne suszenie (Strumiłło 1983).

Pod względem budowy suszarnie dzielone są w następujący sposób (Strumiłło 1983):

1. Suszarnie otwarte.
2. Suszarnie komorowe i szafkowe.
3. Suszarnie taśmowe.
4. Suszarnie bębnowe.
5. Suszarnie walcowe.
6. Suszarnie próżniowe.
7. Suszarnie rozpryskowe.
8. Suszarnie daszkowe.
9. Suszarnie fluidyzacyjne.

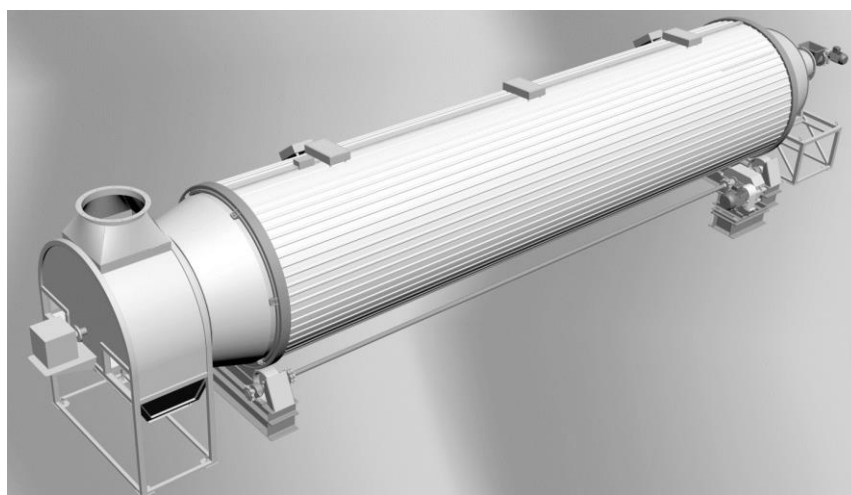
Suszarnie otwarte – suszarnie, w których substancja suszona jest układana na specjalnych półkach bądź w stosy i suszona w sposób naturalny (Prządka 1973).

Suszarnie komorowe i szafkowe – materiał suszony jest regularnie ułożony w specjalnej komorze. Czynnikiem suszącym jest powietrze ogrzewane przez grzejnik. Kaloryfer może być umiejscowiony w środku komory, bądź może także znajdować się na zewnątrz i obsługiwać kilka komór jednocześnie. W suszarniach komorowych ze sztucznym obiegiem powietrze jest poruszane poprzez wentylator wsysający powietrze do komory tłoczone na kaloryfer. Ogrzane powietrze przechodzi przez substancję suszoną i opuszcza suszarnię poprzez komin. Suszarnie otwarte są suszarniami periodycznymi, występują w nim fazy załadunku materiału, suszenia właściwego oraz rozładunku materiału. Przykładowym zastosowaniem suszarni komorowych i szafkowych jest suszenie tarcicy w przemyśle drzewnym. Kolejnym zastosowaniem jest suszenie farb i związków chemicznych, do których suszenia potrzebna jest stosunkowo niska i skrupulatnie regulowana temperatura (Strumiłło 1983, Prządka 1973).

Suszarnie taśmowe – są to urządzenia o działaniu ciągłym. Składa się z ruchomej taśmy, na której suszony jest materiał. Substancja podawana jest na początku taśmy, powietrze porusza się w przeciwnym kierunku do kierunku taśmy. Wentylator dostarcza suchego

powietrza przy wylocie urządzenia. Obsługa suszarni taśmowej jest bardzo prosta, lecz do wysuszenia materiału o przeciętnej wilgotności potrzeba suszarni, której długość przekracza 100 m. Z tego powodu nie są zbyt popularne. Suszarnie tego typu służą do suszenia materiałów sypkich (Strumiłło 1983).

Suszarnie bębnowe – stosuje się je do suszenia materiałów sypkich, piasku, biomasy, popiołu. Wykorzystywane są również w przemyśle drzewnym do suszenia wiórów. Substancja susząca jest podawana do obrotowego bębna, w którym jest przesypywana aż do wylotu. Materiał porusza się w bębnie we współprądzie bądź przeciwprądzie – w zależności od wymagań suszonego materiału (Skotnicka 2011). Przykładowa suszarnia bębnowa została przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Suszarnia bębnowa (www.behance.net)

Materiał przemieszcza się przez suszarnię dzięki zastosowaniu specjalnych przegród, które wraz z obrotem bębna przesypują substancję w dalszą część suszarni. Bęben suszarni ustawiony jest często pochyło, dzięki czemu wylot suszarni znajduje się nieco niżej od wlotu (Strumiłło 1983).

Suszarnie walcowe – są używane podczas suszenia materiałów przybierających kształt długich arkuszy. Stosuje się je w przemyśle papierniczym do suszenia papieru bądź w przemyśle drzewnym do suszenia płyty HDF – płyty z włókien drzewnych o wysokiej twardości i gęstości. Arkusze produktu przepuszczane są przez gorące walce (Strumiłło 1983).

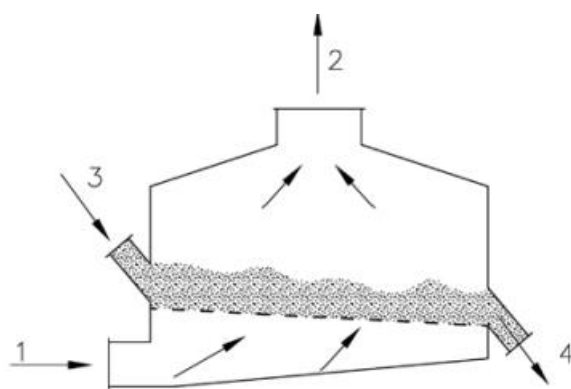
Suszarnie próżniowe – w komorze urządzenia wytwarzane jest podciśnienie, dzięki czemu proces suszenia może przebiegać w dużo niższej temperaturze. Czynnikiem suszącym jest ogrzana para. Suszarnie tego typu są szczelne – suszona substancja nie ulatnia się do otoczenia, przez co stosuje się je podczas suszenia substancji szkodliwych, takich jak

biel ołowiana, cyjanek potasu i farby anilinowe. Stosowane są również do suszenia substancji wybuchowych i łatwo zapalnych, ponieważ są bardziej bezpieczne od suszarni, w których czynnikiem suszącym jest powietrze (Strumiłło 1983).

Suszarnie rozpryskowe – wykorzystywane są w suszeniu substancji ciekłych, na przykład mleka, krwi. Substancje te rozpylane są w komorze suszarniczej i suszone przepływającym, gorącym powietrzem. Dzięki rozpyleniu substancja szybko ulega suszeniu dzięki dużej powierzchni styku z czynnikiem suszącym (Strumiłło 1983).

Suszarnie daszkowe – wykorzystywane są do suszenia materiałów sypkich. Stosuje się je w przemyśle zbożowym do suszenia zbóż. Suszarnie tego typu składają się z komory suszarniczej ze specjalnymi daszkami, przez które przesypywany jest materiał. Daszki umożliwiają lepszy przepływ czynnika suszącego. Czynnikiem suszącym jest rozgrzane powietrze, ponieważ nie wpływa ono negatywnie na jakość substancji suszonej. Suszarnie te działają współprądowo, powietrze ogrzewane jest na wejściu do suszarni, następnie dociera do substancji suszonej i pobiera z niej wilgoć, po czym opuszcza suszarnię kanałem wylotowym.

Suszarnie fluidyzacyjne – wykorzystywane są do suszenia materiałów sypkich. Czynniki suszący wprowadzany jest do suszarni od dołu, a materiał porusza się na przepuszczalnej przegrodzie, przez którą przechodzi gaz suszarniczy. Gaz o odpowiednim strumieniu przechodzi przez cząstki materiału i je otacza, a substancja suszona porusza się w stronę wylotu suszarni. Suszarnię fluidalną przedstawiono na rys. 2 (Skotnicka 2011).



Rys. 2. Schemat działania suszarni fluidyzacyjnej (Skotnicka 2011)

Na powyższym schemacie 1 – oznacza miejsce doprowadzające czynnik suszący, 2 – wylot czynnika suszącego, 3 – miejsce załadunku materiału wilgotnego, 4 – miejsce wyladunku materiału wysuszonego (Skotnicka 2011).

2.3. Omówienie stanowiska laboratoryjnej suszarni konwekcyjnej

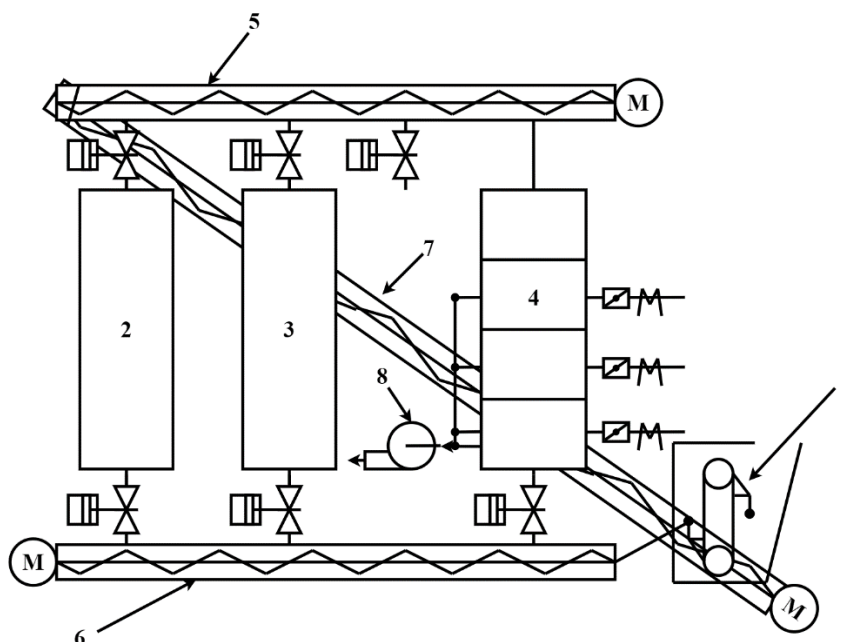
W budynku filii Politechniki Koszalińskiej znajduje się laboratoryjna suszarnia konwekcyjna. Jest to urządzenie, składające się z suszarni daszkowej, zespołu zbiorników oraz zespołu transportującego materiał suszony. Suszarnie daszkowe służą do suszenia materiałów sypkich, są wykorzystywane w rolnictwie podczas suszenia zbóż. Jako, że suszarnia ta ma być wykorzystywana przez studentów i wykładowców kierunku Inżynierii i Automatyacji w Przemysle Drzewnym, suszonym materiałem będzie granulata z tworzywa sztucznego zmieszany z trocinami. Wykazuje on podobne właściwości do ziaren zbóż, a w przeciwieństwie do wilgotnych trocin nie będzie powodował zatorów w suszarni.

Celem wykonanych działań podczas realizacji pracy inżynierskiej było zbudowanie i automatyzacja części suszarniczej. Przed przystąpieniem prac należało złożyć stanowisko. Elementy stanowiska to metalowa rama, będąca częścią konstrukcyjną, na której należało zamontować suszarnię daszkową wraz z dwoma zbiornikami. Do transportu służą trzy przenośniki ślimakowe oraz jeden przenośnik kubelkowy z zamontowanym lejem załadowniczym. W urządzeniu zostały zainstalowane już cztery silniki elektryczne służące do transportu materiału oraz 3 grzałki elektryczne. W skład urządzenia wchodziły również siłowniki pneumatyczne oraz wentylator. Po złożeniu urządzenia suszarnia wraz ze zbiornikami prezentowała się następująco – rys. 3.



Rys. 3. Automatyzowana suszarnia konwekcyjna (opracowanie własne)

Na powyższym zdjęciu suszarni brakuje elementów pomiarowych. Podczas realizacji pracy dobrano czujniki określające temperaturę czynnika suszącego oraz poziom zasypu materiału suszonego. Schemat suszarni przed rozpoczęciem prac związanych z automatyzacją przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska laboratoryjnego przed przystąpieniem do automatyzacji urządzenia (opracowanie własne)

Na powyższym schemacie ukazującym obiekt sterowania można rozróżnić następujące elementy:

1. Podajnik kubelkowy z zasypem – element, do którego podawany jest materiał.
2. Zbiornik materiału I – wykorzystywany do magazynowania materiału.
3. Zbiornik materiału II – wykorzystywany do magazynowania materiału.
4. Suszarnia konwekcyjna daszkowa – to w niej zachodzi proces suszenia materiału.
5. Ślimak górny – służy do podawania materiału do zbiorników, suszarni oraz wyjścia wyładunkowego.
6. Ślimak dolny – odbiera materiał z suszarni i zbiorników, element transportowy.
7. Ślimak ukośny, służy do podawania materiału do ślimaka górnego.
8. Wentylator – wytwarza podciśnienie w suszarni.

Droga materiału podczas napełniania suszarni wygląda następująco. Materiał wilgotny podawany jest do leja (1), w którym opada na dno dzięki działaniu siły grawitacji.

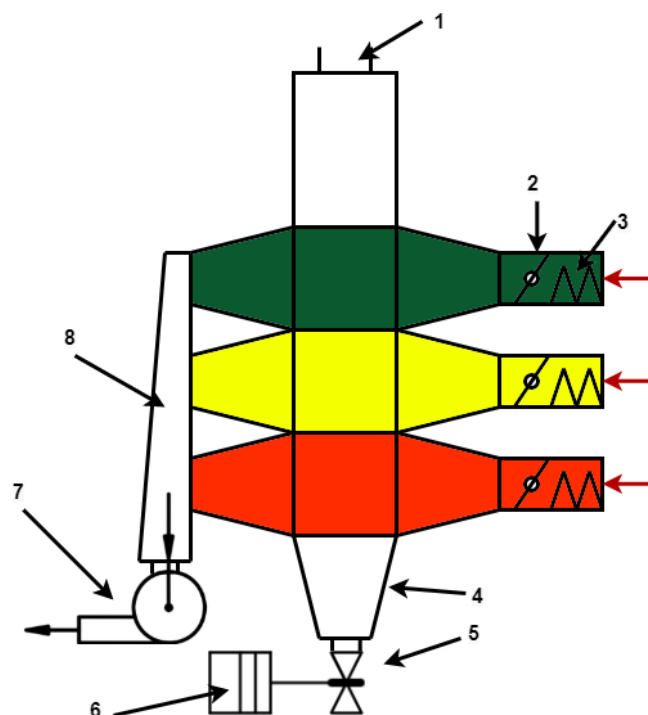
Wygarniany jest z dna leja przez ślimak ukośny (7) i dalej trafia do ślimaka górnego (5). Materiał następnie trafia do jednego z dwóch zbiorników poprzez otwarcie jednej z zasuw przy pomocy siłownika pneumatycznego.

Suszenie materiału rozpoczyna się od otwarcia zasuw pod zbiornikiem, z którego chcemy pobrać suszony materiał. Trafia on do ślimaka dolnego (6), który podaje materiał do podajnika kubłkowego, który nasypuje materiał do zasypu (1). Materiał wygarniany jest z zasypu przy pomocy podajnika ślimakowego (7), po czym trafia do ślimaka górnego(5). Ślimak ten zasypuje suszarnię daszkową, po jej uzupełnieniu pracę rozpoczyna program suszący. Podczas suszenia materiał krąży przez urządzenie, dzięki elementom transportowym w następującej kolejności: ślimak dolny, podajnik kubłkowy, ślimak ukośny, ślimak górny i trafia ponownie do suszarni. Po wysuszeniu materiału droga materiału się zmienia, ponieważ zamiast trafiać do suszarni jedna z zasuw zbiorników zostaje otwarta i materiał zsypuje się z ślimaka górnego do jednego z dwóch zbiorników lub do wyjścia z obiektu.

W stanowisku brakuje elementów pomiarowych, czujników temperatury, czujników wilgotności oraz czujników wykrywających położenie materiału. Należy również zamontować siłowniki otwierające i zamykające wloty powietrza. Z elementów sterowania należy dodać i zamontować w szafie elektrycznej sterownik PLC z odpowiednią ilością wejść i wyjść analogowych oraz cyfrowych, sterowniki mocy grzałek, falowniki sterujące silnikiem ślimaka dolnego oraz falownik sterujący działaniem wentylatora.

2.4. Budowa suszarni daszkowej

Część suszarnicza urządzenia przedstawiono na poniższym schemacie – rys. 5.

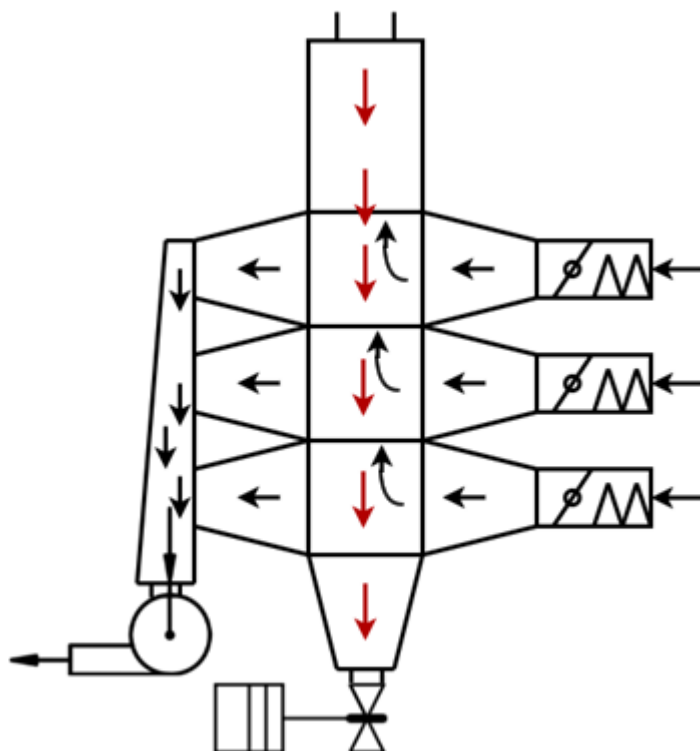


Rys. 5. Schemat suszarni konwekcyjnej daszkowej (opracowanie własne)

Materiał jest podawany do suszarni przez zasyp (1). Dzięki działaniu siły grawitacji przesypuje się pomiędzy daszkami w komorze suszarniczej, aż do zsypu (4). Wyjście suszarni otwierane jest przez zasuwę (5) sterowaną siłownikiem pneumatycznym (6). Suszarnia podzielona jest na trzy sektory oznaczone zielonym, żółtym i czerwonym kolorem. Temperatura w każdym z tych sektorów może być kontrolowana poprzez sterowanie grzałkami elektrycznymi (3) oraz wlotami powietrza (2). Czerwone strzałki symbolizują miejsca, w których powietrze trafia do suszarni. Elementem wytwarzającym podciśnienie w suszarni jest wentylator (7), umożliwia to przepływ powietrza przez sektory. Miejszem, w którym łączą się sektory jest element (8), do którego podłączony jest wentylator.

2.5. Klasyfikacja automatyzowanej suszarni

Suszarnia będąca przedmiotem pracy inżynierskiej jest suszarnią daszkową. Posiada ona specjalne daszki ułatwiające przepływ powietrza przez materiał suszony. Urządzenie zostało zaprojektowane do materiałów sypkich. Gorące powietrze podgrzewane przez 3 grzałki elektryczne jest wciągane przez wentylator wytwarzający podciśnienie. Suszarnia ta jest suszarnią przeciwprowadową. Daszki kierują gorące powietrze w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu materiału. Ruch powietrza w suszarni przedstawiono na schemacie – rys. 6.



Rys. 6. Ruch powietrza i materiału w suszarni (opracowanie własne)

Ruch materiału prezentowany jest przez czerwone strzałki spowodowany siłą grawitacji, czarne strzałki prezentują ruch powietrza w suszarni. Materiał jest suszony poprzez strumień powietrza działający pod kątem prostym do kierunku przemieszczania się surowca. Automatyzowana suszarnia jest suszarnią ciągłą. Podczas jej działania materiał podawany i odbierany jest w sposób ciągły, przez określony za pośrednictwem operatora czas.

W automatyzowanej suszarni daszkowej ciepło przekazywane jest poprzez zjawisko konwekcji. Konwekcja jest mechanizmem wymiany ciepła, polegającym na przemieszczaniu się ciepła wraz z przemieszczaniem się cieczy, gazów (w przypadku suszarni Filii Politechniki Koszalińskiej przemieszczaniem się powietrza). W tej suszarni mamy do czynienia z konwekcją wymuszoną przez wentylator wytwarzający podciśnienie w komorze suszarniczej (www.teraz-srodowisko.pl).

2.6. Wnioski

Urządzenie znajdujące się w budynku Filii Politechniki Koszalińskiej jest laboratoryjną suszarnią konwekcyjną daszkową. Po zamontowaniu pozostałych elementów wykonawczych, pomiarowych oraz urządzeń sterujących będzie mogła służyć jako obiekt laboratoryjny dla studentów kierunku Inżynierii i Automatykacji w Przemśle Drzewnym.

Na podstawie rozdziału drugiego wyznaczono konieczne do opracowania i wykonania elementy oraz układy. Należy zaprojektować układ sterowania temperaturą składający się z grzałek elektrycznych, sterowników mocy, czujników temperatury oraz regulatora. Konieczne jest stworzenie układu sterowania wysokością zasypu komory suszarniczej. W skład układu będą wchodzić czujniki mierzące wysokość zasypu suszarni, ślimak odbierający materiał z suszarni, zasuwę zamykającą wyjście suszarni oraz układ transportujący materiał do suszarni. Ostatnim, niezbędnym systemem jest układ sterujący ruchem czynnika suszącego, który zostanie wykonany z wentylatora wytwarzającego podciśnienie w suszarni oraz klap regulujących dostęp powietrza. Układy te mają być sterowane przy pomocy programowalnego sterownika logicznego PLC.

