

Wielostopniowy rozdmuch i rekuperacja

Rozdmuch preformy z tworzywa PET do postaci butelki wymaga w trakcie procesu podania sprężonego powietrza do jej wnętrza. Różnica pomiędzy zwiększonym ciśnieniem wewnątrz preformy, a ciśnieniem atmosferycznym w otaczającej ją wolnej przestrzeni w formie wywołuje siłę oddziałującą na ściankę preformy, skierowaną na zewnątrz. Jeśli preforma jest w stanie plastycznym, następuje zmiana jej kształtu, aż do uzyskania statycznej równowagi sił – oparcia się tworzywa na powierzchniach formujących. Forma zaczyna przenosić naprężenia mechaniczne na konstrukcję układu formowania. Dynamika wzrostu ciśnienia wewnątrz preformy musi być kontrolowana ze względu na maksymalną prędkość deformacji plastycznej tworzywa.

W efekcie opisanego powyżej procesu formowania otrzymujemy zadany kształt pojemnika. W momencie kontaktu tworzywa z formą rozpoczyna się przekazywanie zgromadzonej energii cieplnej w preformie do układu formowania. Po ostygnięciu tworzywa poniżej temperatury uplastycznienia następuje utrwalenie jego kształtu. Przez cały ten czas musimy zapewniać wysokie ciśnienie we wnętrzu pojemnika, aby zabezpieczyć utrwalany kształt.

Po zakończeniu utrwalania kształtu, możemy rozpocząć obniżanie ciśnienia wewnątrz pojemnika. Ze względu na dużą powierzchnię formującą i wysokie ciśnienie rozdmuchu, siły działające na układ formujący nie pozwalają na natychmiastowe rozpoczęcie procesu otwierania form. Układ ryglujący formy nie otworzy się w czasie naprężenia mechanicznego układu. Ponadto, otwarcie form, gdy wewnątrz pojemników znajduje się ciśnienie na poziomie ~25 bar rozerwałoby te pojemniki. Musi nastąpić spadek ciśnienia do poziomu bezpiecznego dla butelek i operacyjności układu formującego.

Opisany powyżej cykl wzrostu, utrzymania i obniżenia ciśnienia uwzględniając objętość obszaru formowania, w przypadku badanej maszyny jest to maksymalnie 15L (3 x butelka 5L), wiąże się ze znacznym zapotrzebowaniem energetycznym w postaci sprężonego powietrza.

Praktykowany na rynku zakres ciśnień rozdmuch butelek PET to: od 15 do 35 bar. Stosowanie ciśnienia 15 bar wiąże się z wieloma ograniczeniami w kształcie formowanej butelki i małym marginesem błędów za czym mogą iść problemy z kontrolą procesu. 35 bar wiąże się z dużym zapotrzebowaniem na sprężone powietrze, a to przekłada się na koszty energii oraz koszty inwestycji. Nasza firma zdecydowała się używać do rozdmuchu ciśnienia 25 bar. Jest to kompromis między kosztami a możliwościami. Już z samego tego faktu wynika zmniejszenie zapotrzebowania na powietrze w stosunku do urządzeń pracujących na ciśnieniu 35 bar o 28,5%..

Obszary procesu, w których można wprowadzić oszczędności energetyczne to optymalizacja metody otrzymania potrzebnego sprężonego powietrza i jak najdłuższe utrzymanie tej energii w układzie - redukcja strat.

Zaproponowany przez nas trójstopniowy rozdmuch, w tym dwa etapy rozdmuchu głównego, uważamy za najbardziej racjonalne rozwiązanie pod kątem potrzeb technologicznych formowania i efektywności energetycznej.

Pierwszy stopień rozdmuchu polega na podaniu sprężonego powietrza o ciśnieniu do 6 bar. Jest ono nazywane ciśnieniem wstępnym, ponieważ preforma na tym etapie przyjmuje kształt rozciągniętego balona na pręcie rozciągu i jeszcze nie dotyka ścianek formy. Ten stopień jest wymogiem technologicznym procesu rozdmuchu. Następuje

wstępne rozciągnięcie tworzywa bez jego wychładzania dzięki czemu jest możliwe dalsze, większe odkształcanie.

W drugim stopniu rozdmuchu podawane jest powietrze o ciśnieniu około 10 bar. Jest to niskie ciśnienie formujące. Nie pozwala ono uzyskać wszystkich kształtów użytkowych pojemnika. Preforma na tym etapie wchodzi w kontakt z formą, ale nie na całej jej powierzchni.

Ostatni stopień rozdmuchu zapewnia wystarczającą siłę do uformowania ostatecznej postaci pojemnika. Po podaniu do wnętrza preformy ciśnienia na poziomie 25 bar następuje kontakt preformy z całą powierzchnią formy i wszystkie szczegóły kształtu są przeniesione na formowane tworzywo. Sterownik procesu przełącza zasilanie głowic rozdmuchowych na wysokie ciśnienie formowania w momencie osiągnięcia niskiego ciśnienia formowania wewnątrz preformy.

Dlaczego opisany powyżej cykl jest oszczędniejszy energetycznie niż cykl, w którym podano by od razu wysokie ciśnienie formowania bezpośrednio po ciśnieniu wstępnym? Przeanalizujemy wykonaną pracę, aby sprężyć potrzebne do rozdmuchu powietrze.

Ciśnienie 10 bar otrzymujemy poprzez dziesięciokrotne sprężenie powietrza o ciśnieniu atmosferycznym 1 bar za pomocą I stopnia kompresji. Powietrze o ciśnieniu 25 bar otrzymujemy poprzez dwu i pół krotne sprężenie powietrza doprężaczem – II stopień kompresji, który na swoim wejściu ma podane powietrze o ciśnieniu 10 bar z I stopnia.