3. WYMAGANIA PROJEKTOWE, ANALIZA I WYBÓR WARIANTÓW

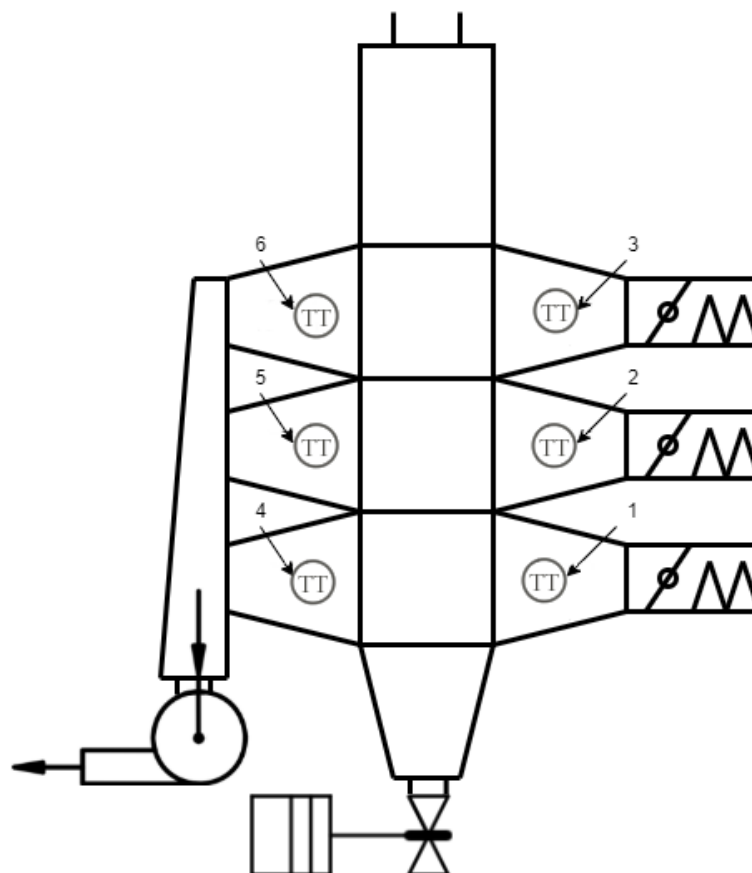
Na podstawie przeglądu w rozdziale 2 określono wymagania projektowe oraz wybrano na ich podstawie elementy zastosowane w układzie. Wymagania projektowe podzielono na wymagania układu pomiarowego, wykonawczego oraz sterującego. Należy również wyznaczyć kryteria bezpieczeństwa funkcjonalnego urządzenia.

3.1. Wymagania układu pomiarowego

Do obsługi suszarni wymagany jest układ pomiarowy badający w sposób dokładny i bieżący przebieg zachodzącego procesu. Istotnymi parametrami jest temperatura powietrza, wilgotność materiału, prędkość przepływu czynnika suszącego oraz pomiar lokalizacji materiału.

3.1.1. Wybór i wymagania układu pomiaru temperatury

Temperatura w komorze suszarni ma być mierzona w sześciu punktach, przedstawionych na poniższym schemacie – rys. 7.



Rys. 7. Schemat suszarni daszkowej – rozłożenie czujników temperatury (opracowanie własne)

Czujniki temperatury 1, 2 i 3 mierzą temperaturę na wejściu gorącego powietrza do suszarni, 4, 5 i 6 dokonują zaś pomiaru temperatury gorącego powietrza wychodzącego z komory suszarniczej. Czujniki 1 i 4 umieszczone będą w najniższym segmencie suszarni, 2 i 5 w środkowym segmencie suszarni, a sensory 3 i 6 mają zostać ułożone na najwyższym poziomie. Ten sposób ułożenia czujników daje możliwość reakcji na zmiany temperatury w całej suszarni, umożliwiając kontrolę temperatury w poszczególnych sektorach jak i w całej suszarni.

Temperatura może być mierzona następującymi typami czujników.

- termopary,
- rezystancyjne czujniki temperatury RTD,
- pirometry,
- termometry bimetaliczne.

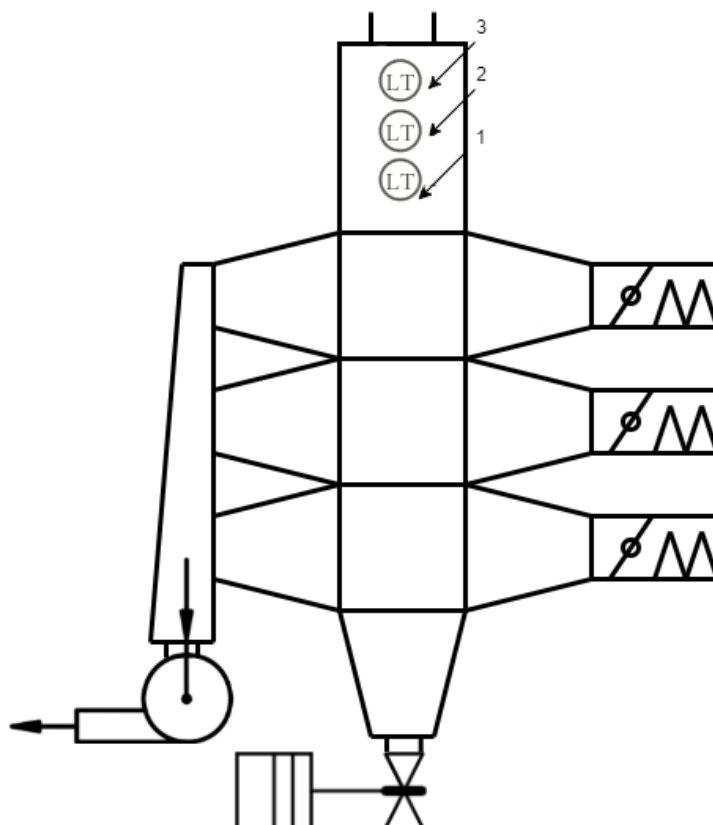
Śród wyróżnionych czujników termometry bimetaliczne wysyłają sygnał jedynie w określonej temperaturze – z tego powodu nie nadają się do badania temperatury powietrza, która ma być badana w sposób ciągły. Nadawały by się do obsługi suszarni, w której temperatura suszenia ma być stała, a grzałki działałyby dwupołożeniowo – byłyby włączone, lub wyłączone.

Koszt termometrów mierzących promieniowanie cieplne jest dużo wyższy od innych rodzajów czujników. Pomimo tego, że mogłyby być zastosowane do obsługi suszarni to jest to zbyt drogie rozwiązanie.

Do obsługi suszarni wybrano czujniki PT100. Symbol wybranych czujników to 1-FS-PT100-3. Są to rezystancyjne czujniki temperatury. Ich wadą jest praca w niższym zakresie temperatur niż w przypadku termopar, lecz dla potrzeb obiektu są wystarczające, ponieważ pracują w temperaturze od $-50\div 250^{\circ}\text{C}$. Do pomiaru temperatury wykorzystuje się pomiar zmiany rezystancji czujnika (acse.pl).

3.1.2. Wybór i wymagania układu pomiaru lokalizacji materiału

Podczas załadunku suszarni i procesu suszenia istotne są informacje na temat ilości materiału w suszarni. W trakcie trwania procesu suszenia istotne jest, aby maszyna była wypełniona materiałem. W przeciwnym razie powietrze byłoby pobierane poprzez otwór zasypowy suszarni – powoduje to zmniejszenie prędkości przepływu powietrza przy grzałkach i niesie ryzyko przepalenia grzałek oraz niewystarczającej temperatury przebiegania procesu suszenia. Rozmieszczenie czujników przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat rozmieszczenia czujników materiału (opracowanie własne)

Czujniki 1, 2 i 3 umieszczone zostaną przy wsypie materiału do komory suszarni, aby zapewnić płynne i bezpieczne sterowanie poziomem zasypu. Wymaganiem koniecznym stawianym tym czujnikom jest możliwość wykrywania materiału suszonego, czyli mieszaniny granulatu tworzywa sztucznego z trocinami.

Pomiar wypełnienia suszarni może być badany w następujących sposobami:

- czujniki indukcyjne,
- czujniki pojemnościowe,
- czujniki ultradźwiękowe,
- czujniki optyczne,
- czujniki optyczno-refleksyjne.

Czujniki optyczne i optyczno-refleksyjne wykazują się niską skutecznością podczas działania w warunkach dużego zapylenia – z tego powodu ich zastosowanie wymagałoby regularnego czyszczenia podczas eksploatacji suszarni daszkowej.

Czujniki ultradźwiękowe nie są najlepszym rozwiązaniem podczas badania wypełnienia suszarni materiałem sypkim. Pomimo tego, że są odporne na zabrudzenia, to podczas badania wysokości materiału mogą wykonywać to niedokładnie, ponieważ materiał sypki nie najlepiej odbija ultradźwięki. Kolejnym minusem jest wysokie znaczenie temperatury i wilgotności

otoczenia czujnika, która się zmienia podczas procesu suszenia i powoduje zmiany pomiaru (pomiarowelektryce.pl).

Czujniki indukcyjne działają dzięki zjawisku indukcji magnetycznej. Niemożliwe jest więc badanie poziomów materiałów niezmieniających pola elektromagnetycznego czujnika, takich jak wióry drzewne czy zboże.

Do obsługi suszarni wybrano czujniki pojemnościowe CM12-3004Pa. Są to czujniki PNP normalnie otwarte. Wykazują działanie na materiał suszony. Sensory te są proste w obsłudze, wysyłają sygnał w momencie zbliżenia się do nich obiektu. Do obsługi wybranych detektorów potrzeba zasilania o napięciu od 6 do 36 V.

3.1.3. Podsumowanie wymagań układu pomiarowego

Układ pomiarowy musi spełniać wymagania pracy w wysokich temperaturach. Ponadto czujniki muszą być odporne na pracę w wysokich temperaturach. Po spełnieniu tych wymagań kontrola procesu będzie przebiegać dokładnie i bezawaryjnie.

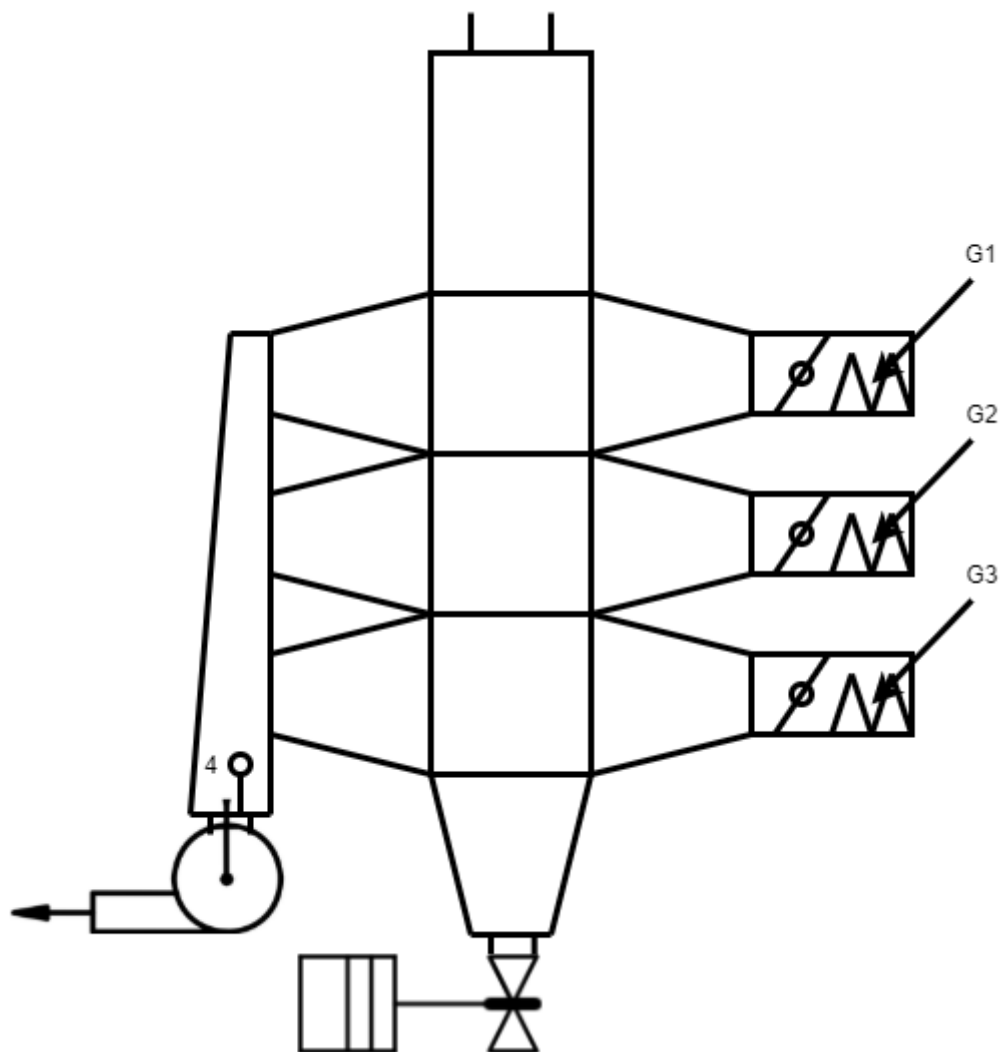
W obecnym stanie urządzenia układ pomiarowy posiadać będzie 6 czujników temperatury PT100 oraz 3 czujniki pojemnościowe wysokości materiału. Podczas dalszych czynności automatyzacji procesu suszenia należałoby zastosować czujniki wilgotności oraz przepływu czynnika suszącego.

3.2. Wymagania układ wykonawczego

Układ wykonawczy laboratoryjnej suszarni konwekcyjnej musi być dostosowany do obsługi procesu suszenia mieszaniny granulatu z tworzywa sztucznego i trocin. Układ grzewczy ma za zadanie ogrzać czynnik suszący, siłowniki powinny móc obrócić klapy dostępu powietrza. Wentylator powinien wytworzyć takie podciśnienie, aby zapewnić ruch czynnika suszącego w suszarni o odpowiedniej szybkości. Ślimak dolny musi być w stanie wygarnąć materiał z suszarni.

3.2.1. Grzałki elektryczne

W suszarni daszkowej zamontowano grzałki elektryczne. Mają one być obsługiwane przy pomocy sterowników mocy. Umożliwią one kontrolę mocy grzałek, co za tym idzie, kontrolę wysokości temperatury w poszczególnych segmentach. Umieszczenie grzałek przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Umieszczenie grzałek w suszarni daszkowej (opracowanie własne)

Każda z grzałek ma za zadanie ogrzać powietrze – czynnik suszący – w jednej z sekcji suszarni. Grzałki G1, G2 i G3 działają niezależnie od siebie, dzięki czemu mogą kontrolować temperaturę w danej sekcji. Do obsługi sterowników grzałek potrzebne są 3 wyjścia analogowe ze sterownika PLC. Możliwa jest również regulacja ręczna przy pomocy potencjometru.

Zamontowane grzałki zasilane są prądem przemiennym o napięciu 230 V. Moc grzałki obliczono po pomiarze natężenia prądu zasilającego grzałkę ze wzoru:

$$P = U * I * \cos\varphi; \quad (1)$$

Gdzie:

P – moc grzałki,

U – napięcie prądu zasilającego grzałkę,

I – prąd pobierany przez grzałkę,

φ – przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem i prądem.

Po zmierzeniu natężenia prądu płynącego przez grzałkę $I=6,75$ a obliczono jej moc:

$$P = 230 * 6,75 * 1 = 1,5525 [kW].$$

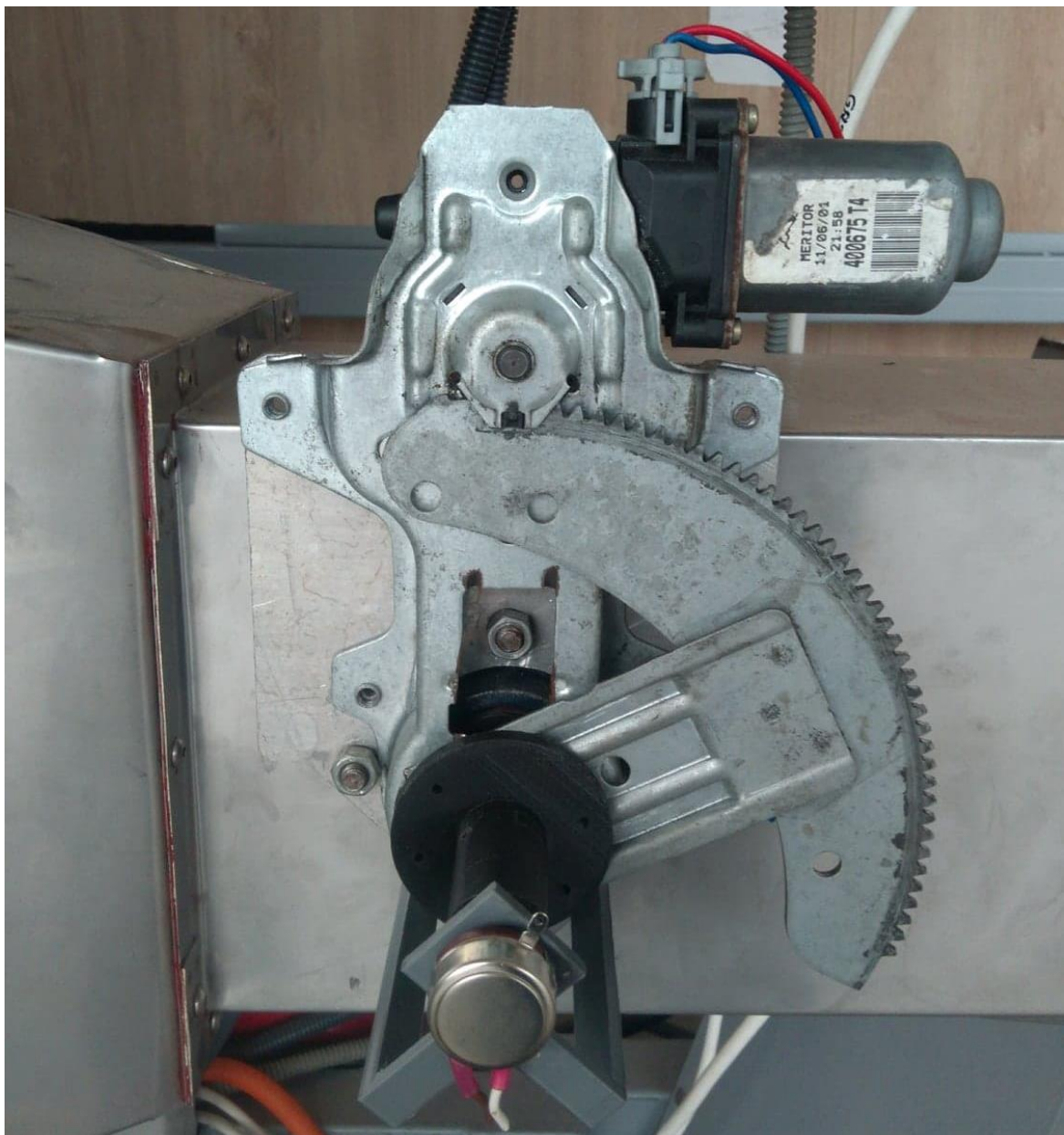
3.2.2. Wentylator

Przed wentylatorem stoi zadanie poruszania powietrzem w suszarni daszkowej. Musi on zapewnić wystarczającą prędkość przepływu czynnika suszącego oraz nie dopuścić do przegrzania się grzałek podczas pracy w wyższych temperaturach. Prędkość silnika wentylatora ma być regulowana przez przemiennik częstotliwości. Falownik musi zostać dobrany do silnik obsługującego wentylator. Silnik ten jest silnikiem trójfazowym, o mocy 1,5 kW.

3.2.3. Siłowniki klap dostępu powietrza

Ostatnim elementem wykonawczym suszarni daszkowej są siłowniki klap dostępu powietrza Siemens GQD161.1D/50S. Dzięki regulacji przy pomocy siłowników sterowanych sygnałem analogowym można otwierać i zamykać wloty powietrza oraz wybierać położenia pośrednie. Do obsługi wybranego siłownika potrzebny jest sygnał $0 \div 10$ V. Niestety zamontowano tylko dwa siłowniki ze względu na ich wysoki koszt. W przyszłości należy zamontować trzeci siłownik, aby wszystkie klapy dostępu powietrza były zautomatyzowane.

Innym sposobem regulacji położenia klap dostępu powietrza mógłby być silnik elektryczny wraz z zamontowanym potencjometrem. Silnik elektryczny obracałby klapą, a potencjometr badałby jej położenie poprzez zmianę jego rezystancji. Gotowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Sterowanie klapą dostępu powietrza przy pomocy silnika prądu stałego i potencjometru (opracowanie własne)

Układ ten nie został zastosowany, ponieważ siłowniki elektryczne są dużo prostsze w montażu i obsłudze. Program obsługujący silnik elektryczny byłby dużo bardziej skomplikowany od programu sterującego siłownikiem elektrycznym. Wadą zastosowania siłowników elektrycznych jest ich wysoki koszt. Wadą sterowania położeniem klapami silnikiem elektrycznym jest jego mniejsza dokładność oraz trudność w napisaniu odpowiedniego, działającego programu.

3.2.4. Układ pneumatyczny

Do poruszania zasuwami suszarni wybrano siłowniki dwustronnego działania. Sterowane są rozdzielaczami pięciodrogowymi dwupołożeniowymi. Dzięki zamontowanej cewce zmieniają położenie, do pozycji neutralnej powracają dzięki zamontowanej sprężynie.

3.2.5. Podsumowanie wymagań stawianych przed układem wykonawczym

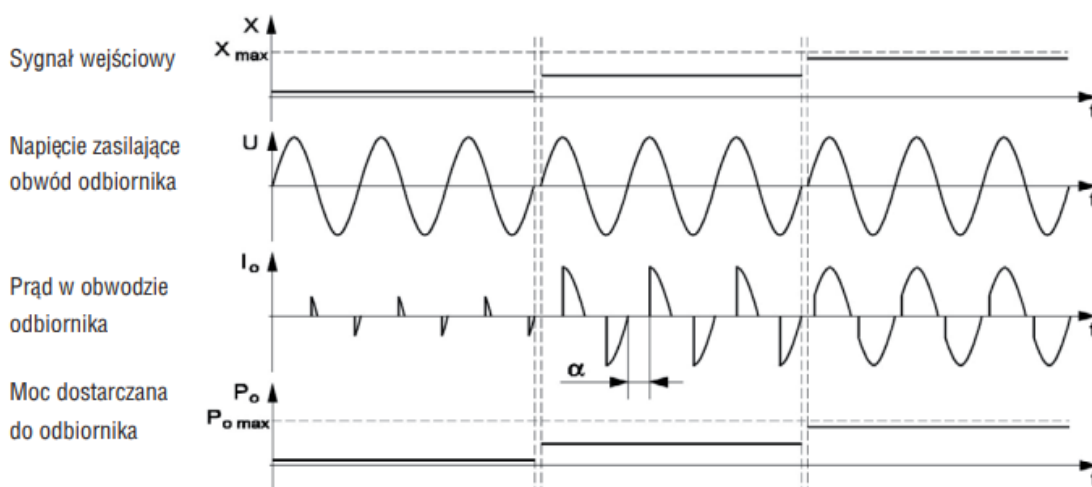
Elementy wykonawcze mają za zadanie wytworzyć parametry zadane do obsługi procesu suszenia. Do sterowania grzałkami i wentylatorem należy wybrać elementy sterujące. Do obsługi siłowników posłuży sygnał analogowy 0÷10 V. Należy kupić i zamontować jeszcze jeden siłownik klap dostępu powietrza. Siłowniki pneumatyczne muszą zostać zasilone sprężonym powietrzem.

3.3. Wymagania układu sterującego

Programowalny sterownik logiczny ma za zadanie obsługiwać układ wykonawczy oraz zbierać i przetwarzać informację z układu pomiarowego. Elementami układu sterującego suszarnią konwekcyjną są również sterowniki mocy obsługujące grzałki elektryczne oraz falowniki.

3.3.1. Sterowniki mocy

Do obsługi grzałek wybrano sterowniki mocy Lumel RP7. Sygnał sterujący nimi przyjmuje wartości od 4÷20 mA. Sterowniki mocy regulują temperaturę grzałek przy pomocy regulacji długości dostarczania prądu do grzałek. Ideę działania przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Analiza zależności mocy dostarczanej do odbiornika od sygnału sterującego (www.lumel.com.pl)

Wraz ze wzrostem sygnału wejściowego wzrasta czas okresowego podawania prądu do odbiornika, co za tym idzie wzrasta moc dostarczana do odbiornika.

Innym sposobem sterowania grzałkami w suszarni mogłoby być sterowanie przy pomocy stycznika. Przy zbyt niskiej temperaturze procesu stycznik uruchamiałby grzałki, a przy zbyt wysokiej je wyłączał. Sterowanie dwustanowe temperaturą przy obsłudze suszarni ma jednak następujące wady:

- przy małym uchybie regulacji ryzyko szybkiego zużycia stycznika,
- przy dużym uchybie regulacji wysoka niedokładność.

3.3.2. Programowalny sterownik logiczny

Do automatycznej obsługi obiektu sterowania potrzebny jest programowalny sterownik logiczny. Jego zadaniem jest obsługa urządzeń wykonawczych i pobieranie informacji z instrumentów pomiarowych na podstawie stworzonego programu. Sterownik musi cechować się niezawodnością i bezpieczeństwem. Powinien również posiadać odpowiednią ilość wyjść i wejść analogowych oraz cyfrowych, kolejno dla sygnałów sterujących i odczytów z czujników.

Do obsługi suszarni wybrano sterownik S7-1500 firmy Simens (6ES7511-1CK00-0AB0). Sterownik ten programowany jest w środowisku TIA Portal. Dzięki możliwości zainstalowania modułu rozszerzeń ET200 do sterownika ilość wejść i wyjść analogowych oraz cyfrowych nie stanowi problemu podczas automatyzacji urządzenia. Jedynym ograniczeniem jest duży koszt tego typu rozszerzeń.

3.3.3. Moduły rozszerzeń

W celu podłączenia wszystkich urządzeń wykonawczych i pomiarowych konieczne było wybranie modułu rozszerzeń. Moduł rozszerzeń ET 200SP (6ES7155-6AU01-0BN0) jest połączony ze sterownikiem przy pomocy sieci PROFINET, przy pomocy przewodu Ethernet. Do określenia modułów rozszerzeń konieczne było stworzenie list wejść i wyjść potrzebnych do obsługi czujników i elementów wykonawczych – na jej podstawie można było określić zapotrzebowanie na poszczególne rozszerzenia. Listę wykorzystywanych wyjść i wejść sterownika PLC przedstawiono w tabeli 1. Lista wykorzystywanych modułów rozszerzeń została przedstawiona w tabeli 2.

Tab. 1. Lista wejść i wyjść sterownika PLC 6ES7511-1CK00-0AB0

Nazwa portu	Nazwa elementu wykonawczego/pomiarowego	Sygnal
AI0	Siłownik klapy dostępu powietrza II	Wejściowy, analogowy 0÷10 V
AI1	Siłownik klapy dostępu powietrza III	Wejściowy, analogowy 0÷10 V
AI2-AI4	-	-
AQ0	Siłownik klapy dostępu powietrza II	Wyjściowy, analogowy 0÷10 V
AQ1	Siłownik klapy dostępu powietrza III	Wyjściowy, analogowy 0÷10 V
DI0	Czujnik indukcyjny zasuwy 1	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI1	Czujnik indukcyjny zasuwy 2	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI2	Czujnik indukcyjny zasuwy 3	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI3	Czujnik indukcyjny zasuwy 4	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI4	Czujnik indukcyjny zasuwy 5	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI5	Czujnik indukcyjny zasuwy 6	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI6	Czujnik pojemnościowy dolny zbiornika 1	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI7	Czujnik pojemnościowy górny zbiornika 1	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI8	Czujnik pojemnościowy dolny zbiornika 2	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI9	Czujnik pojemnościowy górny zbiornika 2	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI10	Czujnik pojemnościowy dolny podajnika kubelkowego	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI11	Czujnik pojemnościowy środkowy podajnika kubelkowego	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI12	Czujnik pojemnościowy górny podajnika kubelkowego	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI13	Wyłącznik bezpieczeństwa	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI14-DI15	-	-
DQ0	Silnik napędu kubelkowego	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ1	Silnik napędu ślimaka pochyłego	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ2	Silnik napędu ślimaka górnego	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ3	Wyjście zasuwy 1	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ4	Wyjście zasuwy 2	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ5	Wyjście zasuwy 3	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ6	Wyjście zasuwy 4	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ7	Wyjście zasuwy 5	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ8	Wyjście zasuwy 6	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ9-DQ15	-	-

Tab. 2. Lista wejść i wyjść dla modułów rozszerzeń ET 200SP 6ES7155-6AU01-0BN0

AI 4xRTD/TC 2-,3-,4-wire HF_1		
Nazwa portu	Nazwa elementu wykonawczego/pomiarowego	Sygnal
M0	Czujnik temperatury 1	Wejściowy, analogowy, rezystancyjny
M1	Czujnik temperatury 2	Wejściowy, analogowy, rezystancyjny
M2	Czujnik temperatury 3	Wejściowy, analogowy, rezystancyjny
M3	Czujnik temperatury 4	Wejściowy, analogowy, rezystancyjny
AI 4xRTD/TC 2-,3-,4-wire HF_2		
M0	Czujnik temperatury 5	Wejściowy, analogowy, rezystancyjny
M1	Czujnik temperatury 6	Wejściowy, analogowy, rezystancyjny
M2-M3	-	-
AI 4xU/I 2-wire ST_1		
U0	Falownik ślimaka odbioru materiału	Wejściowy, analogowy 0÷10 V
U1	Falownik wentylatora	Wejściowy, analogowy 0÷10 V
U2-U3	-	-
AQ 4xU/I ST_1		
Q0	Falownik ślimaka odbioru materiału	Wyjściowy, analogowy 4÷20 mA
Q1	Falownik wentylatora	Wyjściowy, analogowy 4÷20 mA
Q2	Sterownik mocy grzałki 1	Wyjściowy, analogowy 4÷20 mA
Q3	Sterownik mocy grzałki 2	Wyjściowy, analogowy 4÷20 mA
DI 8x24VDC HF_1		
DI0	Czujnik pojemnościowy zasypu suszarni Pa	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI1	Czujnik pojemnościowy zasypu suszarni Pb	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI2	Czujnik pojemnościowy zasypu suszarni Pc	Wejściowy, cyfrowy 24 V
DI3-DI7	-	-
DQ 8x24VDC/0.5A HF_1		
DQ0-DQ1	-	-
DQ2	Falownik ślimaka odbioru materiału	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ3	Falownik wentylatora	Wyjściowy, cyfrowy 24 V
DQ4-7	-	-
AQ 4xU/I ST_2		
Q0	Sterownik mocy grzałki 3	Wyjściowy, analogowy 4÷20 mA
Q1-Q3	-	-

Do dyspozycji pozostała następująca ilość wejść i wyjść:

- siedem wejść analogowych, z czego dwa służące do pomiaru rezystancji,
- trzy wyjścia analogowe,
- siedem wejść cyfrowych,
- jedenaście wyjść cyfrowych.

Niewykorzystane wejścia i wyjścia mogą posłużyć w dalszej modernizacji obiektu sterowania, na przykład podczas montażu czujników wilgotności. Jedno wejście i jedno wyjście analogowe zostanie wykorzystane do podłączenia trzeciego siłownika obsługującego wlot czynnika suszącego.

3.3.4. Panel HMI

Panel HMI służy do sterowania suszarnią konwekcyjną. Dzięki niemu operator wydaje polecenia wykonywane przez sterownik PLC oraz odbiera informacje na temat przebiegu procesu suszenia. Panel HMI jest połączony ze sterownikiem PLC siecią PROFINET.

Wybrany panel KTP400 Basic PN jest 4 calowym ekranem dotykowym, konfigurowalnym w środowisku TIA portal.

3.3.5. Falownik

Falownik musi być dobrany do silnika elektrycznego, którego obroty będzie regulował. Wybrany przemiennik częstotliwości serii iC5 015-1F dostosowany jest do pracy z silnikiem trójfazowym o mocy do 1,5 kW, co oznacza, że jest odpowiedni do regulowania silnika wentylatora o mocy 1,5 kW. Zasilany jest prądem jednofazowym o napięciu 230 V. Na wyjściu falownik zasilą silnik prądem trójfazowym o napięciu 230 V. Falownik ustawiono do pracy w zakresie od 0-60 Hz. Istnieje możliwość podwyższenia częstotliwości wyjściowej prądu do 400 Hz. Sygnał prądowy 4÷20 mA steruje zadaną przez falownik częstotliwością (trinics.pl) .

3.3.6. Podsumowanie wymagań stawianych przed układem sterującym

Zadaniem układu sterującego jest umożliwienie operatorowi suszarni obsługę maszyny. Operator zadaje wartości procesu, a układ sterujący przy pomocy elementów wykonawczych wykonuje polecenia. Dane uzyskane przy pomocy czujników informują o przebiegu procesu suszenia, a co za tym idzie umożliwiają dokładną regulację parametrów zadanych.

3.4. Dobór zasilacza

Zapotrzebowanie prądowe poszczególnych elementów stanowiska zasilanych napięciem stałym 24 V zostało odczytane z informacji od producenta danych elementów. Natomiast zapotrzebowanie prądowe modułów rozszerzeń odczytano przy pomocy internetowego narzędzia konfiguracyjnego firmy Siemens (mall.industry.siemens.com). Zapotrzebowania prądowe przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zapotrzebowanie prądowe elementów wykonawczych i pomiarowych

Lp.	Nazwa elementu	Zapotrzebowanie prądowe [A]	Ilość elementów	Sumaryczne zapotrzebowanie prądowe [A]
1.	Panel HMI	0,125	-	0,125
2.	ET 200SP z modułami	1	-	1
3.	Siłowniki klap dostępu powietrza	0,2	2	0,4
4.	Czujniki indukcyjne	0,3	6	1,8
5.	Czujniki pojemnościowe	0,3	10	3
6.	Cewki styczników silników napędów	0,2	3	0,6
7	Cewki sterujące silnikami pneumatycznymi	0,1875	6	1,125
Sumaryczny pobór mocy wszystkich elementów				8,05

Elementy potrzebują zasilania prądem stałym o napięciu równym 24 V. Maksymalna sumaryczna moc elementów obliczona została ze wzoru:

$$P = U * I; \quad (1)$$

Gdzie:

P – moc grzałki,

U – napięcie prądu zasilającego grzałkę,

I – prąd pobierany przez grzałkę.

$$P = 24 * 8,05 = 193,2[W]$$

Do zasilenia stanowiska wybrano zasilacz o mocy 480 W. Jest wystarczający do zasilenia wszystkich elementów konwekcyjnej suszarni daszkowej.

3.5. Wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań maszyn (Dz. U. nr 199 z 2008 r., poz. 1228) laboratoryjna suszarnia konwekcyjna powinna spełniać przedstawione poniżej wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym:

1. Należy przeprowadzić ocenę ryzyka i określić wymagania w zakresie bezpieczeństwa.
2. Konstrukcja suszarni powinna być tak zaprojektowana, żeby wszelkie czynności związane z obsługą, regulacją i konserwacją maszyny nie stwarzały zagrożenia.
3. Należy przewidzieć niewłaściwe sposoby użycia urządzenia oraz im zapobiegać.
4. Układ sterowania musi gwarantować bezpieczeństwo. Powinien przeciwdziałać możliwości zaistnienia niebezpiecznych zdarzeń.
5. Uszkodzenia układu sterującego oraz awarie oprogramowania nie mogą powodować zagrożeń.
6. Błędy w układzie logicznym i ludzkie nie mogą stwarzać sytuacji niebezpiecznych.
7. Uruchamianie suszarni może odbywać się tylko w jasno określony sposób. Rozkaz zatrzymania musi oznaczać bezwzględne zatrzymanie obiektu.
8. Elementy sterujące muszą być zlokalizowane w widocznym, bezpiecznym miejscu.
9. Uruchomienie obiektu powinno być każdorazowo sygnalizowane sygnałem ostrzegawczym.

10. Suszarnia uruchomiona może zostać tylko i wyłącznie w sposób zamierzony.
11. Obiekt sterowania musi zostać wyposażone w urządzenie sterujące pozwalające na bezpieczne zatrzymanie maszyny. Jeżeli z przyczyn technologicznych nie może dojść do zatrzymania elementu wykonawczego, należy zastosować przycisk awaryjny odpowiedzialny za zatrzymanie tego elementu.
12. Suszarnia musi posiadać przycisk awaryjnego zatrzymania.
13. Część programu sterowania odpowiedzialna za awaryjne zatrzymanie maszyny jest priorytetowa. Części programu sterujące procesem są równe wobec siebie.
14. Zanik zasilania nie może prowadzić do powstania zagrożenia.
15. Zasilanie suszarni powinno być widoczne. Odłączenie zasilania nie powinno sprawiać żadnych trudności.

3.6. Określenie poziomu ryzyka

Ocenę poziomu ryzyka dla laboratoryjnej suszarni konwekcyjnej wykonano poprzez wyznaczenie poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa SIL dla następujących zagrożeń:

1. Oparzenie spowodowane dotknięciem gorących elementów.
2. Porażenie prądem elektrycznym.

3.6.1. Oparzenie spowodowane dotknięciem gorących elementów

Grzałki elektryczne mogą rozgrzać się do wysokich temperatur. Przy kontakcie rozgrzanego elementu ze skórą człowieka może dojść do oparzenia i stopnia. Ciężkość tej szkody można ocenić na $Se=1$, ponieważ oparzenie takie jest odwracalne, a niewielka powierzchnia oparzenia sprawia, że nie potrzeba interwencji medyka. Parametr częstotliwości i czasu przebywania w zagrożeniu można ocenić na $Fr=4$. Uzależniony jest od ilości przeprowadzanych procesów suszenia. Prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji zagrożenia jest na poziomie rzadkim – parametr Pr wynosi 2. Podczas procesu suszenia nie ma konieczności poruszania się w pobliżu gorących elementów. Grzałki zabezpieczono specjalnymi osłonami ograniczającymi dostęp do nich. Możliwość uniknięcia zdarzenia Av można ocenić na 1, uniknięcie zdarzenia jest prawdopodobne. Aby określić poziom nienaruszalności SIL posłużono się wzorem (Tomkiewicz i inni, 2016):

$$Cl = Fr + Pr + Av; \quad (2)$$

Gdzie:

Cl – klasa narażenia,

Fr – parametr częstotliwości,

Pr – parametr prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji zagrożenia,

Av – parametr możliwości uniknięcia zagrożenia.

Klasa narażenia dla oparzenia spowodowanego dotknięciem gorących elementów wynosi:

$$Cl = 4 + 2 + 1 = 7;$$

Po przypisaniu do matrycy SIL klasy Cl oraz ciężkości zdarzenia Se otrzymujemy poziom SIL dla funkcji bezpieczeństwa suszarni daszkowej. Dla oparzenia spowodowanego dotknięciem gorących elementów otrzymujemy SIL 1 (Tomkiewicz i inni, 2016).

3.6.2. Porażenie prądem elektrycznym

Suszarnia daszkowa zasilana jest trójfazowym prądem przemiennym o napięciu 230 V i częstotliwości 50 Hz. Silniki elektryczne trójfazowe korzystają z prądu trójfazowego. Sterownik PLC, zasilacz, falowniki oraz grzałki elektryczne wraz ze sterownikami mocy oraz zasilane są prądem jednofazowym. Pozostałe urządzenia zasilane są prądem stałym 24 V otrzymanym z zasilacza. Urządzenie to jest wyposażone w zabezpieczenia przeciwprzepięciowe i przeciążeniowe. Głównym zagrożeniem dla człowieka jest prąd przemienny, ciężkość szkody można określić na Se równe 4. Częstotliwość i czas przebywania w zagrożeniu uzależniony jest od ilości i długości przeprowadzonych procesów suszenia, można go ocenić na Fr=4. Wszystkie przewody zostały zabezpieczone, a szafę elektryczną zamknięto. Operator nie powinien jej otwierać, jeżeli urządzenie jest podłączone do prądu. z tego powodu prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji zagrożenia oceniono na nieistotne, Pr=1. Niestety jeśli dojdzie do sytuacji niebezpiecznej, nie ma możliwości jej uniknięcia (Av=5). Klasa narażenia Cl dla porażenia prądem elektrycznym wynosi:

$$Cl = 4 + 1 + 5 = 10$$

Po przypisaniu do matrycy SIL otrzymanej wartości Cl otrzymujemy funkcję bezpieczeństwa SIL na poziomie SIL 2. Aby ograniczyć niebezpieczeństwo na maszynie zamontowano symbole ostrzegawcze.

3.7. Podsumowanie

Rozdział trzeci opisuje wymagania stawiane przed poszczególnymi układami suszarni daszkowej. Dzięki analizie wymagań możliwe było wybranie elementów wykonawczych, pomiarowych oraz sterujących. Zostały określone wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym. Na końcu rozdziału przedstawiono ocenę ryzyka. Największe zagrożenie

niesie ze sobą możliwość porażenia prądem, która jest niemal nieprawdopodobna przy prawidłowej obsłudze suszarni.

4. PROJEKT STANOWISKA

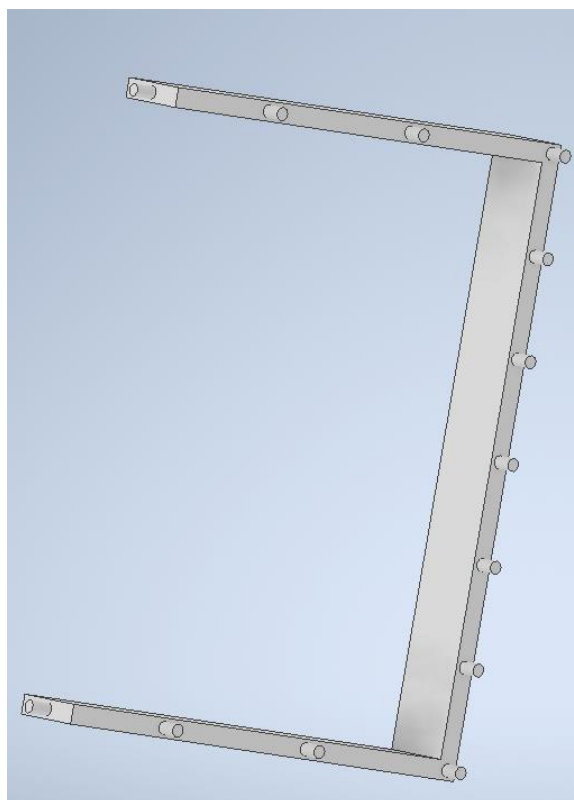
Rozdział czwarty przedstawia dokładny opis wybranych wariantów w rozdziale trzecim wraz ze schematami połączeniowymi. Przedstawiono w nim wszelkie wykonane modyfikacje stanowiska. Na końcu rozdziału zaprojektowano układy sterowania temperaturą, zasypem suszarni oraz ruchem czynnika suszącego. Rysunki wykonawcze i złożeniowe załączono w załącznikach od 1 do 3 pracy na płycie CD. Schematy elektryczne znajdują się w załączniku 4 (Bednarowski, 2020), a schemat pneumatyczny w załączniku 5.