Rozdmuch wstępny w tym opisie jest pominięty, ponieważ jest wymogiem technologicznym i w każdym scenariuszu cyklu rozdmuchu pozostaje taki sam.

Wariant rozdmuchu dwustopniowego:

Założmy rozdmuch do objętości 10L (dwie butelki o pojemności 5L). Podając powietrze o ciśnieniu 10 bar, po wyrównaniu się ciśnień, w formie otrzymamy 10L powietrza o tym ciśnieniu. Zużyliśmy w ten sposób 100 litrów normalnych powietrza, które było sprężane do ciśnienia 10 bar przez I stopień kompresji. Następnie przełączamy się na zasilanie z II stopnia kompresji o ciśnieniu 25 bar. W formie podnosimy ciśnienie dwa i pół razy, czyli przepływa do niej dodatkowe 150 litrów normalnych, które zostało najpierw sprężone do ciśnienia 10 bar przez I stopień, a potem doprężone do ciśnienia 25 bar przez II stopień. Podsumowując, w takim cyklu I stopień kompresji sprężył 250 litrów normalnych, a doprężacz 150 litrów normalnych powietrza.

Wariant rozdmuchu jednostopniowego:

Podając do procesu formowania od razu powietrze o ciśnieniu 25 bar, po ustaniu przepływu mamy w formie 250 litrów normalnych powietrza. Powietrze to zostało sprężone przez I stopień do 10 bar, a potem przez II stopień do 25 bar. W tym scenariuszu pierwszy kompresor musiał sprężyć 250 litrów normalnych powietrza i doprężacz również musiał sprężyć 250 litrów normalnych powietrza.

Można łatwo zauważyć, że różnica objętości sprężonego powietrza przez doprężacz wynosi 40%. To przekłada się bezpośrednio na oszczędność energii zużytej przez niego.

Po zakończeniu formowania, wypuszczanie sprężonego powietrza z wnętrza butelek do atmosfery jest równoznaczne z usunięciem z układu całej energii włożonej do sprężenia tego powietrza. Redukcja strat energii w trakcie rozdmuchu polega na zachowaniu tego powietrza w układzie i wykorzystania go w następnym cyklu - rekuperacja. Możliwie najlepszym rozwiązaniem z punktu widzenia powyższych założeń byłby zamknięty układ pneumatyczny, gdzie uzupełniane jest jedynie brakujące powietrze tracone podczas formowania się butelki (różnica objętości preformy a gotowej butelki).

Przy jakich założeniach budowy układu otrzymamy rekuperację? Muszą być przewidziane zbiorniki pełniące funkcję akumulatorów energii i sterowanie zapewniające przepływ powietrza z objętości rozdmuchiwanej do nich. Ciśnienia robocze w zbiornikach muszą być na poziomach pozwalających na ich użycie w cyklu pracy. Niestety, gdy

odprężenie formy dochodzi do ciśnienia równego temu w zbiorniku rozdmuchu wstępnego (~4 bar) można odnieść wrażenie, że dalsza rekuperacja nie jest zasadna, ponieważ ani mechanizmy maszyny, ani żaden etap procesu rozdmuchu nie wykorzysta powietrza o niższym ciśnieniu. Zaproponowaliśmy tutaj rozwiązanie polegające na podłączeniu tego zakresu rekuperacji do wejścia kompresora 10 bar. Połączenie to zostało dodatkowo wyposażone w bufor w postaci zbiornika. Specjalny zawór utrzymuje w tym zbiorniku minimalne podciśnienie. Jeśli wzrośnie ono powyżej nastawy, brakujące powietrze jest pobierane z atmosfery. Takie warunki w zbiorniku utrzymują przepływ do niego w ostatniej fazie rekuperacji.

Opisana powyżej rekuperacja staje się wyzwaniem technicznym, gdy weźmiemy pod uwagę czas cyklu. W przypadku odprężenia pojemników z 25 bar do atmosfery uzyskamy większe przepływy niż w przypadku odprężania do zbiornika gdzie znajduje się już jakieś ciśnienie. Wiąże się to z wydłużeniem czasu potrzebnego na ten etap. Sytuację pogarszają jeszcze czasy przełączenia zaworów dostępnych na rynku. Ich średnia prędkość to około 120 ms. Jeśli chcielibyśmy przełączyć objętość rozdmuchiwaną pomiędzy czterema różnymi zbiornikami zajęłoby to 480ms czyli praktycznie cały przewidziany w cyklu pracy czas na odprężenie (0,4-0,5s), a gdzie czas na przepływ powietrza?

Realizacja rekuperacji, aby odbywała się w racjonalnym czasie, jest możliwa tylko przy zastosowaniu szybszych zaworów niż wspomniane. Musieliśmy opracować specjalny zawór zoptymalizowany pod kątem prędkości przełączania przy zachowaniu dużych przekroi (2") dla uzyskania odpowiednich przepływów. Udało nam się opracować, wykonać i przetestować zespół czterech zaworów, których całkowity czas przełączenia wynosi 20 ms. Dzięki konstrukcji zaworu o takich parametrach, zasadne było dalsze opracowywanie całego układu rekuperacji.

Do niniejszego tekstu został załączony schemat pneumatyczny instalacji realizującej zaproponowaną przez nas metodę rozdmuchu. Poniżej znajduje się opis jego działania.