4.1. Elementy modyfikujące stanowisko

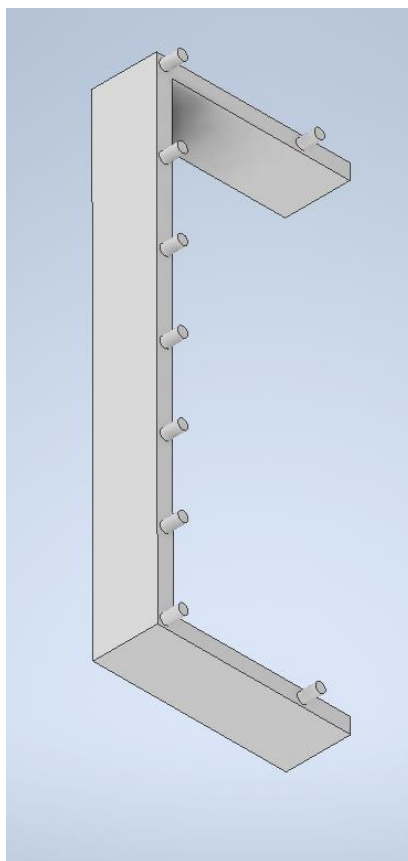
Podczas procesu montażu zaistniała potrzeba wykonania osłon wlotu powietrza, mocowań czujników pojemnościowych wysokości materiału, oraz przejściówek montażowych przewodu odprowadzającego czynnik suszący. Wszystkie te elementy zaprojektowano przy pomocy oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2021 i wykonane w technologii druku 3D.

4.1.1. Zabezpieczenia wlotów powietrza

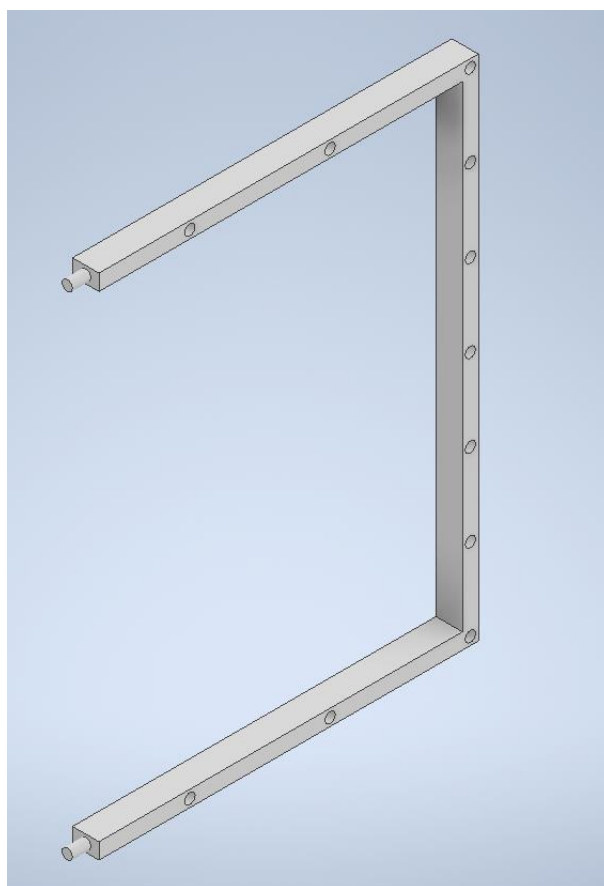
Zabezpieczenia wlotów powietrza składają się z czterech elementów drukowanych, oraz metalowej siatki. Elementy drukowane przedstawiono na rysunkach 12-15.



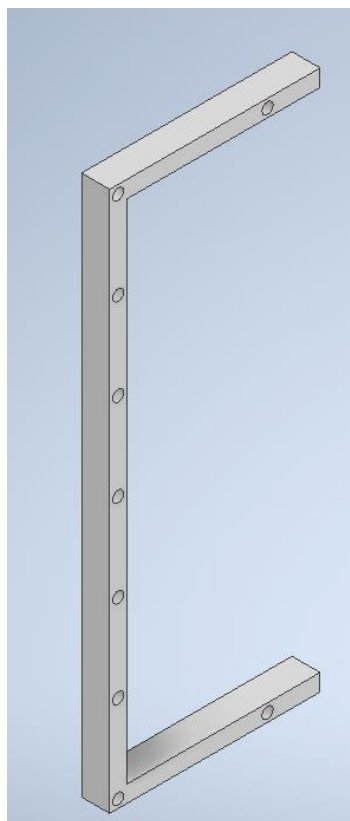
Rys. 12. Część pierwsza wlotu powietrza (opracowanie własne)



Rys. 13. Część druga wlotu powietrza (opracowanie własne)



Rys. 14. Część trzecia wlotu powietrza (opracowanie własne)



Rys. 15. Część czwarta wlotu powietrza (opracowanie własne)

Części pierwsza i druga oraz trzecia i czwarta łączą się ze sobą dzięki specjalnie wykonanym otworom na wcisk. Pomiędzy złączonymi elementami zamontowano metalową siatkę. Następnie elementy zostały połączone ze sobą. Wygląd zabezpieczenia przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Złożone zabezpieczenie wlotu powietrza (opracowanie własne)

Zabezpieczenie nakładane jest na wloty powietrza na wcisk. Zabezpieczony wlot powietrza został przedstawiony na rys. 17.

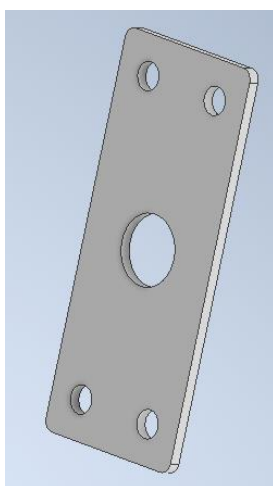


Rys. 17. Zamontowane zabezpieczenie wlotu powietrza (opracowanie własne)

Wykonano i zamontowano trzy takie zabezpieczenia, po jednym na każdy wlot powietrza.

4.1.2. Mocowania czujników pojemnościowych

Podczas montażu czujników pojemnościowych zaistniała potrzeba wykonania elementu montażowego. Element przedstawiono na rys. 18.

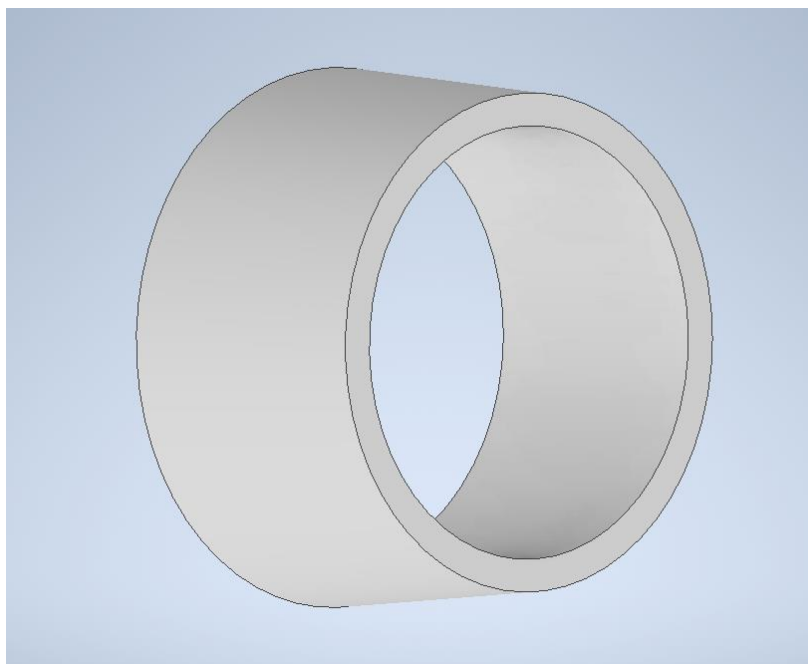


Rys. 18. Element mocujący czujnik pojemnościowy (opracowanie własne)

Czujnik mocowany jest w elemencie mocującym przy pomocy dwóch nakrętek. Element montażowy przykręcany jest do obudowy suszarni, dzięki czemu możliwa jest konserwacja i demontaż czujnika. Wykonano 3 takie elementy montażowe.

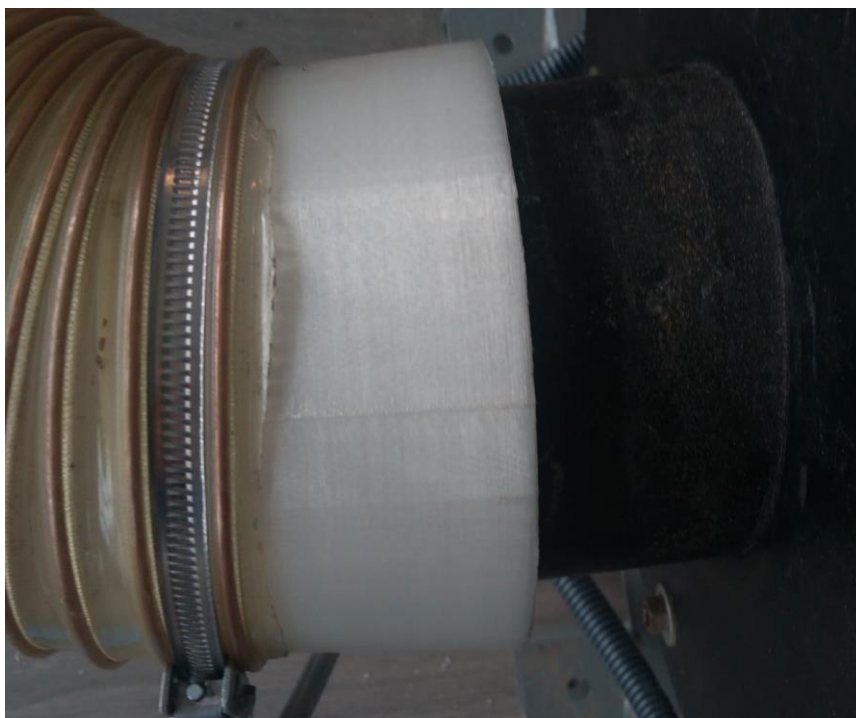
4.1.3. Przejściówki montażowe przewodu odprowadzającego czynnik suszący

Przewód odprowadzający powietrze z suszarni ma znacznie większą średnicę wewnętrzną od średnicy zewnętrznej wejścia wentylatora i wyjścia czynnika suszącego suszarni. Średnica wewnętrzna przewodu wynosi 128 mm, a średnice zewnętrzne wejścia wentylatora i wyjścia suszarni 109 mm. z tego powodu konieczne było zaprojektowanie dwóch przejściówek przedstawionych na rys. 19.



Rys. 19. Przejściówka podłączeniowa przewodu odprowadzającego czynnik suszący (opracowanie własne)

Przejściówki te to ścięte skorupy stożka, dzięki temu mają rozmiar zapewniający szczelny montaż przewodu odprowadzającego czynnik suszący. Zamontowany element przedstawiono na rysunku 20.



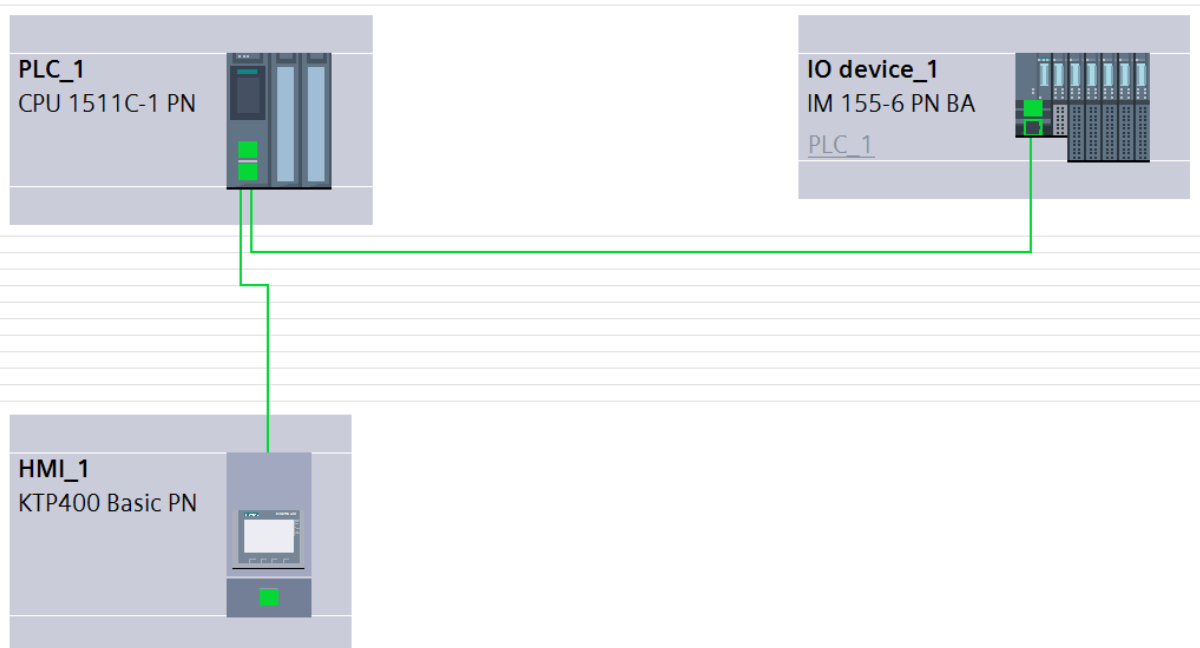
Rys. 20. Połączenie wejścia wentylatora z przewodem odprowadzającym powietrze (opracowanie własne)

4.2. Podłączenie elementów sterujących do zasilania

Schematy elektryczne zasilania elementów sterujących wykonano przy pomocy oprogramowania Easy EDA. Znajdują się w załączniku do pracy inżynierskiej na płycie CD. Sterownik PLC zasilony został według zaleceń producenta jednofazowym prądem przemiennym o napięciu 230 V 50 Hz. Interfejs ET 200SP, zamontowane rozszerzenia oraz panel HMI zasilono z wybranego w rozdziale 3.5 zasilacza, prądem stałym o napięciu 24 V. Sterowniki mocy Lumel RP7 i falowniki serii iC5 015-1F zasilono jednofazowym prądem przemiennym 230 V 50 Hz.

4.3. Połączenie sterownika, modułu ET 200SP, panelu HMI siecią PROFINET

Sterownik, moduł ET 200SP oraz panel HMI połączono siecią PROFINET przy pomocy kabla Ethernet. Konfigurację sieci przedstawiono w rozdziale 5.1, 5.2 i 5.3 Sposób podłączenia przedstawiono przy pomocy środowiska TIA Portal V15.1 – rys. 21.



Rys. 21. Wygląd topologii połączenia sterownika, panelu i modułu rozszerzeń (opracowanie własne)

Panel HMI połączony jest do portu 1 sterownika PLC. Port 2 sterownika połączony jest z portem 1 modułu rozszerzeń. Konfiguracja urządzeń odbywa się po podłączeniu kabla Ethernet do portu 2 modułu rozszerzeń.

4.4. Podłączenie czujników i elementów wykonawczych

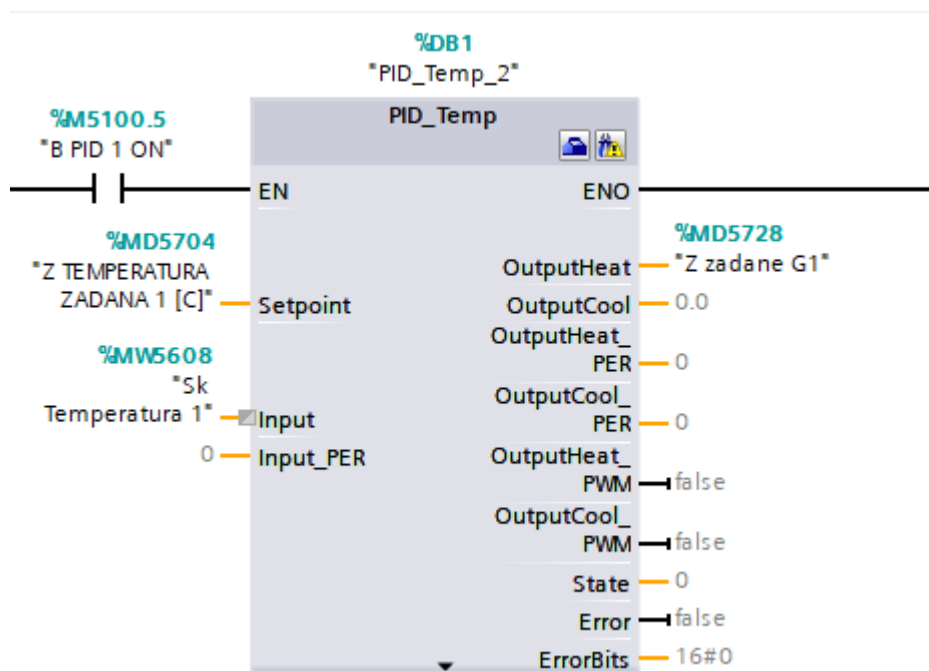
Schemat pneumatyczny poruszania zasuwami wykonano przy pomocy oprogramowania Festo Fluidsim pneumatic. Schematy elektryczne podłączenia czujników i elementów wykonawczych zrobiono przy pomocy oprogramowania Easy EDA i załączone na nośniku CD. W rozdziale 3.4.3 w tabelach 2 i 3 przedstawiono połączenia urządzeń i instrumentów pomiarowych do poszczególnych portów sterownika i modułów rozszerzeń wraz z opisem sygnału.

Czujniki pojemnościowe mierzące poziom materiału oraz cewki rozdzielaczy siłowników zasuw zasilono z zasilacza. Czujniki PT100 są czujnikami rezystancyjnymi, nie wymagają zasilania. Grzałki elektryczne podłączono do sterowników mocy Lumel RP7, silnik wentylatora i ślimaka odbierającego materiał do falownika serii iC5 015-1F.

Rozdzielacze pneumatyczne zostały zasilone sprężonym powietrzem, które odcinane jest ręcznym zaworem dwupołożeniowym. Ciśnienie powietrza regulowane jest zaworem redukującym z manometrem. Zawór ten wyregulowano na ciśnienie wynoszące 2 bary.

4.5. Układ sterowania temperaturą

Zadaniem układu sterowania temperaturą jest regulacja temperatury czynnika suszącego podczas suszenia materiału. Dla każdej z trzech sekcji suszarni temperatura regulowana jest indywidualnie. Pojedynczy układ sterowania temperaturą składa się z czujnika temperatury PT100, sterownika mocy Lumel RP7 i grzałki elektrycznej. Układ sterowany jest przy pomocy programu napisanego w języku drabinkowym. Kluczową funkcję w programie pełni regulator PID. Reguluje on sygnał sterujący sterownikiem mocy – rys. 22.

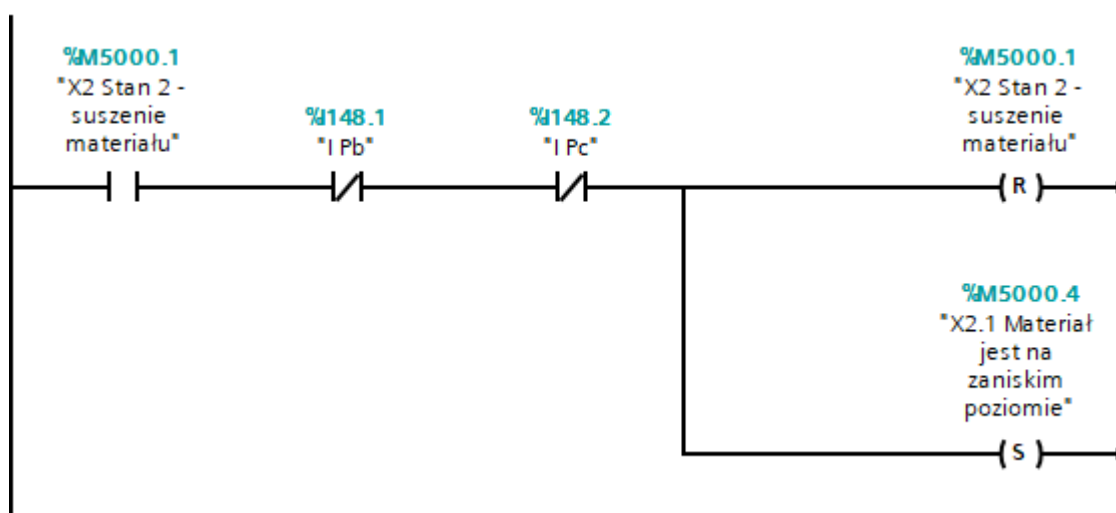


Rys. 22. Regulator temperatury PID (opracowanie własne)

Regulator PID steruje temperaturą czynnika suszącego wysyłając sygnał sterujący do sterownika mocy. Sygnał sterujący zależy od temperatury zmierzonej przez czujnik temperatury PT100. W zależności od wartości sygnału sterującego sterownik mocy, zmienia moc dostarczaną do grzałki. Temperatura regulowana jest jedynie w stanie suszenia materiału. W pozostałych stanach regulator pozostaje wyłączony, a sygnał sterujący sterownikiem mocy przyjmuje wartość 0. Minimalna wartość temperatury zadanej wynosi 20°C, a maksymalna 80°C. Jeżeli operator wpisze zbyt dużą temperaturę, program automatycznie wybierze wartość zadaną równą 80°C, to samo dotyczy dolnej granicy wartości zadanej. Uzyskano to dzięki programowi, którego fragment przedstawiono na rys 23.

Podczas stanu ładowania materiału są uruchomione wszystkie elementy transportujące materiał. Prędkość ślimaka odbierającego materiał jest maksymalna. Materiał pobierany jest z jednego ze zbiorników. Zasuwa wyjścia suszarni jest zamknięta. Wilgotny materiał trafia do komory suszarniczej, dopóki wszystkie czujniki pojemnościowe poziomu materiału nie przejdą w stan wysoki.

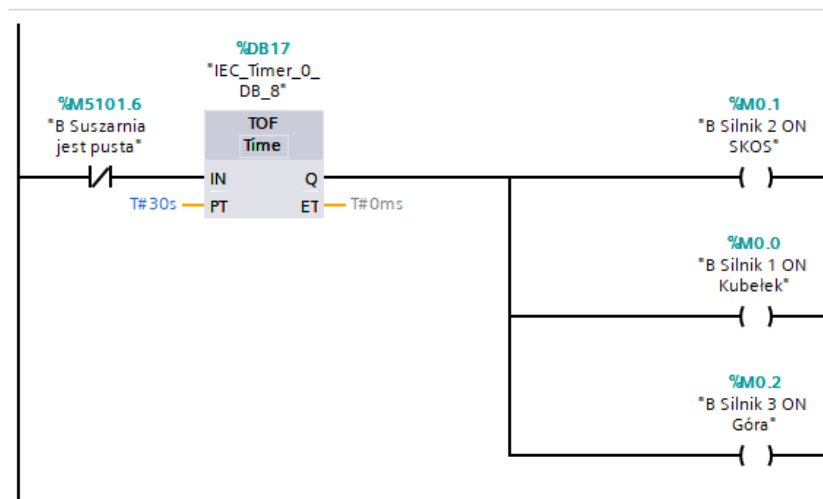
Po uruchomieniu stanu suszenia materiału zasuw suszarni otwarta się, a materiał jest z niej odbierany przy pomocy ślimaka z prędkością wybraną przez operatora. Materiał porusza się w obiegu zamkniętym. Jeżeli czujniki poziomu Pb i Pc przestaną wykrywać materiał, uruchomiony zostanie stan uzupełniający materiał – rys. 25.



Rys. 25. Fragment programu sterującego stanami suszarni (opracowanie własne)

Podczas stanu uzupełniającego materiał w suszarni zasuw suszarni jest zamknięta. Materiał wilgotny pobierany jest z wybranego zbiornika i dostarczany do suszarni, do momentu aż wszystkie pojemnościowe czujniki nie wykryją materiału.

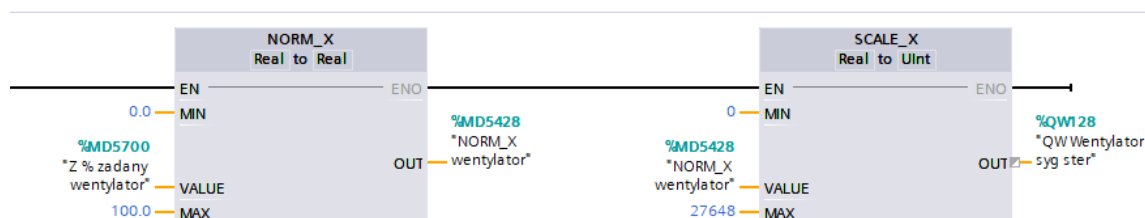
Gdy stan suszenia się zakończy program uruchomi stan opróżniania suszarni. W tym stanie transport materiału działa, dopóki materiał wykrywany jest przez czujniki zamontowane w suszarni oraz przy napędzie kubełkowym. Wyszuszony materiał kierowany jest do jednego ze zbiorników bądź wyjścia wyładunkowego. Wyłączenie transportu materiału zachodzi z 30 sekundowym opóźnieniem, aby mieć pewność, że materiał nie pozostał w elementach transportujących – rys. 26.



Rys. 26. Opóźnienie wyłączenia silników w stanie rozładunku suszarni (opracowanie własne)

4.7. Układ sterowania prędkością czynnika suszącego

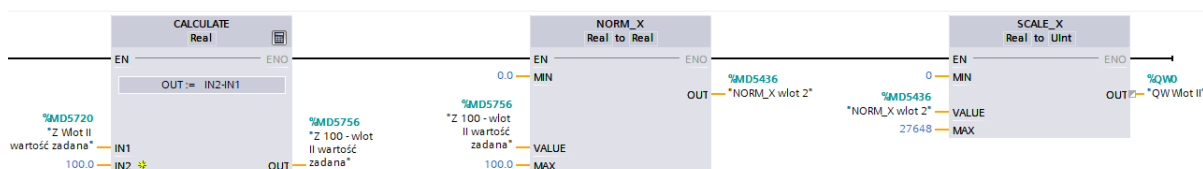
Układ sterowania czynnikiem suszącym składa się z wentylatora sterowanego falownikiem oraz siłowników elektrycznych ustalających pozycję zasuw dla drugiego i trzeciego wlotu powietrza. Pierwszy wlot nie posiada zamontowanego siłownika. Prędkość wentylatora poruszającym czynnikiem suszący jest sterowany przy pomocy programu przedstawionego na rys. 27.



Rys. 27. Program sterujący prędkością wentylatora (opracowanie własne)

Operator zadaje prędkość wentylatora w stanie suszenia materiału przy pomocy panelu HMI. Prędkość zadana może wynosić od 0 do 100, gdzie 100 to prędkość maksymalna. Wartość zadana przeliczana jest na sygnał sterujący falownikiem, przyjmujący wartość 4÷20 mA. w stanie jałowym i ładowania materiału wentylator jest wyłączony, a w stanach uzupełniającym materiał oraz w stanie rozładunku działa z maksymalną prędkością.

Stopień otwarcia wlotów jest sterowany przy pomocy programu przedstawionego na rys. 28.



Rys. 28. Program sterujący stopniem otwarcia wlotu II (opracowanie własne)

Wartość zadana wlotu jest przeliczana na sygnał sterujący siłownikiem elektrycznym 0÷10 V. Podczas stanu suszenia materiału stopień otwarcia wlotu powietrza podawany jest przez operatora suszarni przy pomocy dotykowego panelu HMI. Wartość maksymalnego otwarcia wlotu otrzymujemy przy zadaniu wartości 100. Wlot zamyka się przy wartości zadanej równej 0. Podczas stanu jałowego, ładowania materiału, uzupełniania materiału oraz wyładunku wlot jest maksymalnie otwarty.

4.8. Podsumowanie

Podczas pracy wykonano połączenia elektryczne urządzeń i czujników oraz schematy elektryczne przy użyciu oprogramowania Easy EDA. Zrealizowano połączenia pneumatyczne oraz wykonano schemat pneumatyczny przy pomocy oprogramowania Festo Fluidsim pneumatic. Wszystkie elementy wykonawcze oraz pomiarowe podłączono do sterownika oraz modułu ET 200SP. Moduł ET 200SP oraz panel HMI połączono ze sterownikiem przy użyciu kabla Ethernet. Wykonano układy sterowania temperaturą, wysokością materiału oraz ruchem czynnika suszącego.

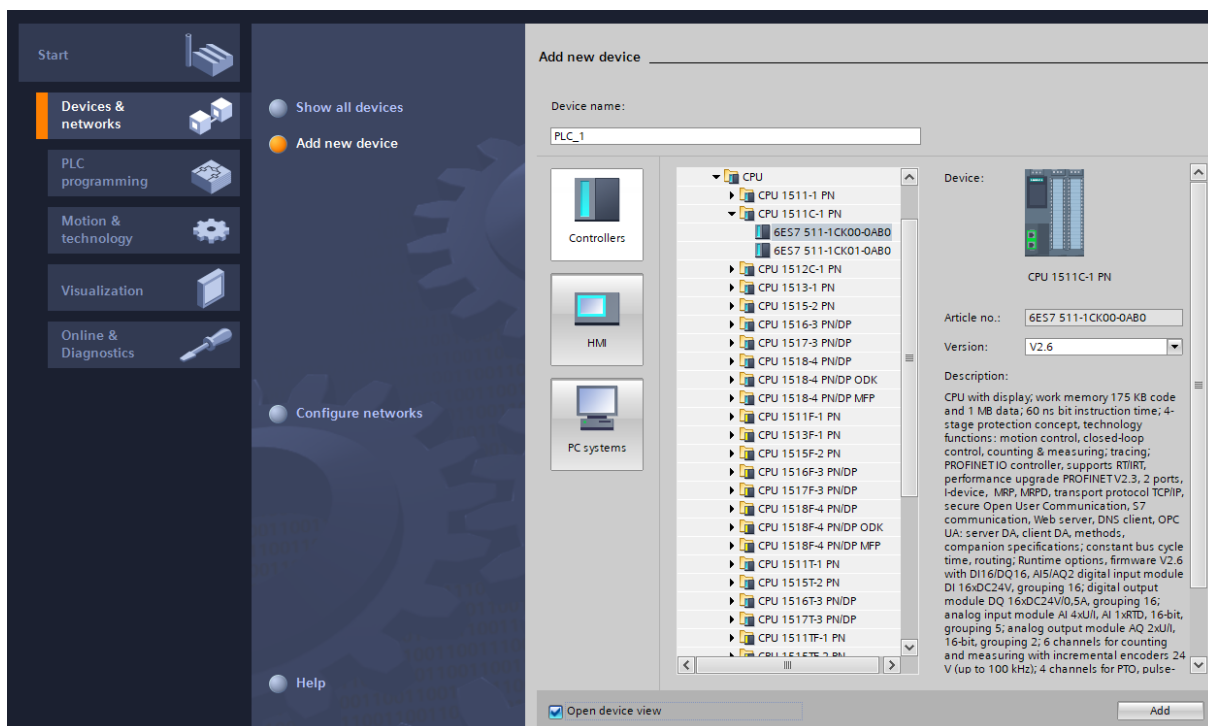
Przy użyciu oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2021 zaprojektowano osłony wlotu powietrza, mocowania czujników pojemnościowych oraz przejściówki montażowe przewodu odprowadzającego czynnik suszący. Elementy wydrukowano w technologii druku 3D przy pomocy drukarki Creality Ender-5.

5. PROGRAM STERUJĄCY LABORATORYJNĄ SUSZARNIĄ KONWEKCYJNĄ

W rozdziale czwartym opisano zrealizowaną konstrukcję stanowiska dydaktycznego. Przedstawiono zastosowane układy sterujące procesem suszenia, sposób podłączenia urządzeń, wraz ze schematami elektrycznymi, oraz dodane elementy drukowane z rysunkami technicznymi. W rozdziale piątym opisany jest program sterujący weryfikujący możliwości dydaktyczne stanowiska związane z nauczaniem programowania sterowników komputerowych. Wielkości zadawane są przez operatora maszyny. W trakcie trwania procesu suszenia możliwe jest wcześniejsze zakończenie oraz zmiana parametrów suszenia. Na początku rozdziału znajduje się konfiguracja sterownika, modułów rozszerzeń oraz panelu HMI. Program napisano w środowisku TIA Portal V15.1. Rozdział ten jest także instrukcją korzystania ze stanowiska przeznaczoną dla studentów. Program sterowania załączono do pracy na płycie CD w formacie pdf – załącznik 6, oraz w formacie projektu TIA Portal V15.1 – załącznik 7.

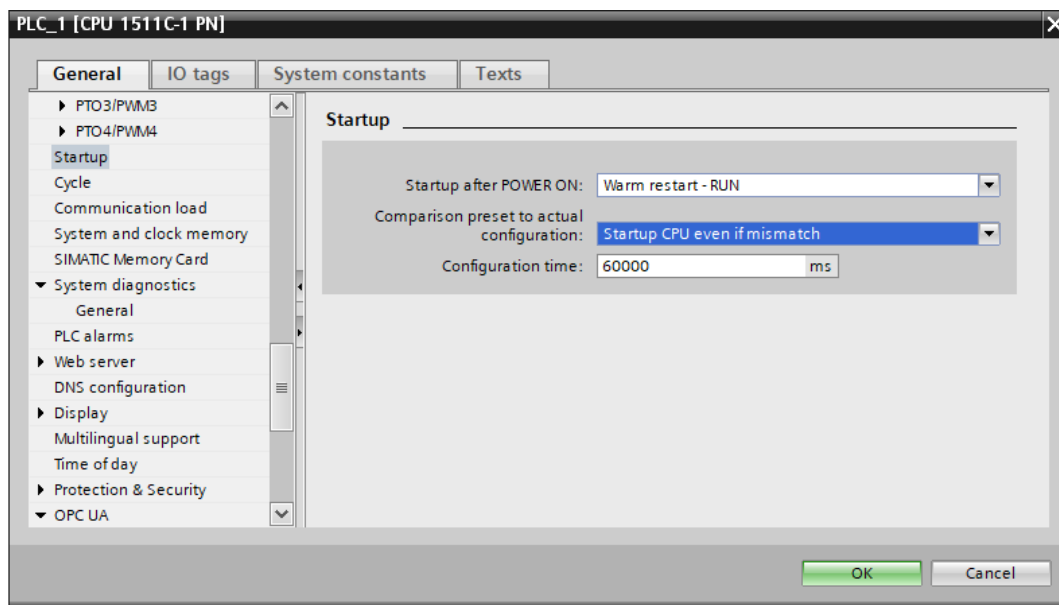
5.1. Konfiguracja sterownika

Po utworzeniu nowego projektu w programie TIA Portal V15.1 należy wybrać sterownik PLC, który będziemy używać. Wybrany sterownik to S7-1500 CPU 1511C-1 PN (6ES7511-1CK00-0AB0). Podczas wyboru sterownika w programie możliwe jest sprawdzenie opisu jego parametrów. Ekran wyboru sterownika przedstawiono na rys. 29.



Rys. 29. Wybór sterownika PLC w oprogramowaniu TIA Portal V15.1 (opracowanie własne)

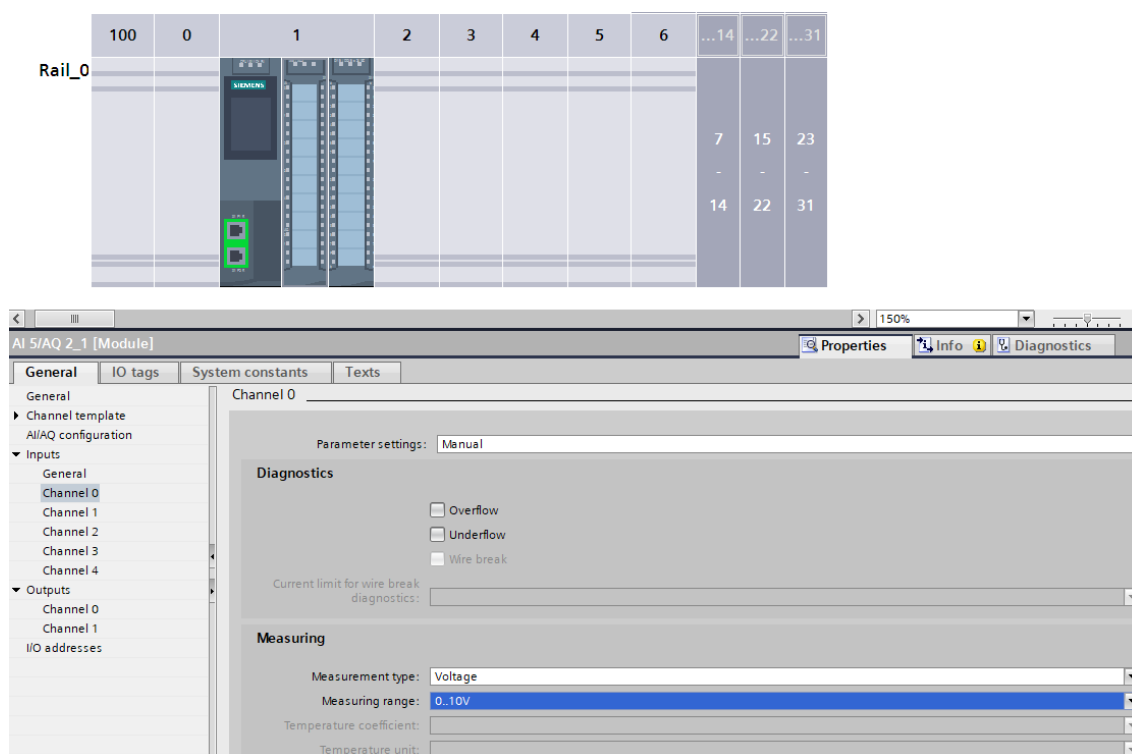
Wybrana najnowszą wersja oprogramowania V2.6 w pasku wyboru Version. Dalsza konfiguracja nastąpi po uruchomieniu widoku projektu. w panelu właściwości sterownika ustawiono opcja włączenia sterownika: Warm restart – RUN. Powyższe działanie przedstawiono na rys. 30.



Rys. 30. Konfiguracja startu sterownika (opracowanie własne)

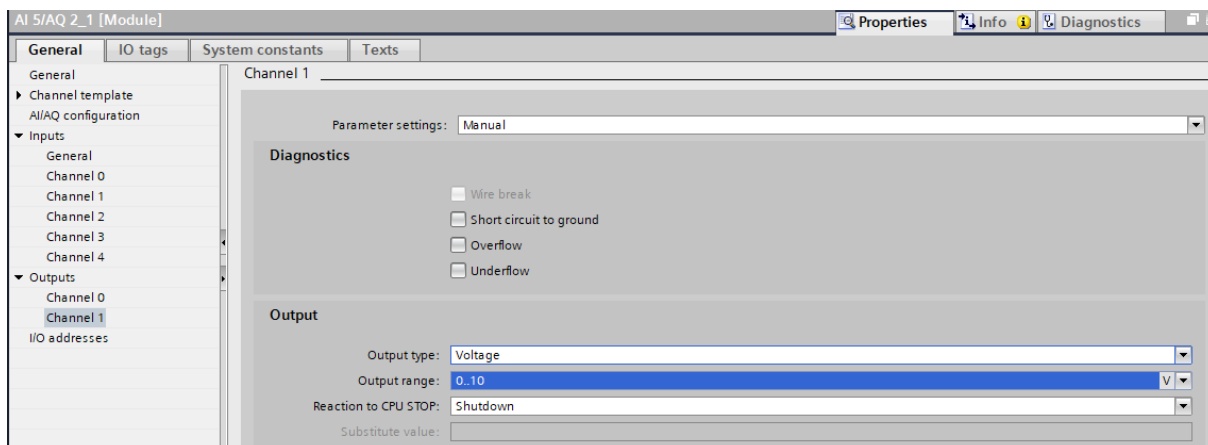
Dzięki wybraniu opcji Warm restart – RUN, po wyłączeniu zasilania sterownika, a następnie ponownym włączeniu, sterownik przejdzie w tryb gotowości do działania RUN. Domyślnie sterownik po zaniku zasilania przechodzi w tryb STOP.

Ostatnim krokiem jest konfiguracja wejść i wyjść analogowych. Wejścia analogowe dostosowano do sygnału 0÷10 V sprzężenia zwrotnego siłownika kłapy dostępu powietrza. W ten sposób skonfigurowano Channel 0 i 1 sterownika – rys. 31.



Rys. 31. Konfiguracja wejść analogowych sterownika PLC

Wyjścia analogowe sterownika dostosowano do sygnału potrzebnego do sterowania siłownikami kłap, którego zakres wynosi 0÷10 V. Wykorzystano do tego kanały 0 i 1 – rys. 32.

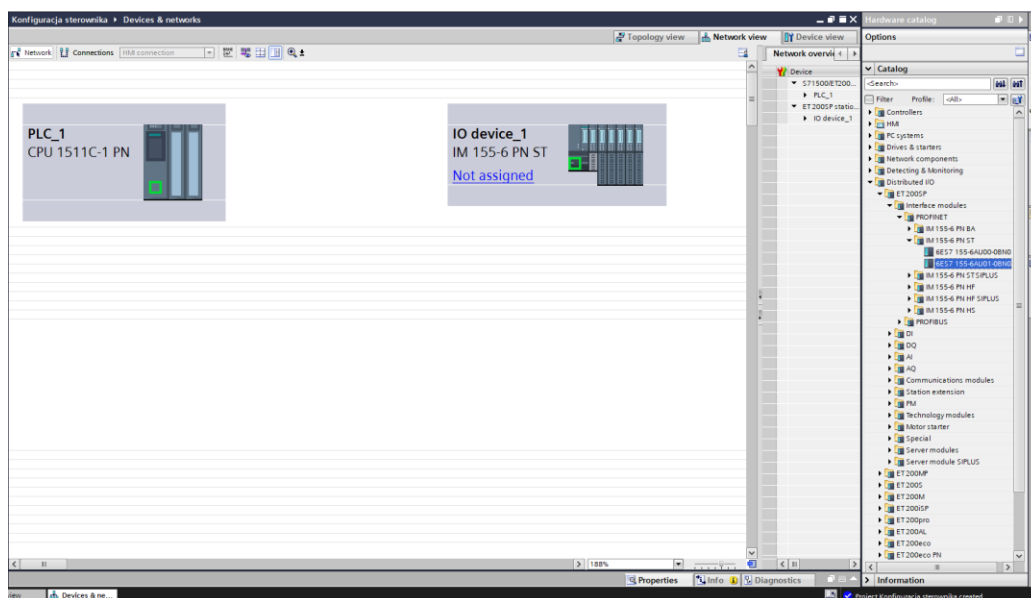


Rys. 32. Konfiguracja wyjść analogowych sterownika

Po wykonaniu wszystkich powyższych czynności sterownik został poprawnie skonfigurowany, a wyjścia i wejścia dostosowane do urządzeń do nich podłączonych.

5.2. Konfiguracja modułów rozszerzeń

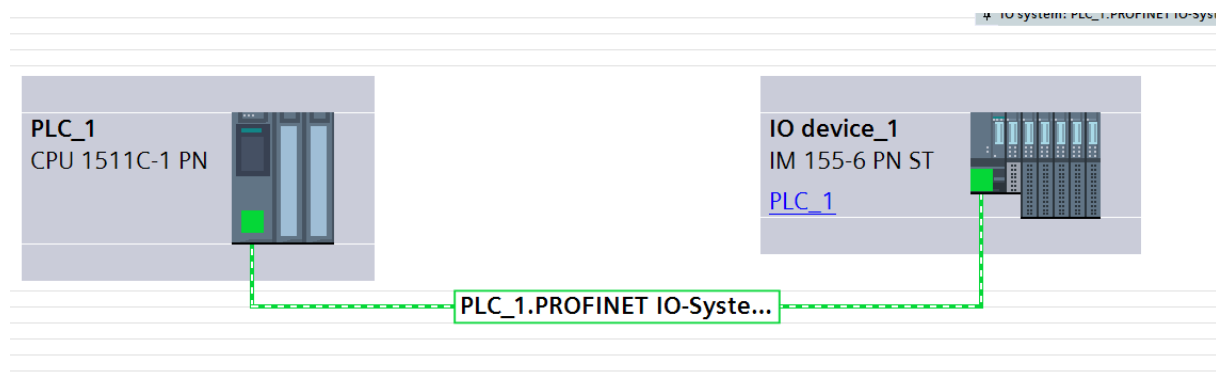
Po konfiguracji sterownika PLC należy przeprowadzić konfigurację modułów rozszerzeń. Pierwszą czynnością jest przejście do ekranu Devices & networks. Z katalogu urządzeń znajdującego się po prawej stronie ekranu należy wybrać moduł interfejsu ET 200SP IM 155-6 PN ST interface module (6ES7155-6AU01-0BN0). Wybór przedstawiono na rys. 33.