Powietrze trafia do układu poprzez filtr (F6), a następnie zawór (V12) utrzymujący minimalne podciśnienie. Jest on sterowany pneumatycznie i wartość podciśnienia jest zadana przez nastawę podłączonego do niego reduktora ciśnienia (V11). Kolejnym elementem na drodze powietrza jest pierwszy stopień sprężania - kompresor (P1). Jest on wyposażony na wejściu we własny filtr (F1) oraz czujnik ciśnienia (S1). Po wyjściu z kompresora powietrze jest kierowane do układu filtrującego. Składa się on z separatorów cyklonowych z filtrami (F2,F3) i schładzacza (R2). Tak przygotowane powietrze trafia do zbiornika niskiego ciśnienia rozdmuchu (T2) i/lub do sprężarki drugiego stopnia - doprężacza (P2). Po wyjściu przepływa przez kolejny zestaw filtrów (F4-F6) i trafia do zbiornika wysokiego ciśnienia rozdmuchu (T1). Ciśnienie w zbiorniku wstępnego rozdmuchu (T3) jest kontrolowane przez układ sterowania procesem. Aktualna wartość ciśnienia w nim jest badana przez czujnik (S9). Elektrycznie sterowany zawór (V14) w przypadku zbyt niskiego ciśnienia, zasila zbiornik (T3) powietrzem ze zbiornika niskiego ciśnienia rozdmuchu (T2). Gdy ciśnienie przyjmuje za dużą wartość (na przykład na skutek zmiany nastawy ciśnienia wstępnego rozdmuchu lub zbyt wydajnej rekuperacji do tego zbiornika) to jest upuszczane przez zawór (V13) do przewodu ssącego pierwszego stopnia sprężania (P1). Dodatkowo na tym przewodzie znajdują się dwa, połączone razem zbiorniki (T4) i (T5) z minimalnym podciśnieniem (około -0.01 bar względem atmosferycznego). Należy traktować te dwa zbiorniki jako jeden. Ich podział wynikał z problemów z przestrzenią. Funkcyjnie pełnią tą samą rolę. Wszystkie „4” zbiorniki połączone są z czterema zaworami (V15.1-V15.4) umieszczonymi w zintegrowanym zaworze rozdmuchującym (V15). Odpowiednio są to zawór wstępnego rozdmuchu (V15.2), zawór niskiego ciśnienia rozdmuchu (V15.3), zawór wysokiego ciśnienia rozdmuchu (V15.4), zawór dekompresji (V15.1). Drugie strony w/w zaworów łączą się

razem wewnątrz zintegrowanego zaworu rozdmuchowego (V15) i trafiają na kolektor rozdzielający (C5) powietrze na poszczególne głowice rozdmuchowe (C6). Głowice rozdmuchowych maszyna może mieć od 1 do 8. Długości wszystkich przewodów między kolektorem, a głowicami są identyczne i przekroje tak dobrane, aby dławić przepływ dzięki czemu jest on w nich równy i każda butelka (T6) dostaje taką samą ilość powietrza w trakcie rozdmuchu.

Po rozpoczęciu pracy, gdy kompresory pracują, a w wszystkich zbiornikach są ciśnienia robocze maszyna może rozpocząć proces rozdmuchu.

Wykaz roboczych ciśnień w zbiornikach (ciśnienie absolutne):

Zbiornik podciśnienia: od 0.0 do -0.1 bara względem atmosfery.

Ciśnienie rozdmuchu wstępnego: od 2 do 5 bar.

Niskie ciśnienie rozdmuchu: od 9 do 11 bar.

Wysokie ciśnienie rozdmuchu: od 24 do 26 bar.

Proces rozdmuchu z punktu widzenia pneumatycznego rozpoczyna się od uszczelnienia górnej powierzchni preformy PET z głowicą. W tym momencie mamy zamknięty układ pneumatyczny i maszyna może rozpocząć proces rozciągania preform prętami rozciągu oraz otworzyć zawór rozdmuchu wstępnego. Działanie to przekłada się na pojawienie się niewielkiego nadciśnienia które formuje i utrzymuje niewielki balon na preformie podczas jej rozciągania. Po osiągnięciu przez pręty rozciągu dolnej pozycji maszyna zamyka zawór rozdmuchu wstępnego (V15.2) i...

Opis procesu bez rekuperacji:

Sterowanie otwiera zawór wysokiego ciśnienia rozdmuchu (V15.4). Na skutek dużej różnicy ciśnień pomiędzy zbiornikiem wysokiego ciśnienia rozdmuchu (T1), a preformą (T6) powietrze gwałtownie wpływa do niej i formuje w butelkę. Po chwili (~0,5 s) butelka już jest uformowana i wystudzona. Maszyna zamyka zawór wysokiego ciśnienia rozdmuchu (V15.4) i otwiera zawór dekompresji (V15.1), a całe zgromadzone w butelkach (T6) powietrze ulatuje do atmosfery przez filtr (F6).

Opis procesu z pełną rekuperacją:

Sterowanie otwiera zawór niskiego ciśnienia rozdmuchu (V15.3). Gdy ciśnienie na kolektorze zintegrowanego zaworu rozdmuchowego (S7) wzrośnie prawie do wartości będącej w zbiorniku niskiego ciśnienia rozdmuchu (T2) oznacza to, że butelki tym powietrzem są już wypełnione i maszyna jak najszybciej, aby nie zakłócić procesu rozdmuchu, zamyka zawór niskiego ciśnienia rozdmuchu (V15.3) i otwiera zawór wysokiego ciśnienia rozdmuchu (V15.4). Powietrze z racji większego ciśnienia, a za tym idących większych sił kończy formować preformę do kształtu butelki. Po chwili (~0,5 s) butelka już jest uformowana i wystudzona. Maszyna zamyka zawór wysokiego ciśnienia (V15.4) i otwiera zawór niskiego ciśnienia rozdmuchu (V15.3). Po wyrównaniu się ciśnień w kolektorze zintegrowanego zaworu rozdmuchowego (S7) z ciśnieniem panującym w zbiorniku niskiego ciśnienia rozdmuchu (T2) maszyna zamyka zawór niskiego ciśnienia rozdmuchu (V15.3) i otwiera zawór rozdmuchu wstępnego (V15.2). Dynamika tego procesu już nie zagraża procesowi formowania się butelki, ale jej brak wpływa niekorzystnie na czas cyklu rozdmuchu, a zatem na wydajność maszyny. Po wyrównaniu się ciśnień w kolektorze zintegrowanego zaworu rozdmuchowego (S7) z ciśnieniem panującym w zbiorniku rozdmuchu wstępnego (T3) maszyna zamyka zawór wstępnego ciśnienia (V15.2) i otwiera zawór dekompresji (V15.1). Pozostała reszta powietrza w butelkach trafia do zbiorników z podciśnieniem (T4) i (T5). Powodując niewielki wzrost w nich ciśnienia (do +0.1 bar względem ciśnienia atmosferycznego). To gęste, ochłodzone procesem rozprężania powietrze znów trafia na pierwszy stopień sprężania (P1).