Rys. 33. Dodanie modułu ET 200SP do projektu (opracowanie własne)

Następnie urządzenia połączono ze sobą przy pomocy sieci PROFINET. W programie wykonywane jest to poprzez przeciągnięcie kursora pomiędzy wejściami kabla

Ethernet symbolizowanymi zielonymi prostokątami na grafikach urządzeń. Poprawne podłączenie przedstawia rysunek 34.



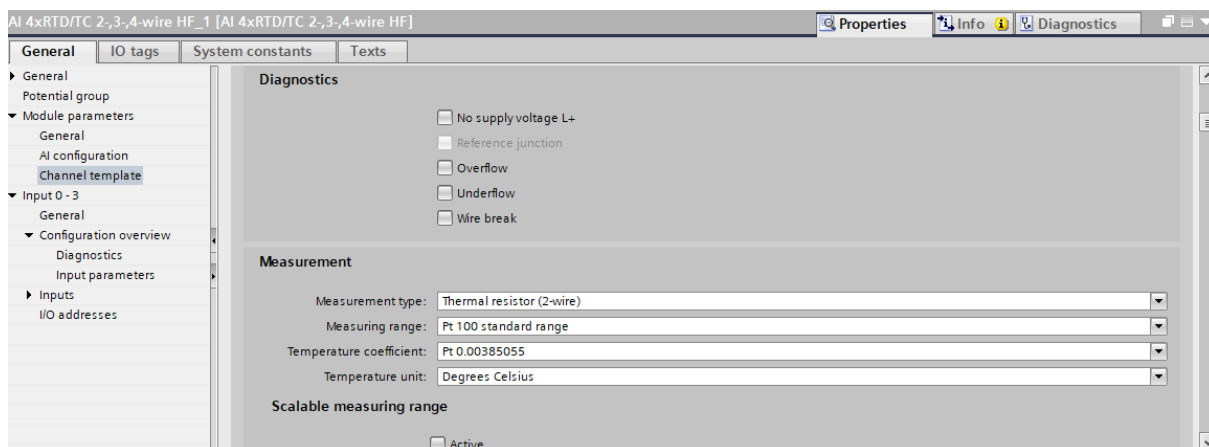
Rys. 34. Połączenie ze sobą urządzeń siecią PROFINET (opracowanie własne)

Kolejnym krokiem jest dodanie modułów rozszerzeń. w zakładce Ungrouped devices wybieramy moduł komunikacyjny. Następnie dodajemy wymagane rozszerzenia z katalogu, w kolejności takiej, jakiej zostały zainstalowane – rys. 35.



Rys. 35. Dodane moduły rozszerzeń do interfejsu ET 200SP (opracowanie własne)

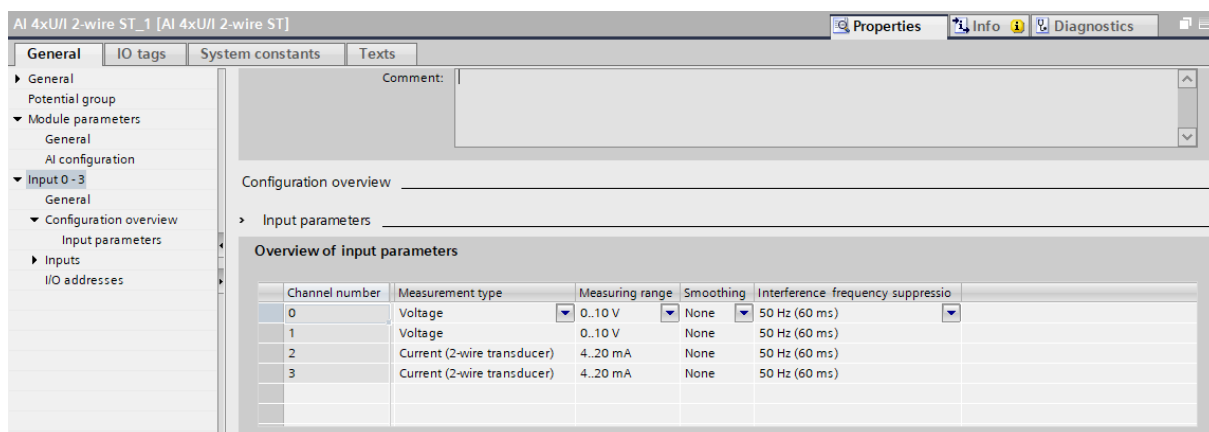
Kolejnym krokiem jest skonfigurowanie wejść i wyjść analogowych. Na początku skonfigurowano wszystkie wejścia modułów AI 4xRTD/TC. Podłączono do nich czujniki temperatury PT100. Sposób konfiguracji przedstawiono dla pierwszego modułu – rys. 36.



Rys. 36. Konfiguracja wejść temperaturowych (opracowanie własne)

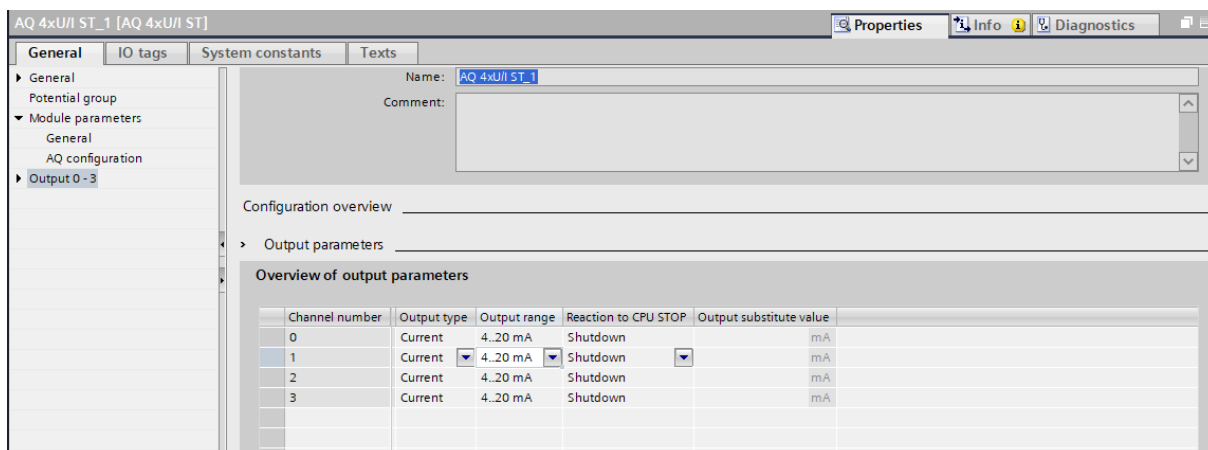
W zakładce Module parameters, wybrano opcje konfiguracji wszystkich wejść – Channel template. w części Measurement wybrano typ pomiaru – rezystor termalny podłączony dwuprzewodowo. Zakres pomiaru ustawiono na standardowy zakres czujników PT100, a jednostkę pomiaru na stopnie Celsjusza. Pozostałe parametry zostały niezmienione.

Kanały 0 i 1 modułu wejść analogowych dostosowano do sygnałów wysyłanych przez falowniki – rys 37.



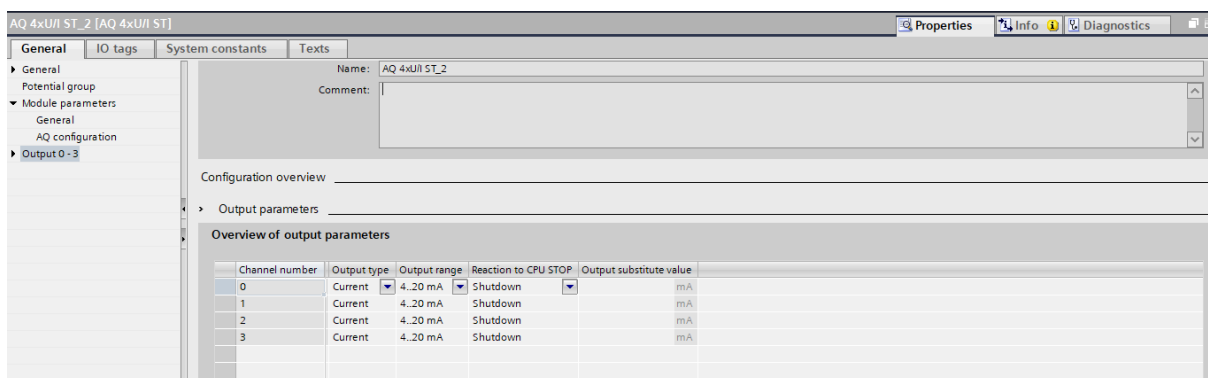
Rys. 37. Konfiguracja AI 4xU/I 2-wire ST (opracowanie własne)

Kanały modułu wyjść analogowych AQ 4xU/I ST_1 skonfigurowano następująco. Kanał 0 i 1 dostosowano do sygnałów obsługujących falowniki, a kanały 2 i 3 do sygnałów odpowiednich dla grzałek – rys 38.



Rys. 38. Konfiguracja modułu wejść analogowych AQ 4xU/I ST_1 (opracowanie własne)

Jako ostatnie skonfigurowano wyjścia analogowe AQ 4xU/I ST_2. Kanał 0 obsługujący grzałkę skonfigurowano do wysyłania sygnału 4÷20 mA – rys. 39.

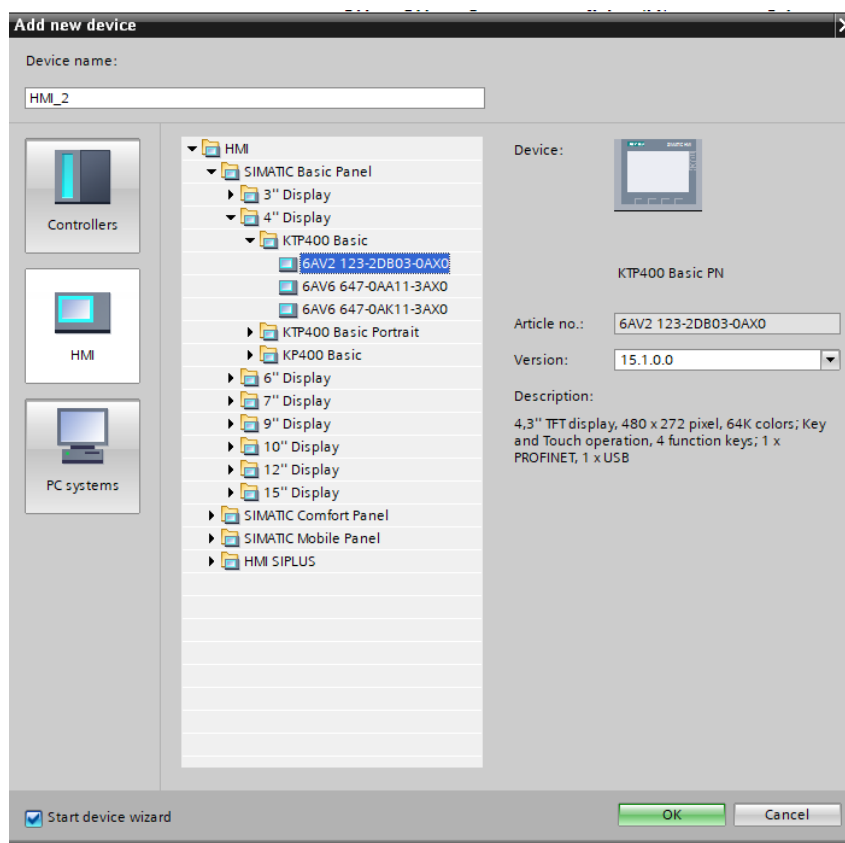


Rys. 39. Konfiguracja modułu rozszerzeń AQ 4xU/I ST_2 (opracowanie własne)

Po wykonaniu powyższych czynności moduł komunikacyjny ET 200SP wraz z modułami rozszerzeń skonfigurowano na potrzeby automatyzacji laboratoryjnej suszarni konwekcyjnej. Domyślna konfiguracja modułów rozszerzeń wejść i wyjść cyfrowych nie została zmieniona.

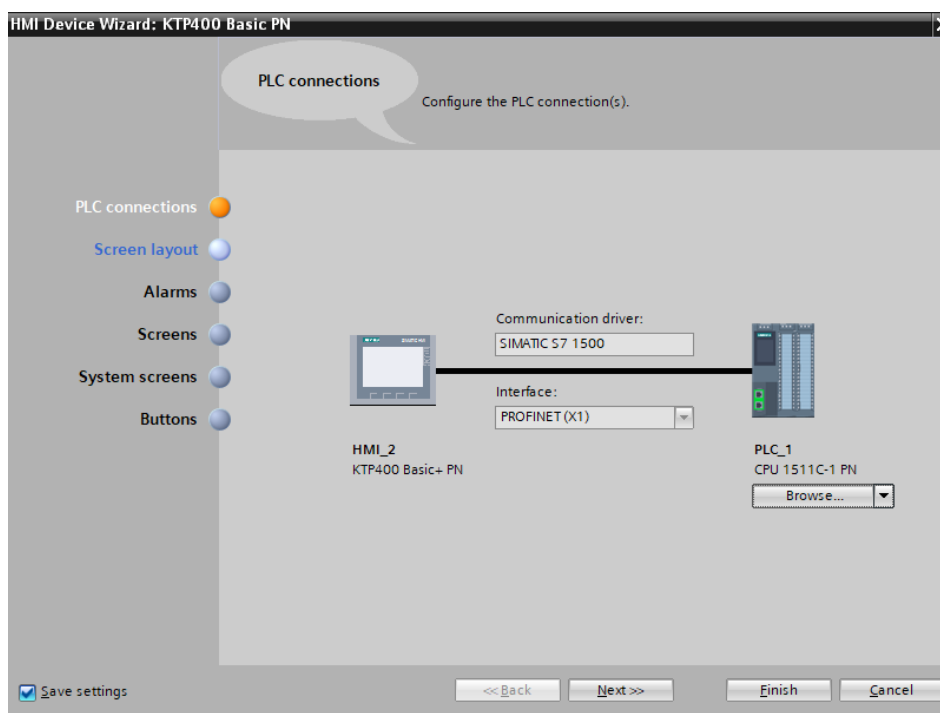
5.3. Konfiguracja HMI

Ostatnim urządzeniem wymagającym konfiguracji jest panel HMI KP400 Basic color PN. Dodanie panelu HMI wykonano przy pomocy narzędzia Add new device – rys. 40.



Rys. 40. Wybór panelu HMI (opracowanie własne)

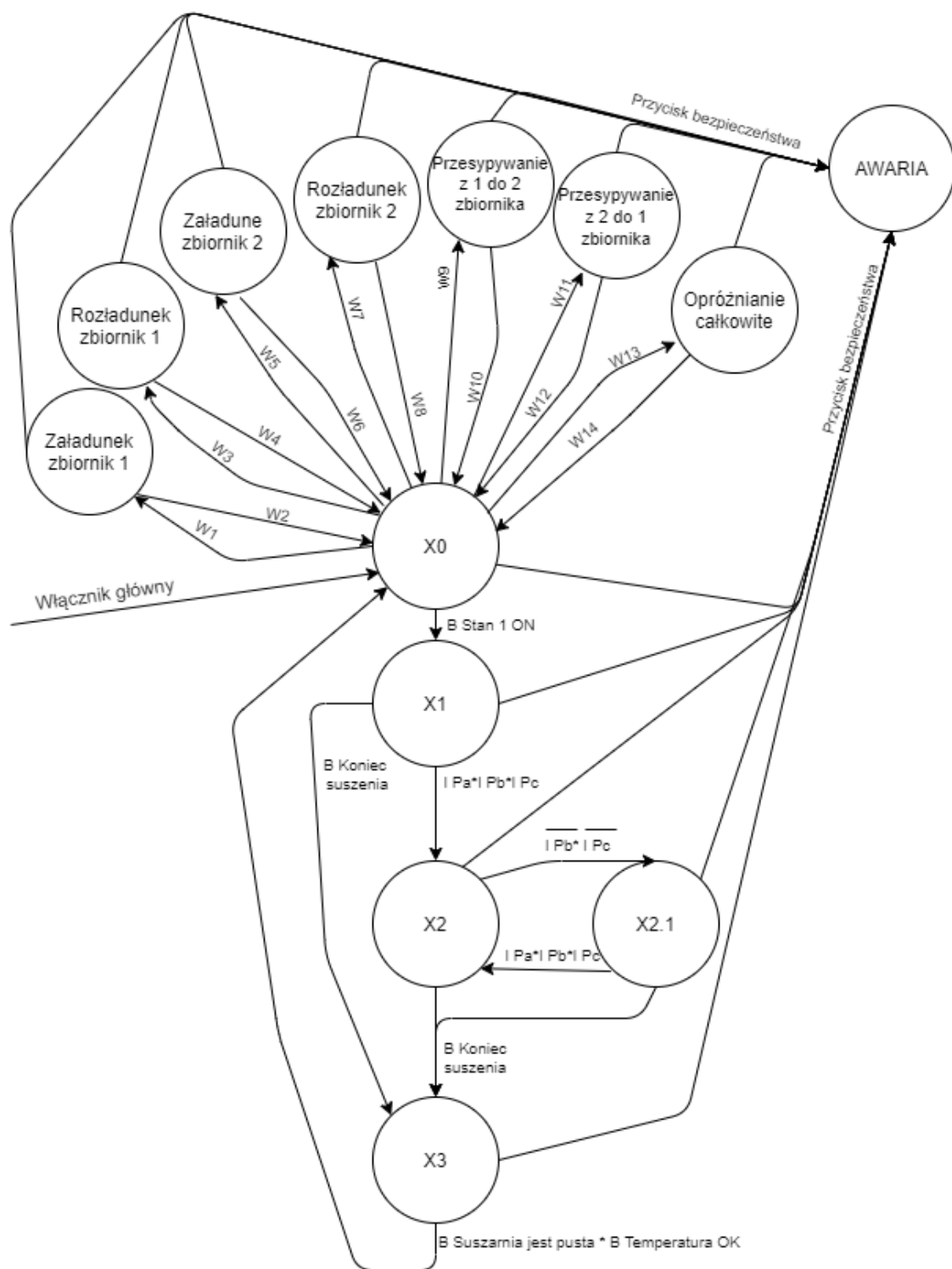
Podczas konfiguracji panelu istotne było ustalenie połączenia PROFINET pomiędzy HMI a sterownikiem PLC – rys. 41.



Rys. 41. Konfiguracja połączenia PROFINET panelu HMI ze sterownikiem PLC (opracowanie własne)

5.4. Graf stanów

Działanie laboratoryjnej suszarni daszkowej można opisać jako maszynę stanów. Przed przystąpieniem do programowania sterownika stworzono graf stanów, na którego podstawie napisano program sterujący maszyną. Stan jałowy jest stanem uruchamiającym się po włączeniu maszyny. Uruchamiając proces suszenia operator będzie miał za zadanie wybranie parametrów procesu, takie jak temperatura poszczególnych sekcji oraz długość trwania procesu. Po wyborze parametrów włączony zostanie stan załadunku materiału. Gdy suszarnia będzie wypełniona materiałem to uruchomi się w sposób automatyczny stan suszący materiał. W przypadku niedostatecznej ilości materiału, w komorze suszarni stan suszenia zostanie przerwany, uruchomi się stan uzupełniający materiał. Po zakończeniu procesu suszenia materiał zostanie wyładowany z suszarni. Po opróżnieniu suszarni program maszyna wróci do stanu jałowego. Graf stanu przedstawiono na rys. 42.



Rys. 42. Graf stanu (opracowanie własne)

Na powyższym grafie stany obsługujące suszarnię daszkową opisano w następujący sposób:

1. X0 – stan jałowy,
2. X1 – stan załadunku materiału,
3. X2 – stan suszenia materiału,

4. X2.1 – stan uzupełnienia materiału,
5. X3 – stan wyładunku materiału,
6. Awaria – stan awaryjny włączany poprzez wciśnięcie przycisku awaryjnego.

Pozostałe stany są stanami obsługującymi zbiorniki oraz załadunek i rozładunek suszarni. Nie dotyczą tej pracy inżynierskiej, lecz są integralną częścią stanowiska laboratoryjnej suszarni daszkowej.

5.5. Struktura programu

Program napisano przy użyciu języka drabinkowego. Język drabinkowy jest językiem graficznym podobnym do diagramu połączeń elektrycznych. Język ten symuluje przepływ prądu ze źródła zasilania do elementów wykonawczych, przedstawionych w programie jako cewki, poprzez warunki wejściowe (Tomkiewicz i inni, 2016).

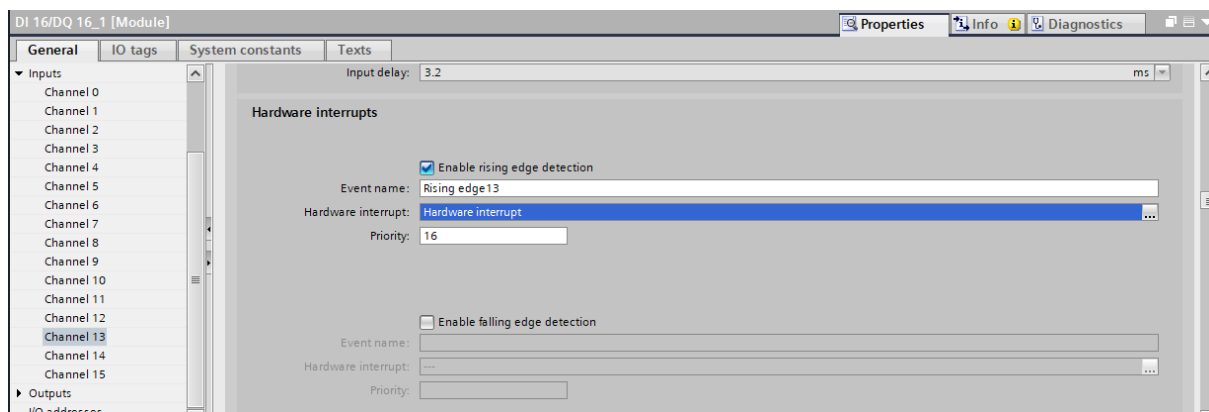
Struktura programu składa się z bloków, które spełniają swoje określone funkcje, np. przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami opisane są w bloku Stany [FC8]. Poszczególne bloki opisano w rozdziałach 1.5.1 – 1.5.7. Cały program załączono do pracy inżynierskiej na nośniku CD w formacie pdf oraz projekcie aplikacji TIA Portal V15.1. W pracy opisano jedynie kluczowe elementy programu oraz idea działania.