Maszyna w tym czasie wydaje gotowe butelki i pobiera kolejne rozgrzane preformy do form rozdmuchowych.

Maszyna standardowo dysponuje licznymi czujnikami, które służą do prowadzenia i kontroli procesu rozdmuchu. Część z tych czujników została wykorzystana do prowadzenia niniejszych badań.

Oto ich lista (lista nr. 1):

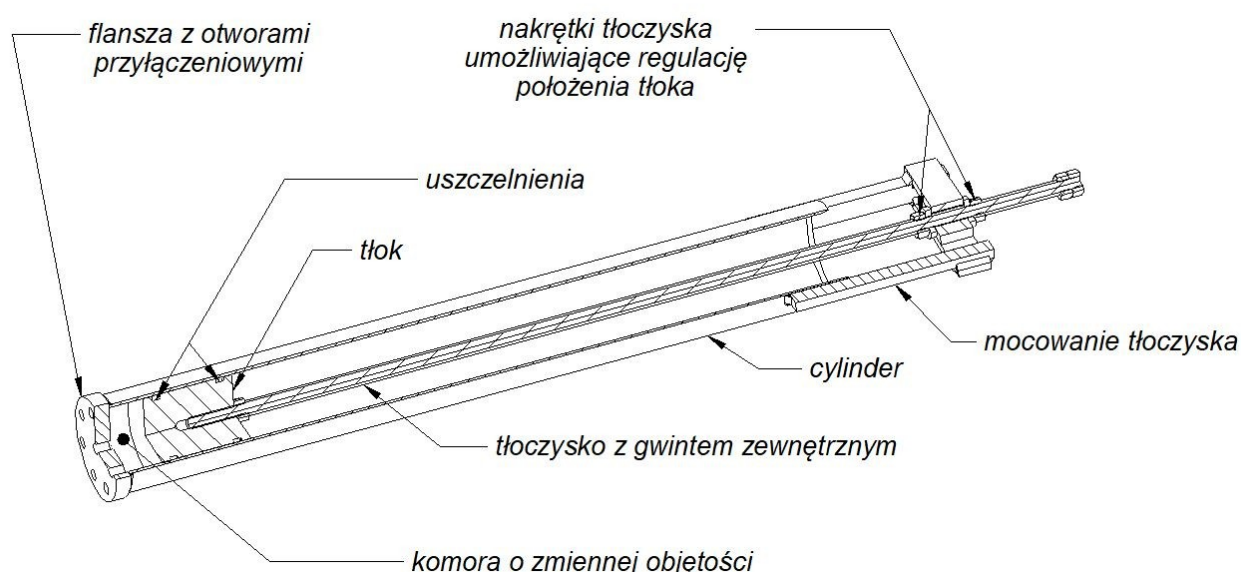
Lp	Miejsce użycia	Producent	Typ / Nr. Katalogowy
1	Czujnik ciśnienia w zbiorniku podciśnienia 1:	Jumo	401002/000-480/4005/502/20/601/61/000
2	Czujnik ciśnienia w zbiorniku podciśnienia 2:	Jumo	401002/000-480/4005/502/20/601/61/000
3	Czujnik ciśnienia w zbiorniku ciśnienia wstępnego:	FESTO	SPTW-P10R-G14-A-M12
4	Czujnik ciśnienia w zbiorniku niskiego ciśnienia:	FESTO	SPTW-P10R-G14-A-M12
5	Czujnik ciśnienia w zbiorniku wysokiego ciśnienia:	FESTO	SPTW-P25R-G14-A-M12
6	Czujnik ciśnienia „Out” w kolektorze zintegrowanego zaworu rozdmuchowego:	FESTO	SPTW-P25R-G14-A-M12
7	Czujnik ciśnienia „In” w kolektorze zintegrowanego zaworu rozdmuchowego:	FESTO	SPTW-P25R-G14-A-M12
8	Czujnik ciśnienia w zbiorniku zmiennej objętości:	FESTO	SPTW-P25R-G14-A-M12
9	Czujnik temperatury w zbiorniku podciśnienia 1:	Jumo	902050/10-999-1003-1-5-100-102-2000/999
10	Czujnik temperatury w zbiorniku podciśnienia 2:	Jumo	902050/10-999-1003-1-5-100-102-2000/999
11	Czujnik temperatury w zbiorniku ciśnienia wstępnego:	Jumo	902023/10-380-1003-1-6-100-104/000
12	Czujnik temperatury w zbiorniku niskiego ciśnienia:	Jumo	902023/10-380-1003-1-6-100-104/000
13	Czujnik temperatury w zbiorniku wysokiego ciśnienia:	Jumo	902023/10-380-1003-1-6-100-104/000

Lista podzespołów maszyny wykorzystywanych w pomiarach (lista nr. 2):

Lp	Miejsce użycia	Producent	Typ / Nr. Katalogowy
1	Zbiornik podciśnienia 1:	Wimest	200L
2	Zbiornik podciśnienia 2:	Wimest	200L
3	Zbiornik ciśnienia wstępnego:	Komino	KP-250-13/0,6
4	Zbiornik niskiego ciśnienia:	Komino	KP-250-25/0,6
5	Zbiornik wysokiego ciśnienia:	Komino	KP-250-25/0,6
6	Falownik sprężarki pierwszego stopnia:	Danfoss	FC-302P22
7	Falownik sprężarki drugiego stopnia:	Danfoss	FC-302P22

W celu przeprowadzenia jak najrzetelniejszych testów maszynę zmodyfikowano o dodatkowe czujniki i oprzyrządowanie.