5.5.1. Startup [OB100]

Startup jest blokiem załączającym się jedynie po uruchomieniu sterownika. Jego zadaniem jest wprowadzenie maszyny do stanu jałowego – rys. 43.

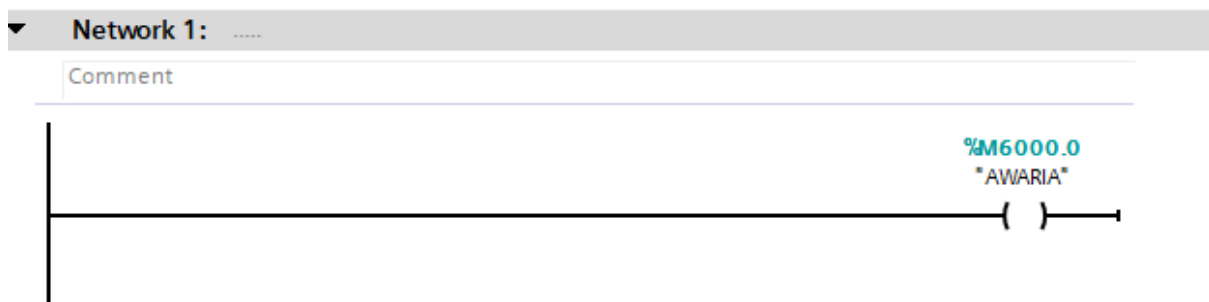
5.5.3. Hardware interrupt [OB40]

Blok Hardware interrupt jest blokiem służącym do obsługi sytuacji awaryjnych. Konfiguruje się go poprzez ustalenie zdarzenia wywołującego włączenie go. W przypadku suszarni jest to wciśnięcie przycisku bezpieczeństwa. Przycisk bezpieczeństwa podłączono do sterownika, do kanału 13 wejść cyfrowych. Konfiguracja kanału przedstawia rys. 45.



Rys. 45. Konfiguracja kanału 13 wejść cyfrowych sterownika PLC (opracowanie własne)

W opcjach przerywania sprzętowego zaznaczono opcję Enable rising Edge detection – służy ona do wykrywania wciśnięcia przycisku bezpieczeństwa. Po wciśnięciu przycisku bezpieczeństwa wykonywany jest jeden cykl programu z bloku Hardware interrupt [OB40] – rys. 46.

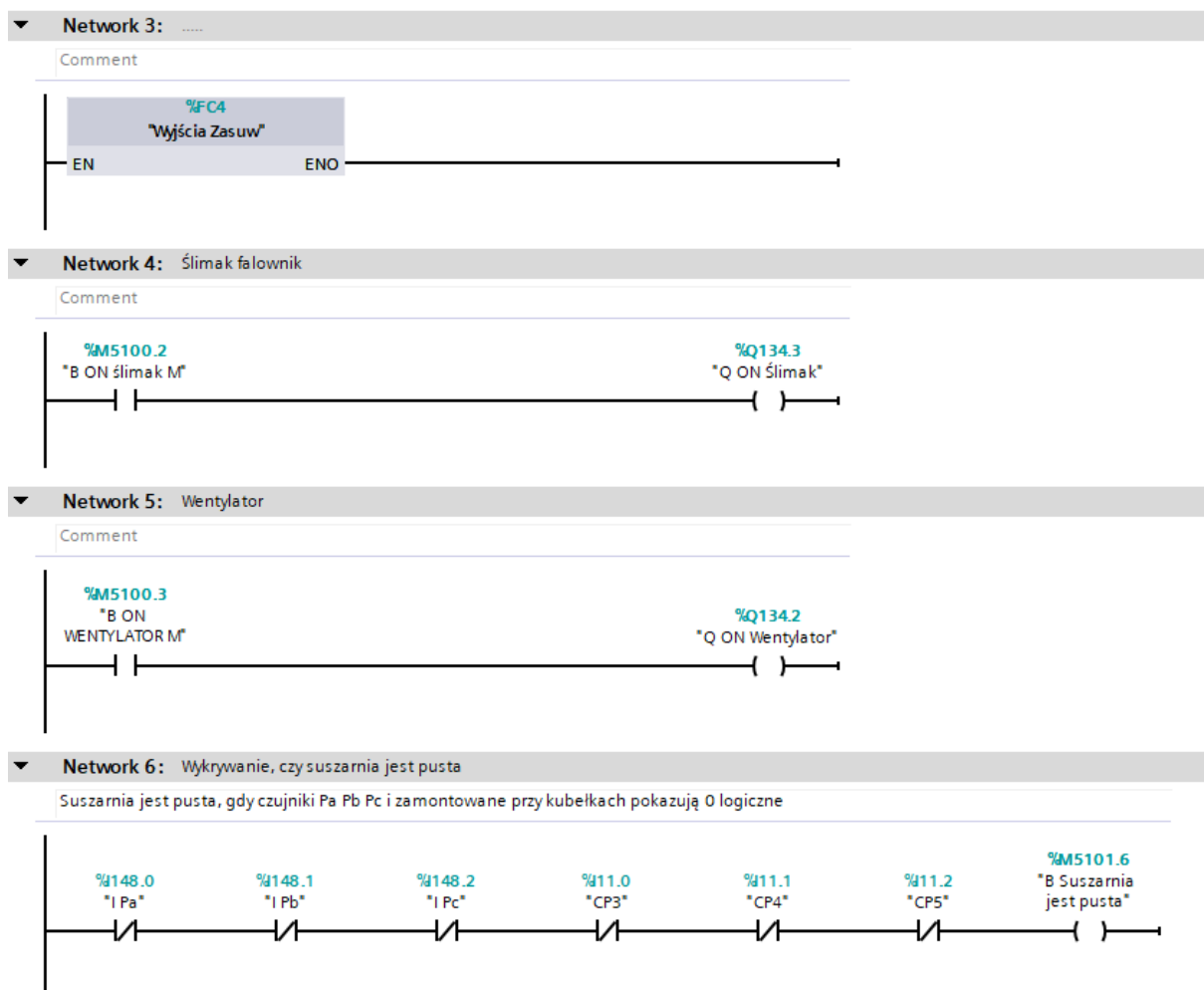


Rys. 46. Blok Hardware interrupt [OB40] obsługujący suszarnię (opracowanie własne)

Po wciśnięciu przycisku awaryjnego Hardware interrupt ustawia w stan wysoki cewkę o nazwie AWARIA – uruchamia ona stan awaryjny, oraz zakończy wszystkie inne stany.

5.5.4. Wyjścia [FC24]

Blok [FC24] zawiera wszystkie fizyczne wyjścia oraz wyjścia obsługujące panel HMI. Fragment bloku [FC24] przedstawia rys. 47.

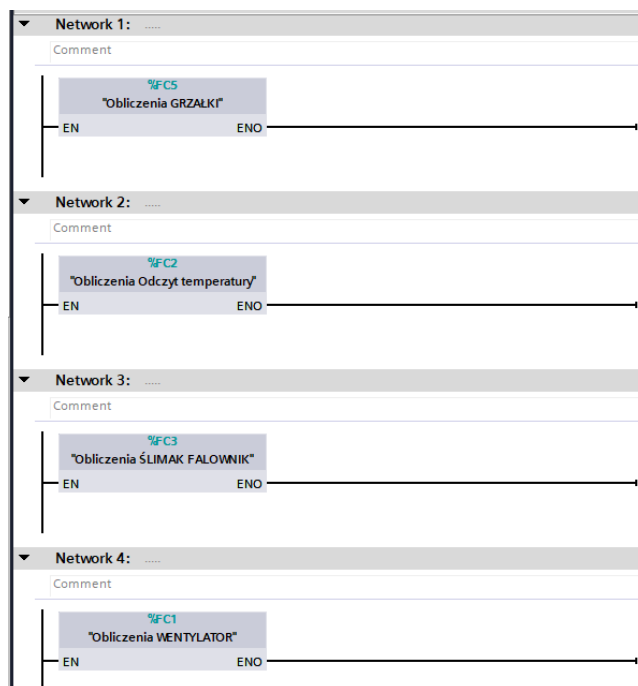


Rys. 47. Fragment programu napisanego w języku drabinkowych obsługującego wyjścia laboratoryjnej suszarni daszkowej (opracowanie własne)

Każde z wyjść załączane jest po spełnieniu określonych warunków. Dla przykładu wyjście informujące, że suszarnia jest pusta przechodzi w stan wysoki, gdy żaden czujnik wykrywający substancję suszoną nie wykrywa materiału.

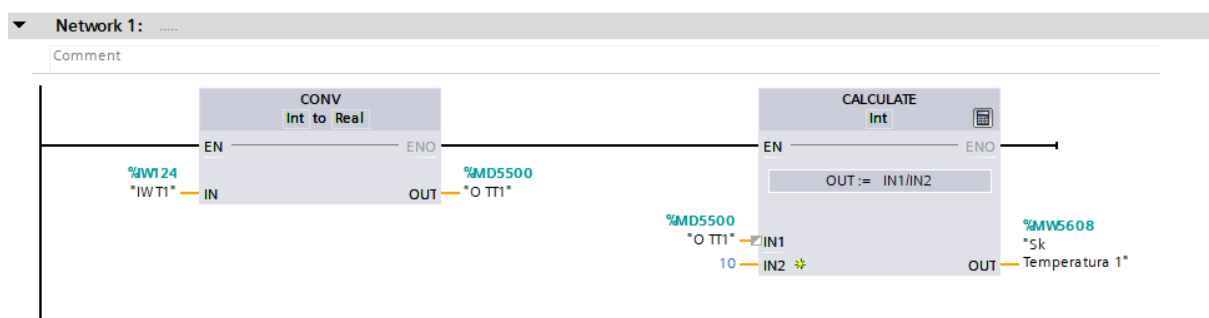
5.5.5. Obliczenia [FC26]

W bloku obliczeń widnieją wszystkie bloki obliczeń – rys. 48.



Rys. 48. Blok Obliczenia [FC26] (opracowanie własne)

Po przejściu do bloku obliczeń odczytu temperatury ukazany jest program wykonujący konwersję odczytanej wartości analogowej z czujnika PT100 na temperaturę, wyrażoną w °C, dla poszczególnych czujników temperatury. Network 1 przedstawia konwersję temperatury zmierzonej przez czujnik T1 – rys. 49.

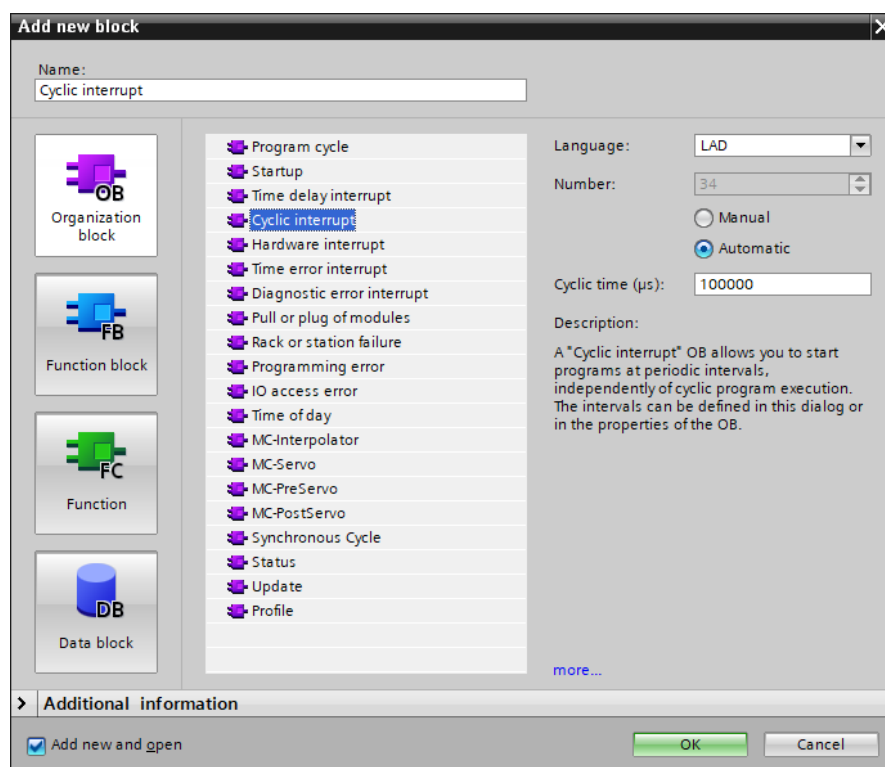


Rys. 49. Konwersja wartości analogowej na odczytaną temperaturę (opracowanie własne)

W tagu „Sk Temperatura 1” obliczono temperaturę zmierzoną przez czujnik T1.

5.5.6. Cyclic interrupt

W blokach Cyclic interrupt odbywa się regulacja temperatury przy użyciu regulatorów PID. Bloki Cyclic interrupt wykonują określone funkcje w regulowanych odstępach czasowych. Konfigurację przedstawiono na rys. 50.



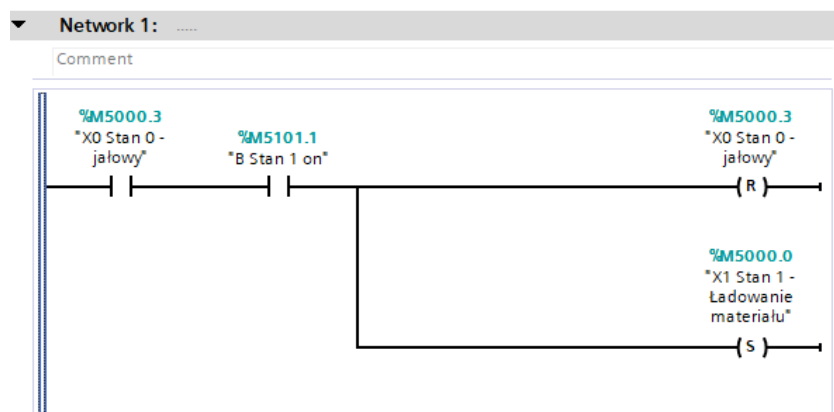
Rys. 50. Konfiguracja bloku Cyclic interrupt (opracowanie własne)

Czas pomiędzy kolejnymi uruchomieniami instrukcji zawartych w bloku regulowany jest poprzez zmianę parametru Cyclic time.

Blok Cyclic interrupt PID 1 [OB31] służy do regulacji działania grzałki G1. Znajduje się w nim regulator PID oraz ograniczenia odnośnie zadawanych temperatur. Regulator PID kontroluje wartość zadaną na grzałkę G1 poprzez porównanie temperatury zmierzonej przez czujnik temperatury PT100 T1 do temperatury zadanej przez operatora maszyny.

5.5.7. Stany [FC8]

W bloku [FC8] znajduje się graf stanu przedstawiony w rozdziale 5.4. Został on napisany w języku drabinkowym. Dla przykładu przeanalizowany zostanie Network 1, odpowiedzialny za włączenie stanu ładowania materiału i wyłączenie stanu jałowego – rys. 51.



Rys. 51. Fragment programu sterującego stanami (opracowanie własne)

Przedstawiony program działa w następujący sposób. Jeżeli podczas stanu jałowego zostanie zamknięty styk „B Stan 1 on”, uruchomiony zostanie stan ładowania materiału, a stan jałowy się zakończy. „B Stan 1 on” jest stykiem przechodzącym w stan wysoki poprzez wciśnięcie przycisku „Suszenie start” na panelu HMI.

5.6. Opis stanu jałowego [FC12]

Stan jałowy X0 jest stanem zaprogramowanym w bloku [FC12]. Uruchamia się po włączeniu urządzenia włącznikiem głównym, po zakończeniu każdego ze stanów przemieszczania materiału między zbiornikami, załadunku i wyładunku materiału z obiektu oraz po zakończeniu procesu suszenia. Działanie elementów wykonawczych w stanie jałowym przedstawiono w tabeli 4 .

Tab. 4. Elementy wykonawcze w stanie jałowym

Lp.	Element	Stan
1.	Ślimak odbierający materiał	Wyłączony
2.	Wentylator	Wyłączony
3.	Silniki napędów	Wyłączone
4.	Grzałki	Wyłączone
5.	Wloty powietrza	Otwarte
6.	Zasuwy	Zamknięte

Stan jałowy zostaje zakończony po uruchomieniu procesu suszenia, bądź włączeniu jednego ze stanów odpowiedzialnych za przemieszczanie się materiału między zbiornikami.

5.7. Opis stanu załadunku materiału [FC9]

Stan załadunku materiału X1 uruchamia się po wybraniu parametrów suszenia oraz wciśnięciu przycisku „uruchom suszenie” na panelu HMI przez operatora maszyny. Stan załadunku trwa dopóki suszarnia nie zostanie wypełniona materiałem – wykrywane jest

to przez czujniki pojemnościowe. Działanie elementów wykonawczych w stanie załadunku materiału przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Elementy wykonawcze w stanie załadunku materiału

Lp.	Element	Stan
1.	Ślimak odbierający materiał	Włączony (100%)
2.	Wentylator	Wyłączony
3.	Silniki napędów	Włączone
4.	Grzałki	Wyłączone
5.	Wloty powietrza	Otwarte
6.	Zasuwa 1 (załadunek ze zbiornika I)	Wybór operatora
7.	Zasuwa 2 (załadunek ze zbiornika II)	Wybór operatora
8.	Zasuwa 3	Zamknięta
9.	Zasuwa 4	Zamknięta
10.	Zasuwa 5	Zamknięta
11.	Zasuwa 6	Zamknięta

Operator podczas ustawiania parametrów suszenia ma za zadanie wybierać, z którego zbiornika zostanie pobrany materiał.

5.8. Opis stanu suszenia materiału [FC11] i uzupełnienia materiału [FC7]

Stan suszenia materiału włącza się w momencie, gdy suszarnia jest wypełniona materiałem. Działanie elementów wykonawczych w stanie suszenia materiału przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Elementy wykonawcze w stanie załadunku suszenia materiału

Lp.	Element	Stan
1.	Ślimak odbierający materiał	Działa z prędkością wybraną przez operatora
2.	Wentylator	Działa z prędkością wybraną przez operatora
3.	Silniki napędów	Włączone
4.	Grzałka I	Temperatura wybrana przez operatora
5.	Grzałka II	Temperatura wybrana przez operatora
6.	Grzałka III	Temperatura wybrana przez operatora
7.	Wloty powietrza I	Stopień otwarcia wybrany przez operatora
8.	Wloty powietrza II	Stopień otwarcia wybrany przez operatora
9.	Wloty powietrza III	Stopień otwarcia wybrany przez operatora
10.	Zasuwa 1	Zamknięta
11.	Zasuwa 2	Zamknięta
12.	Zasuwa 3	Otwarta
13.	Zasuwa 4	Zamknięta
14.	Zasuwa 5	Zamknięta
15.	Zasuwa 6	Zamknięta

Jeżeli poziom materiału spadnie do zbyt niskiego poziomu, zostanie uruchomiony stan uzupełniający materiał w suszarni X2.1. Działanie elementów wykonawczych w stanie X2.1 ukazano w tabeli 7.

Tab. 7. Elementy wykonawcze w stanie uzupełniania materiału

Lp.	Element	Stan
1.	Ślimak odbierający materiał	Włączony (100%)
2.	Wentylator	Włączony (100%)
3.	Silniki napędów	Włączone
4.	Grzałki	Wyłączone
5.	Wloty powietrza	Otwarte
6.	Zasuwa 1 (załadunek ze zbiornika I)	Wybór operatora
7.	Zasuwa 2 (załadunek ze zbiornika II)	Wybór operatora
8.	Zasuwa 3	Zamknięta
9.	Zasuwa 4	Zamknięta
10.	Zasuwa 5	Zamknięta
11.	Zasuwa 6	Zamknięta

Stan uzupełnienia materiału kończy się w chwili wykrycia materiału przez wszystkie czujniki pojemnościowe zamontowane w komorze suszarni, wtedy urządzenie powraca do stanu suszenia materiału. Stan uzupełnienia materiału oraz suszenia materiału kończą się, gdy suszenie materiału się zakończy. Dzieje się tak, gdy minie czas suszenia ustawiony przez operatora, bądź zostanie wcisnięty przycisk kończący program suszący na panelu HMI.

5.9. Opis stanu wyładunku materiału [FC13]

Stan wyładunku materiału z suszarni uruchamia się w następujących warunkach:

- suszarnia była w stanie uzupełniania materiału i operator uruchomił przycisk kończący suszenie na panelu HMI,
- suszarnia była w stanie suszenia materiału X2, bądź w stanie uzupełniania materiału X2.1 i operator wcisnął przycisk kończący suszenie na panelu HMI lub zakończył się czas suszenia.

Działanie elementów wykonawczych w stanie wyładunku materiału przedstawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Elementy wykonawcze w stanie uzupełniania materiału

Lp.	Element	Stan
1.	Ślimak odbierający materiał	Włączony (100%)
2.	Wentylator	Włączony (100%)
3.	Silniki napędów	Włączone
4.	Grzałki	Wyłączone
5.	Wloty powietrza	Otwarte
6.	Zasuwa 1	Zamknięta
7.	Zasuwa 2	Zamknięta
8.	Zasuwa 3	Otwarta
9.	Zasuwa 4 (wyładunek z suszarni)	Wybór operatora
10.	Zasuwa 5 (wyładunek do zbiornika II)	Wybór operatora
11.	Zasuwa 6 (wyładunek do zbiornika I)	Wybór operatora

Jeżeli podczas wyładunku materiału zmierzona temperatura przez wszystkie czujniki PT100 spadnie poniżej 30°C, wentylator zostanie wyłączony. w przypadku nie wykrywania materiału w suszarni daszkowej wszystkie podajniki ślimakowe oraz podajnik kubełkowy zostaną wyłączone. Program sterujący kończy stan rozładunku po spełnieniu obydwóch warunków, czyli po opróżnieniu suszarni oraz ustabilizowaniu temperatury.