Aby możliwe było przetestowanie całego zakresu pojemności jakie maszyna może produkować został zaprojektowany zbiornik o zmiennej pojemności.



Podłączono go w miejsce głowic rozdmuchujących z zachowaniem wszystkich parametrów tego przyłącza – ilość przewodów, ich długość i przekrój. Zakres regulacji

pojemności w/w zbiornika to od 0 do 17 litrów. Zakres pojemności jaki może rozdmuchiwać maszyna to: od $8 \times 0,25 \text{ L} = 2 \text{ L}$ do $3 \times 5 \text{ L} = 15 \text{ L}$. Testy zostały przeprowadzone w całym tym zakresie.

Testy i pozyskane dane.

Przeprowadzone testy zostały podzielone na dwie podstawowe grupy: statyczne i dynamiczne.

Dla każdego z w/w typów zostały zebrane dane dla sumarycznej pojemności rozdmuchu równych: 2L, 5L, 10L, 15L.

Ilość danych pozyskana w w/w testach jest znacząca. W tym dokumencie ograniczyliśmy się do pracy tylko na danych kluczowych i niezbędnych w badaniu skuteczności systemu rekuperacji powietrza.

Metodyka testów statycznych.

Po napełnieniu zbiorników do ciśnień roboczych zawory zasilające (od strony kompresorów) zostały zamknięte. Następnie został przeprowadzony jeden pełen cykl rozdmuchu. W czasie trwania tego cyklu zostały zebrane przez PLC dane o: ciśnieniu w każdym ze zbiorników, temperaturze zbiorników, objętości zebranego powietrza w zbiornikach, stanie zaworów rozdmuchowych. Dane te zbierane były z rozdzielczością 1 ms i zostały zapisane w załączonych plikach.

Lista załączonych plików:

10L-01.xlsx
10L-02.xlsx
10L-BLP98-RLP20-RPP20-01.xlsx
10L-BLP98-RLP20-RPP20-02.xlsx
10L-RLP20-01.xlsx
10L-RLP20-02.xlsx
10L-RLP20-RPP20-01.xlsx
10L-RLP20-RPP20-02.xlsx
15L-01.xlsx
15L-02.xlsx
15L-BLP98-RLP20-RPP20-01.xlsx
15L-BLP98-RLP20-RPP20-02.xlsx
15L-RLP20-01.xlsx
15L-RLP20-02.xlsx
15L-RLP20-RPP20-01.xlsx
15L-RLP20-RPP20-02.xlsx
2L-01.xlsx
2L-02.xlsx
2L-BLP80-RLP20-RPP20-01.xlsx
2L-BLP80-RLP20-RPP20-02.xlsx
2L-RLP20-01.xlsx
2L-RLP20-02.xlsx
2L-RLP20-RPP20-01.xlsx
2L-RLP20-RPP20-02.xlsx
5L-01.xlsx
5L-02.xlsx
5L-BLP80-RLP20-RPP20-01.xlsx
5L-BLP80-RLP20-RPP20-02.xlsx
5L-RLP20-01.xlsx
5L-RLP20-02.xlsx

5L-RLP20-RPP20-01.xlsx

5L-RLP20-RPP20-02.xlsx

Nazwy plików mogą się składać z 2 do 5 członów. Każdy człon rozdzielony jest znakiem „-”. Pierwszy oznacza pojemność sumaryczną na jakiej były zbierane dane. Ostatni człon oznacza numer próbki w których dane były zebrane.

Skróty oznaczają:

BLPxx – (Blowing Low Pressure) rozdmuch z użyciem niskiego ciśnienia. xx – oznacza wartość w procentach niskiego ciśnienia przy której następuje przełączenie na rozdmuch wysokim ciśnieniem.

RLPxx – (Recuperation Low Pressure) dekompresja z rekuperacją do niskiego ciśnienia. xx – oznacza procentową wartość ciśnienia przy którym nastąpi przejście do kolejnego etapu procesu.

RPPxx – (Recuperation Pre-Pressure) dekompresja z rekuperacją do wstępnego ciśnienia rozdmuchu. xx – oznacza procentową wartość ciśnienia przy którym nastąpi przejście do kolejnego etapu procesu.

Dla każdej z pojemności sumarycznej przeprowadzone były dwie próby.

Metodyka testów dynamicznych.

Każdy test dynamiczny rozpoczynał się od nabicia zbiorników powietrzem do ciśnień roboczych. System odzysku powietrza był włączany i dla każdej z badanych pojemności sumarycznych była wykonywana seria cykli rozdmuchu. Po ustabilizowaniu się mocy pobieranej przez kompresory i zebraniu wystarczającej ilości danych system odzysku powietrza był wyłączany. W tej części testu zbierane były informacje (przede wszystkim o mocy kompresorów) podczas pracy bez odzysku powietrza.

Dane pozyskiwane były na dwa sposoby. Pierwszy to specjalnie napisana funkcja w PLC zbierająca interesujące nas dane i zapisująca je w pliku z rozdzielczością 1 ms. Druga metoda do dostępny w TwinCat moduł Scope (oscyloskop). Dzięki niemu interesujące nas dane były prezentowane w czasie rzeczywistym na wykresach, a potem zapisane do plików csv z rozdzielczością 1 ms. Dalej pliki te zostały przerobione na arkusze Excel, a wykresy zapisane, obrobione i użyte w niniejszym opracowaniu.

Lista załączonych plików:

2L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-PLC.xlsx

2L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE.xlsx

2L-WithRecuperation_WithoutRecuperation.png

5L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-PLC.xlsx

5L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE.xlsx

5L-WithRecuperation_WithoutRecuperation.png

10L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-PLC.xlsx

10L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE.xlsx

10L-WithRecuperation_WithoutRecuperation.png

15L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-PLC.xlsx

15L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE.xlsx

15L-WithRecuperation_WithoutRecuperation.png

Nazwy plików składają się z 2 do 3 członów. Każdy człon rozdzielony jest znakiem „-”. Pierwszy oznacza pojemność sumaryczną na jakiej były zbierane dane. Człon drugi

informuje, że plik zawiera dane z i bez odzysku powietrza. Trzeci człon oznacza źródło pozyskanych danych.

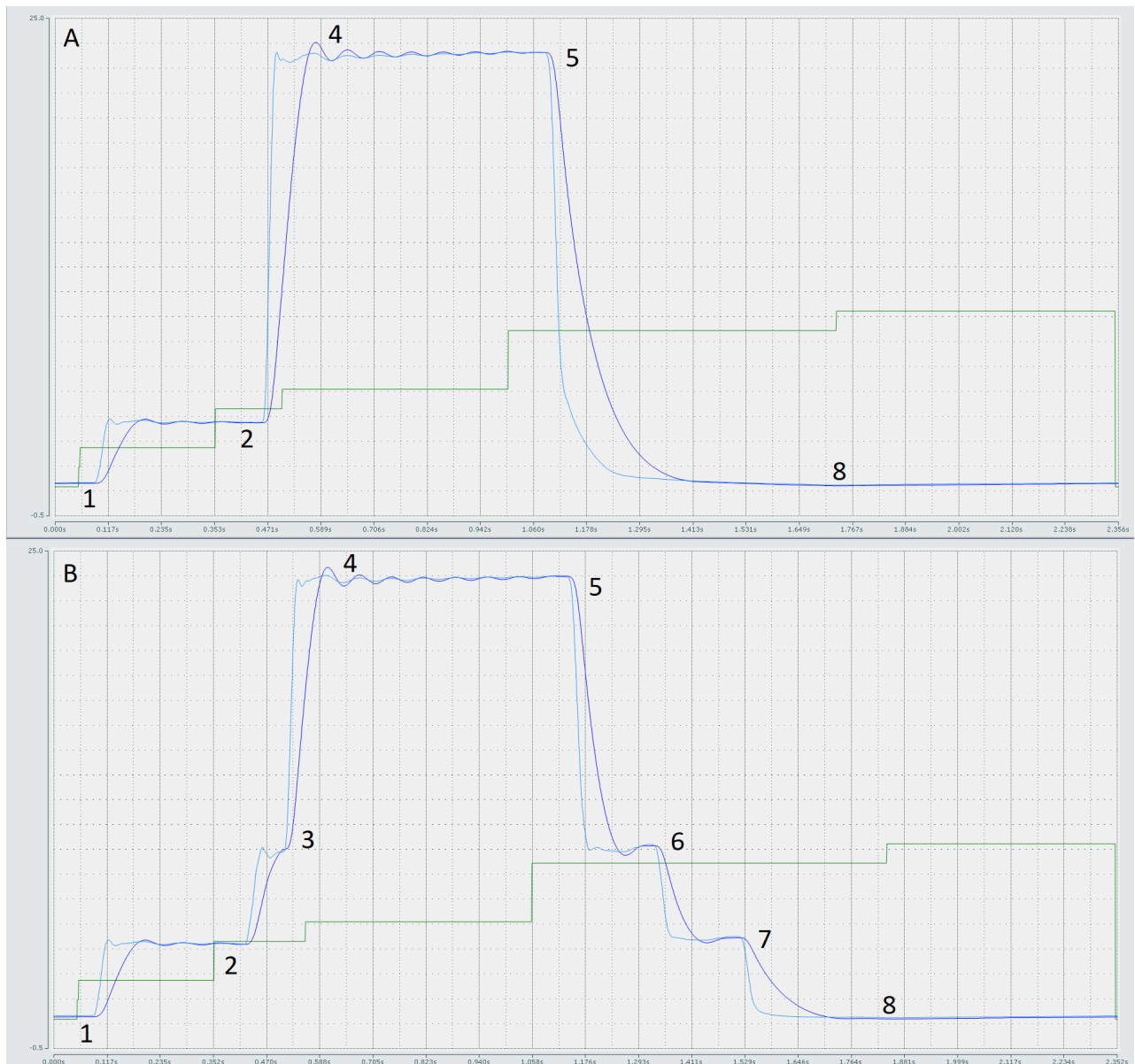
Wycięte w celu powiększenia i obrobione graficznie w/w dane posłużą do stworzenia następujących plików:

Blowing - 10L – All.png

Start kompresorow.png

Omówienie i analiza zebranych danych.

Analiza przebiegu procesu rozdmuchu w oparciu o zgromadzone dane.



Rysunek 1: Przebieg ciśnień podczas procesu rozdmuch dla łącznej objętości 10L.

Rysunek 1 jest podstawą w/w analizy. Widzimy na nim: w kolorze jasno niebieskim ciśnienie panujące w kolektorze zbiorczym zintegrowanego zaworu rozdmuchowego; w kolorze ciemnoniebieskim widzimy odpowiedź ciśnienia wewnątrz przestrzeni rozdmuchiwanej; kolor zielony przedstawia etapy jakie realizuje program; cyfry przedstawiają punkty charakterystyczne rozdmuchu.