5.10. Opis stanu awaryjnego [FC10]

Stan awaryjny rozpoczyna po wciśnięciu przycisku awaryjnego. Stan ten wyłącza wszystkie urządzenia wykonawcze, za wyjątkiem wentylatora, jeżeli zostaną spełnione specjalne warunki. Wentylator zostaje włączony, jeżeli temperatura suszarni jest zbyt wysoka. w przeciwnym razie istniałoby zagrożenie pożaru materiału suszonego. Istnieje możliwość wyłączenia wentylatora przy pomocy panelu HMI w trakcie trwania stanu. Działanie elementów wykonawczych w stanie awaryjnym przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Elementy wykonawcze w stanie uzupełniania materiału

Lp.	Element	Stan
1.	Ślimak odbierający materiał	Wyłączony
2.	Wentylator	Włączony (100%) jeżeli temperatura zbyt wysoka
3.	Silniki napędów	Wyłączone
4.	Grzałki	Wyłączone
5.	Wloty powietrza	Otwarte
6.	Zasuwy	Zamknięte

5.11. Obsługa suszarni

Operator obsługuje suszarnię przy pomocy dotykowego panelu HMI. Po uruchomieniu urządzenia włącznikiem głównym na panelu HMI wyświetlony zostaje ekran główny. W celu uruchomienia procesu suszenia należy nacisnąć przycisk o nazwie „Suszenie”. Przed operatorem zostanie wyświetlony ekran wyboru zbiornika, z którego ma zostać pobrany wilgotny materiał – rys. 52.

Wybierz zbiornik z którego ma być pobrany materiał

Zbiornik I

Zbiornik II

Przynajmniej 1 zbiornik musi zostać wybrany

Rys. 52. Ekran wyboru zbiornika (opracowanie własne)

Po wyborze zbiornika, z którego ma zostać pobrany materiał, operator ma za zadanie zadać parametry procesowi suszenia – rys. 53 i rys. 54.

USTAL PARAMETRY SUSZENIA

<input type="text" value="20"/>	Prędkość odbioru materiału % (min. 20, max 100)
<input type="text" value="40"/>	Prędkość wentylatora % (min. 40, max 100)
<input type="text" value="100"/>	Procent otwarcia wlotu I (min. 20, max 100)
<input type="text" value="100"/>	Procent otwarcia wlotu II (min. 20, max 100)
<input type="text" value="100"/>	Procent otwarcia wlotu III (min. 0, max 100)

Rys. 53. Ekran wyboru parametrów suszenia (opracowanie własne)

USTAL PARAMETRY SUSZENIA

<input type="text" value="20"/>	Temperatura I sekcja (min. 20, max 80)
<input type="text" value="20"/>	Temperatura II sekcja (min. 20, max 80)
<input type="text" value="20"/>	Temperatura III sekcja (min. 20, max 80)
<input type="text" value="1"/>	Czas suszenia (minuty)

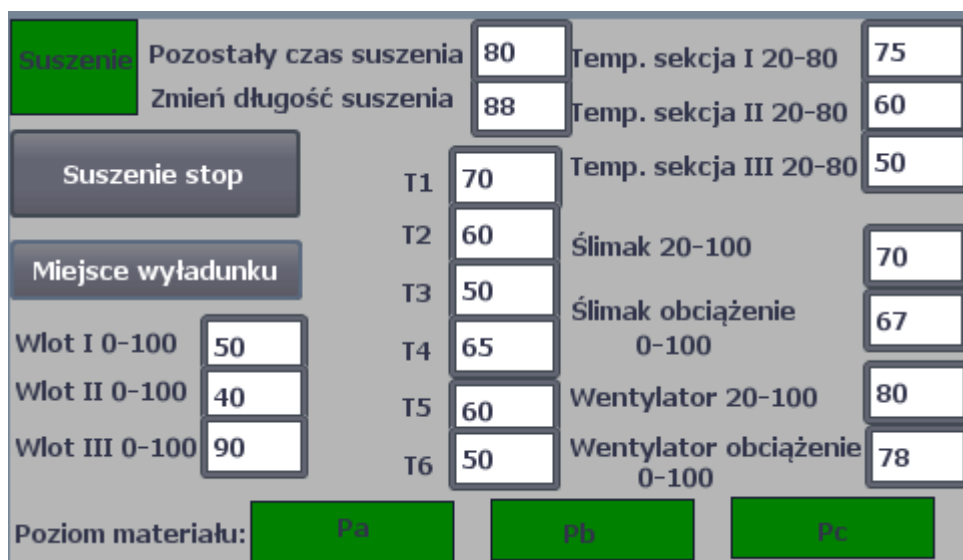
Rys. 54. Ekran wyboru temperatury i maksymalnego czasu trwania suszenia (opracowanie własne)

Ostatnim czynnością wykonywaną przez osobę obsługującą urządzenie jest wybór miejsca, do którego ma zostać wyładowany materiał po procesie suszenia – rys. 55.



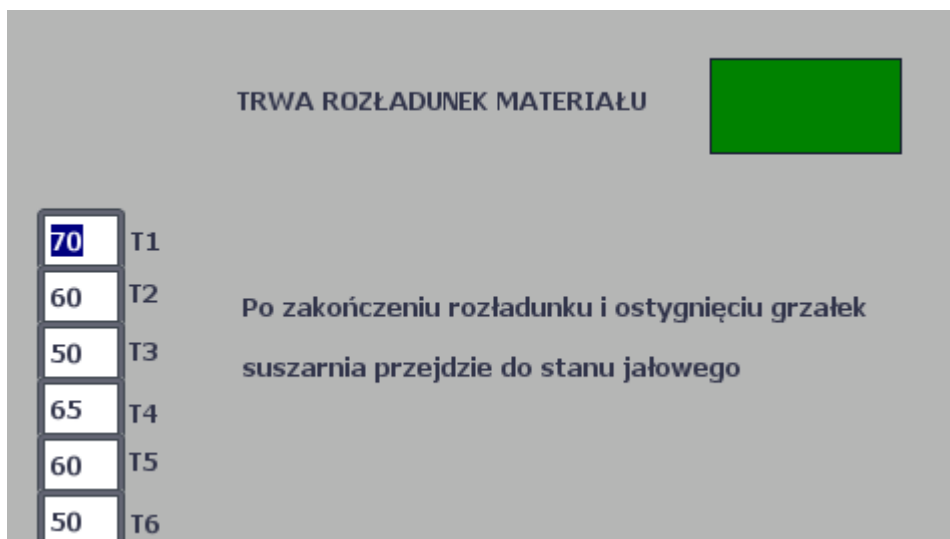
Rys. 55. Ekran wyboru miejsca wyładunku materiału po skończonym procesie suszenia (opracowanie własne)

Po wyborze wszystkich parametrów suszenia maszyna rozpocznie wypełnianie komory suszarni. Gdy wszystkie czujniki pojemnościowe zamontowane na suszarni wykryją materiał, rozpocznie się proces suszenia. Parametry procesu suszenia mogą być zmieniane dzięki ekranowi przebiegu procesu – rys. 56.



Rys. 56. Ekran stanu 3 suszenia materiału (opracowanie własne)

Gdy minie zadany czas suszenia, bądź operator postanowi zakończyć proces suszenia szybciej, program zakańcza stan suszenia i przechodzi do stanu wyładunku materiału z suszarni – rys. 57.



Rys. 57. Ekran rozładunku materiału (opracowanie własne)

Po zakończeniu rozładunku materiału i ostygnięciu grzałek, suszarnia wróci do stanu jałowego. Proces suszenia zostanie zakończony. Na ekranie HMI zostanie wyświetlony ekran główny, z możliwością rozpoczęcia kolejnego procesu suszenia.

5.12. Podsumowanie

Program obsługujący laboratoryjną suszarnię konwekcyjną napisano w języku drabinkowym w środowisku TIA Portal V15.1. Program obsługiwany jest przy pomocy panelu HMI przez operatora suszarni zadającego parametry suszenia materiału. Program działa w sposób automatyczny, operator może jednak zmienić parametry procesu podczas suszenia. Obsługa urządzenia jest prosta i intuicyjna.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem pracy było zbudowanie stanowiska dydaktycznego pod nazwą laboratoryjna suszarnia daszkowa. Urządzenie obsługiwane jest przez układy wykonawcze sterowane sterownikiem PLC. Cel pracy został osiągnięty.

Stanowisko w części mechanicznej złożono z otrzymanych elementów, suszarni daszkowej, zespołu napędów oraz dwóch zbiorników magazynujących materiał. Sformułowano wymagania dotyczące układu pomiarowego, wykonawczego oraz sterującego. Wymagania związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym laboratoryjnej suszarni daszkowej określono zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań maszyn (Dz. U. nr 199 z 2008 r., poz. 1228). Poziom ryzyka zdefiniowano poprzez wyznaczenie poziomu nienaruszalności SIL dla oparzeń oraz porażenia prądem elektrycznym.

Określono potrzebne elementy wykonawcze, grzałki, siłowniki pneumatyczne zasuw, silniki elektryczne napędzające elementy transportujące materiał oraz wentylator. Wybrano elementy układu pomiarowego, czujniki temperatury PT100 oraz czujniki pojemnościowe badające poziom materiału w komorze suszarni. Elementami sterującymi pracą silnika wentylatora i przenośnika ślimakowego odbierającego materiał zostały przemienniki częstotliwości serii iC5 015-1F. Sterowniki mocy Lumel RP7 zostały wybrane do regulacji mocy grzałek ogrzewających czynnik suszący. Układ sterowania składa się z programowalnego sterownika logicznego PLC S7-1500 CPU 1511C-1 PN (6ES7511-1CK00-0AB0), moduł interfejsu ET 200SP IM 155-6 PN ST interface module (6ES7155-6AU01-0BN0).

Podczas pracy zaprojektowano elementy montażowe oraz bezpieczeństwa przy użyciu oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2021. Wszystkie zaprojektowane elementy wykonano w technologii druku 3D przy użyciu drukarki Creality Ender-5.

Schematy elektryczne narysowano przy użyciu oprogramowania Easy EDA. Program sterujący laboratoryjną suszarnią konwekcyjną napisano w środowisku TIA Portal V15.1. Skonfigurowano sterownik PLC, panel HMI KTP400 Basic PN oraz moduł interfejsu ET 200SP wraz z rozszerzeniami. Program napisano w języku drabinkowym.

Wnioski wynikające z pracy inżynierskiej są następujące:

1. Wykonując połączenia elektryczne należy bezwzględnie odłączyć urządzenie od zasilania. Przed podłączeniem elementu powinno się zapoznać z instrukcją producenta.

2. Podczas pisania programu pierwszą czynnością powinno być stworzenie grafu stanu. Graf stanu powinien zawierać wszystkie sytuacje w jakich może znaleźć się maszyna. Przejścia pomiędzy stanami powinny być jasno określone. W jednej chwili nie może być działać więcej niż jeden stan, w przeciwnym razie program nie będzie działał poprawnie.
3. W tworzenia logiki programu przydatne okazało się korzystanie z programu symulującego sterownik PLC. Przy użyciu oprogramowania S7-PLCSIM V15.1 możliwe było przeprowadzanie testu programu bez uruchamiania obiektu sterowania. Dzięki temu testowanie programu było czynnością bezpieczną, oraz możliwą do przeprowadzenia w każdym miejscu.
4. Dzięki ustawieniu trybu pracy sterownika warm restart – RUN nie jest konieczne ponowne ustawianie sterownika w tryb pracy po odłączeniu zasilania.
5. Stanowisko laboratoryjne może zostać w przyszłości zmodernizowane. Należy zamontować czujniki wilgotności oraz przepływu powietrza. Dzięki badaniu wilgotności czynnika suszącego możliwe będzie zakończenie procesu suszenia po wysuszeniu materiału. Kontrola przepływu powietrza umożliwi lepsze dobranie prędkości wentylatora.
6. W dalszej rozbudowie stanowiska warto byłoby wykorzystać oprogramowanie SCADA, na przykład Wonderware InTouch. Po podłączeniu stanowiska do komputera PC możliwe byłoby lepsze monitorowanie procesu, dla przykładu tworzenie wykresów zmian wilgotności od czasu suszenia.

Literatura

1. Admin, Konwekcja - Słownik ochrony środowiska, <https://www.teraz-srodowisko.pl/sownik-ochrona-srodowiska/definicja/konwekcja.html> dostęp [13.09.2020].
2. Admin, Suszarnie stacjonarne przepływowe, <https://www.riela.pl/produkty/suszarnie/suszarnie-przeplywowe-stacjonarne/> dostęp [01.10.2020].
3. Admin, Suszenie parą przegrzaną (SHS), <https://heckmann-mt.de/index.php/pl/innovation/shs-trocknung> dostęp [28.09.2020].
4. Admin, Rezystancyjne czujniki temperatury, <https://acse.pl/czujniki-temperatury/> dostęp [02.10.2020].
5. Admin, Zalety i wady ultradźwiękowych czujników zbliżeniowych, <https://pomiarwelektryce.pl/instalacje-elektryczne/zalety-i-wady-ultradzwiekowych-czujnikow-zblizeniowych-878.html> dostęp [03.10.2020].
6. Bednarowski M., 2020, Projekt układu sterowania zespołem zbiorników magazynujących materiał sypki, (rękopis).
7. Glijer L., 2011, Suszenie Drewna i nie tylko, Wydawnictwo Wieś Jutra.
8. Prządka W., 1973, Technologia Meblarstwa część I, Państwowe wydawnictwo szkolnictwa zawodowego Warszawa.
9. Skotnicka E., 2011, Przegląd technologii suszenia materiałów sypkich.
10. Strumiłło Cz., 1983, Podstawy teorii i techniki suszenia, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
11. Szpilarewicz J., Suszarnia bębnowa podczerwonym opromienianiem, https://www.behance.net/gallery/30451187/Suszarnia-bebnowa-podczerwonym-opromienianiem-?tracking_source=search_projects_recommended%7Csuszarnia [dostęp 29.09.2020].
12. Tomkiewicz D., Raczek A., Wilk L., Zawada-Tomkiewicz A., 2016, Podstawy programowania sterowników PLC z wprowadzeniem do niezawodności i bezpieczeństwa maszyn i urządzeń, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.

Normy i akty prawne:

13. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz. U. nr 199 z 2008 r., poz. 1228).

Katalogi produktów i poradniki

14. LG Variable Frequency Drive, Przekształtnik częstotliwości serii iC5, instrukcja obsługi przekształtnika częstotliwości LG serii iC5,
<http://falowniki-instrukcje.pl/wp-content/uploads/2016/09/Instrukcja-LG-iC5-pl.pdf>
dostęp [09.09.2020]
15. TIA Selection Tool cloud – Siemens,
<https://mall.industry.siemens.com/spice/TSTWeb/#/Start/> dostęp [08.06.2020]
16. Sterownik mocy jednofazowy typu RP7 instrukcja obsługi
https://www.lumel.com.pl/resources/Pliki%20do%20pobrania/RP7/RP7_instrukcja_obsługi_rev_B.pdf dostęp [08.09.2020]

Spis rysunków

Rys. 1. Suszarnia bębnowa (www.behance.net).....	14
Rys. 2. Schemat działania suszarni fluidyzacyjnej (Skotnicka 2011)	15
Rys. 3. Automatyzowana suszarnia konwekcyjna (opracowanie własne)	16
Rys. 4. Schemat stanowiska laboratoryjnego przed przystąpieniem do automatyzacji urządzenia (opracowanie własne)	17
Rys. 5. Schemat suszarni konwekcyjnej daszkowej (opracowanie własne).....	19
Rys. 6. Ruch powietrza i materiału w suszarni (opracowanie własne)	20
Rys. 7. Schemat suszarni daszkowej – rozłożenie czujników temperatury (opracowanie własne).....	22
Rys. 8. Schemat rozmieszczenia czujników materiału (opracowanie własne).....	24
Rys. 9. Umieszczenie grzałek w suszarni daszkowej (opracowanie własne)	26
Rys. 10. Sterowanie klapą dostępu powietrza przy pomocy silnika prądu stałego i potencjometru (opracowanie własne).....	28
Rys. 11. Analiza zależności mocy dostarczanej do odbiornika od sygnału sterującego (www.lumel.com.pl).....	29
Rys. 12. Część pierwsza wlotu powietrza (opracowanie własne)	38
Rys. 13. Część druga wlotu powietrza (opracowanie własne)	39
Rys. 14. Część trzecia wlotu powietrza (opracowanie własne).....	39
Rys. 15. Część czwarta wlotu powietrza (opracowanie własne).....	40
Rys. 16. Złożone zabezpieczenie wlotu powietrza (opracowanie własne).....	40
Rys. 17. Zamontowane zabezpieczenie wlotu powietrza (opracowanie własne).....	41
Rys. 18. Element mocujący czujnik pojemnościowy (opracowanie własne).....	41
Rys. 19. Przejściówka podłączeniowa przewodu odprowadzającego czynnik suszący (opracowanie własne).....	42
Rys. 20. Połączenie wejścia wentylatora z przewodem odprowadzającym powietrze (opracowanie własne).....	43
Rys. 21. Wygląd topologii połączenia sterownika, panelu i modułu rozszerzeń (opracowanie własne).....	44
Rys. 22. Regulator temperatury PID (opracowanie własne)	45
Rys. 23. Kontrola wartości zadanej temperatury (opracowanie własne)	46
Rys. 24. Program sterujący prędkością ślimaka (opracowanie własne).....	46
Rys. 25. Fragment programu sterującego stanami suszarni (opracowanie własne)	47
Rys. 26. Opóźnienie wyłączenia silników w stanie rozładunku suszarni (opracowanie własne)	48
Rys. 27. Program sterujący prędkością wentylatora (opracowanie własne)	48
Rys. 28. Program sterujący stopniem otwarcia wlotu II (opracowanie własne)	49

Rys. 29. Wybór sterownika PLC w oprogramowaniu TIA Portal V15.1 (opracowanie własne)	51
Rys. 30. Konfiguracja startu sterownika (opracowanie własne)	51
Rys. 31. Konfiguracja wejść analogowych sterownika PLC	52
Rys. 32. Konfiguracja wyjść analogowych sterownika	53
Rys. 33. Dodanie modułu ET 200SP do projektu (opracowanie własne)	53
Rys. 34. Połączenie ze sobą urządzeń siecią PROFINET (opracowanie własne)	54
Rys. 35. Dodane moduły rozszerzeń do interfejsu ET 200SP (opracowanie własne)	54
Rys. 36. Konfiguracja wejść temperaturowych (opracowanie własne)	55
Rys. 37. Konfiguracja AI 4xU/1 2-wire ST (opracowanie własne)	55
Rys. 38. Konfiguracja modułu wejść analogowych AQ 4xU/I ST_1 (opracowanie własne)	56
Rys. 39. Konfiguracja modułu rozszerzeń AQ 4xU/I ST_2 (opracowanie własne)	56
Rys. 40. Wybór panelu HMI (opracowanie własne)	57
Rys. 41. Konfiguracja połączenia PROFINET panelu HMI ze sterownikiem PLC (opracowanie własne)	57
Rys. 42. Graf stanu (opracowanie własne)	59
Rys. 43. Program bloku Startup (opracowanie własne)	61
Rys. 44. Main [OB1] (opracowanie własne)	61
Rys. 45. Konfiguracja kanału 13 wejść cyfrowych sterownika PLC (opracowanie własne)	62
Rys. 46. Blok Hardware interrupt [OB40] obsługujący suszarnię (opracowanie własne)	62
Rys. 47. Fragment programu napisanego w języku drabinkowych obsługującego wyjścia laboratoryjnej suszarni daszkowej (opracowanie własne)	63
Rys. 48. Blok Obliczenia [FC26] (opracowanie własne)	64
Rys. 49. Konwersja wartości analogowej na odczytaną temperaturę (opracowanie własne)	64
Rys. 50. Konfiguracja bloku Cyclic interrupt (opracowanie własne)	65
Rys. 51. Fragment programu sterującego stanami (opracowanie własne)	66
Rys. 52. Ekran wyboru zbiornika (opracowanie własne)	70
Rys. 53. Ekran wyboru parametrów suszenia (opracowanie własne)	70
Rys. 54. Ekran wyboru temperatury i maksymalnego czasu trwania suszenia (opracowanie własne)	70
Rys. 55. Ekran wyboru miejsca wyładunku materiału po skończonym procesie suszenia (opracowanie własne)	71
Rys. 56. Ekran stanu 3 suszenia materiału (opracowanie własne)	71
Rys. 57. Ekran rozładunku materiału (opracowanie własne)	72

Spis tabel

Tab. 1.	Lista wejść i wyjść sterownika PLC 6ES7511-1CK00-0AB0	31
Tab. 2.	Lista wejść i wyjść dla modułów rozszerzeń ET 200SP 6ES7155-6AU01-0BN0	32
Tab. 3.	Zapotrzebowanie prądowe elementów wykonawczych i pomiarowych	33
Tab. 4.	Elementy wykonawcze w stanie jałowym	66
Tab. 5.	Elementy wykonawcze w stanie załadunku materiału	67
Tab. 6.	Elementy wykonawcze w stanie załadunku suszenia materiału	67
Tab. 7.	Elementy wykonawcze w stanie uzupełniania materiału	68
Tab. 8.	Elementy wykonawcze w stanie uzupełniania materiału	68
Tab. 9.	Elementy wykonawcze w stanie uzupełniania materiału	69

Zawartość nośnika CD

1. Rysunki złożeniowe oraz wykonawcze.
2. Schematy elektryczne.
3. Schemat pneumatyczny.
4. Program sterujący w formacie PDF.
5. Program sterujący w postaci projektu TIA Portal V15.1.