Dzięki zestawieniu na rysunku 1 wykresu A (bez odzysku powietrza) z wykresem B (z odzyskiem powietrza) na podobnej osi czasu w łatwy sposób możemy dostrzec różnice w przebiegu procesu. Widoczne na pierwszy rzut oka różnice to punkty: 3, 6 i 7.

Punkt 3 jest efektem realizacji odzysku powietrza poprzez dodatkową fazę rozdmuchu niskim ciśnieniem (BLPxx). Krzywa ciśnienia panującego we wnętrzu butelek jest płynna i łagodna dzięki czemu ten proces nie wpływa negatywnie na formowanie się butelki. Wydłużenie czasu rozdmuchu o 30 ms również nie ma złych następstw w w/w procesie.

Punkty 6 i 7 to kolejno: rekuperacja do niskiego ciśnienia (RLPxx) i rekuperacja do ciśnienia wstępnego (RPPxx). Na tym etapie butelki są już uformowane i wystudzone dlatego przebieg krzywej ciśnienia wewnątrz butelki jest nieistotny. Jedynym niekorzystnym zjawiskiem jest wydłużenie się czasu odpowietrzania o 85 ms. Proces ten trwa do momentu osiągnięcia ciśnienia 0.1 bar względem ciśnienia atmosferycznego w kolektorze zbiorczym zintegrowanego zaworu rozdmuchowego (punkt 8).

Testy statyczne – dane i analiza.

W testach tych należy porównać zgromadzoną, użyteczną ilość powietrza w zbiornikach przed rozpoczęciem próby i po niej. Różnica ta jest niczym innym jak zapotrzebowaniem na powietrze podczas jednego cyklu rozdmuchu. Zestawiając ze sobą te ilości dla procesu z odzyskiem powietrza i bez odzysku powietrza możemy wyliczyć skuteczność zastosowanego rozwiązania. Należy podkreślić, że im mniejsza sumaryczna objętość rozdmuchu tym pomiar jest mniej dokładny ze względu na stosunkowo dużą objętość zbiorników z powietrzem. I tak w Tabeli 1 widzimy różnicę w ilości powietrza w zbiornikach dla prób bez odzysku, a w Tabeli 2 dla prób z odzyskiem powietrza.

Lp.	Źródło Danych	Pojemność Butelek Sumaryczna	j.m.	Ilość powietrza w zbiorniku na początku cyklu [nm³]				Ilość powietrza w zbiorniku na końcu cyklu [nm³]				Różnica ilość powietrza w zbiorniku po 1 cyklu [nm³]			
				Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Dekompresja	Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Dekompresja	Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Dekompresja
1	2L-01	2L	6,1806446189	2,5421517284	0,959160699	0,3952101793	6,0722528785	2,541296361	0,9589346492	0,468647620236	0,1083917404	0,0008553673	0,0002260497	-0,073437441	
2	2L-02	2L	6,0683656575	2,5343291854	0,9590099992	0,3957324452	5,9814878648	2,5327664532	0,9480775911	0,466587914276	0,0868777927	0,0015627321	0,0109324081	-0,070855469	
3	5L-01	5L	6,1689677638	2,5219918879	0,9777446216	0,3961617452	6,0181684673	2,521633448	0,9613929792	0,436441670159	0,1507992965	0,0003584419	0,0163516424	-0,040279925	
4	5L-02	5L	6,042393727	2,5269170062	0,9670179849	0,3964151868	5,8925342881	2,527276046	0,9506441633	0,434944653566	0,1498594389	-0,00035904	0,0163738216	-0,038529467	
5	10L-01	10L	6,1789322686	2,523949446	0,9278601703	0,3950083281	5,905605617	2,5187905494	0,9275588722	0,431224638283	0,2733266516	0,0051588966	0,000301298	-0,03621631	
6	10L-02	10L	5,9472007395	2,5115971202	0,9271064312	0,3957824737	5,7163807563	2,5088558317	0,9019327326	0,427545156784	0,2308199832	0,0027412885	0,0251736986	-0,031762683	
7	15L-01	15L	6,1243918191	2,5316956729	0,9812014498	0,3960352694	5,7828719155	2,5304996798	0,9410097516	0,423956809665	0,341519036	0,0011959932	0,0401916982	-0,027921541	
8	15L-02	15L	6,1457897201	2,2924309181	0,9507755772	0,3967810932	5,8028401033	2,2941639271	0,9124896123	0,422607639839	0,3429496168	-0,001733009	0,0382859648	-0,025826547	

Tabela 1: Objętość powietrza w zbiornikach bez odzysku.

Lp.	Źródło	Pojemność Butelek Sumaryczna	j.m.	Ilość powietrza w zbiorniku na początku cyklu [nm³]				Ilość powietrza w zbiorniku na końcu cyklu [nm³]				Różnica ilość powietrza w zbiorniku po 1 cyklu [nm³]			
				Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Dekompresja	Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Dekompresja	Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Dekompresja
1	2L-BLP80-RLP20-RPP20-01	2L	5,9946107155	2,5330650827	0,9502265398	0,3959964017	5,9305877057	2,5594390012	0,9665983969	0,404435455221	0,0640230097	-0,026373915	-0,01637185	-0,008439054	
2	2L-BLP80-RLP20-RPP20-02	2L	5,9424148705	2,5545840893	0,9657956914	0,3959360985	5,8800242939	2,5793660684	0,9817041585	0,404885797905	0,0623905767	-0,024781975	-0,015908467	-0,008949699	
3	5L-BLP80-RLP20-RPP20-01	5L	6,1919371222	2,5013311455	1,0223312647	0,3952101793	6,0797795065	2,5181616864	1,0652023888	0,414873177066	0,1121576157	-0,016830541	-0,042871124	-0,019662998	
4	5L-BLP80-RLP20-RPP20-02	5L	6,0654583948	2,4960552761	1,0600061494	0,395471816	5,9589439595	2,5373095347	1,0824405375	0,415154045198	0,105144353	-0,01254252	-0,022434368	-0,019682229	
5	10L-BLP98-RLP20-RPP20-01	10L	6,1889264439	2,5185135575	0,9062451916	0,3963383037	6,0123614758	2,5882708455	0,9624718619	0,418360980855	0,1765649681	-0,069757285	-0,05622667	-0,022022677	
6	10L-BLP98-RLP20-RPP20-02	10L	6,040366745	2,5509988579	0,9550827939	0,3964804075	5,8737223799	2,6099261969	1,0079392439	0,419788558351	0,1664433651	-0,058927335	-0,05285645	-0,023308151	
7	15L-BLP98-RLP20-RPP20-01	15L	5,9001086365	2,5345332054	0,9637129954	0,3949090567	5,6291111967	2,6501525475	1,0442566414	0,419777221802	0,2709974398	-0,115619342	-0,080543665	-0,024868165	
8	15L-BLP98-RLP20-RPP20-02	15L	6,0515195904	2,5557839705	1,022565574	0,395054184	5,7902201189	2,6827877486	1,0754698271	0,421196252461	0,2612994714	-0,127003775	-0,052904253	-0,026100834	

Tabela 2: Objętość powietrza w zbiornikach z odzyskiem.

Bilans i porównanie Tabeli 1 i Tabeli 2 widzimy w Tabeli 3. Z obydwu wyników wychodzi średnia skuteczność odzysku powietrza na poziomie 77,66%. Jest to wartość w którą trudno jest uwierzyć. Z tego też powodu podaliśmy decyzję o zebraniu danych dynamicznych i porównaniu wyników z obu zasadniczo różnych metod pomiarowych!

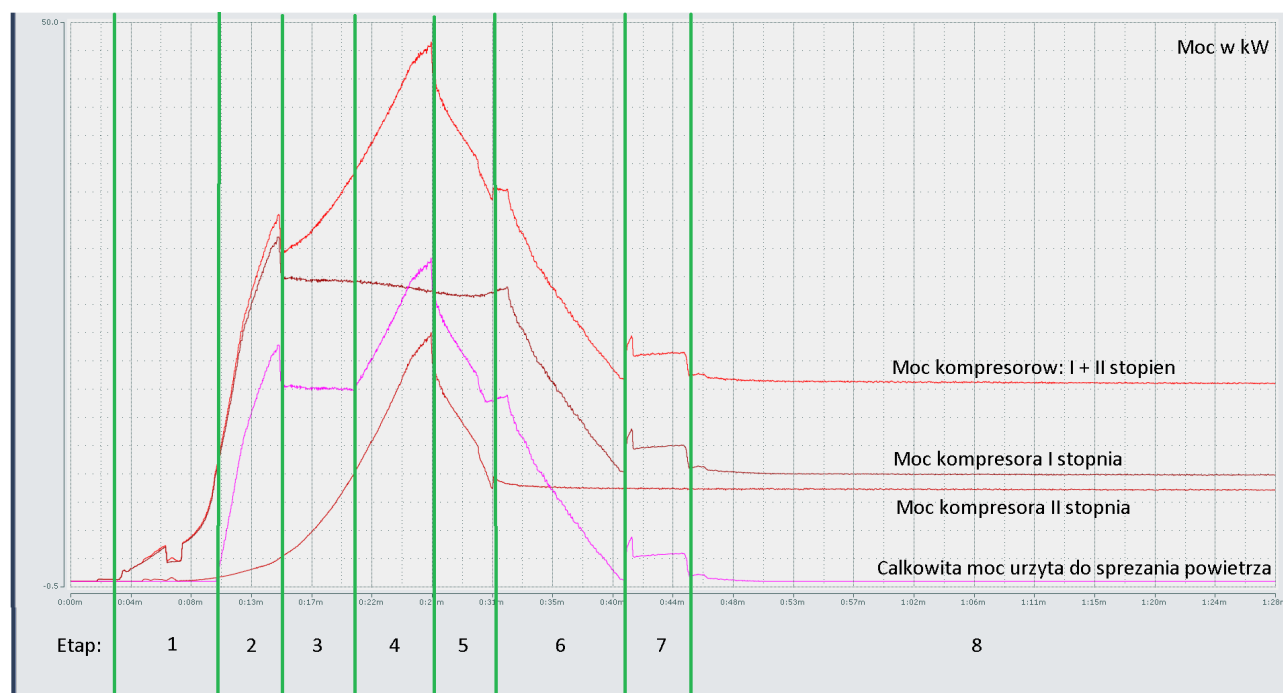
Lp	Pojemność Butelek Sumaryczna	j.m.	Bez odzysku powietrza.				Z odzyskiem powietrza.				Odzysk
			Różnica ilość powietrza w zbiornikach po 1 cyklu [nm^3]				Różnica ilość powietrza w zbiornikach po 1 cyklu [nm^3]				
			Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Bilans	Wys. Ciśnienie	Niskie Ciśnienie	Wstępne Ciśnienie	Bilans	
1	2L	0,1083917404	0,0008553673	0,0002260497	0,1094731575	0,0640230097	-0,0263739184	-0,0163718571	0,0212772342	80,56%	
2	2L	0,0868777927	0,0015627321	0,0109324081	0,0993729329	0,0623905767	-0,0247819791	-0,0159084671	0,0217001304	78,16%	
3	5L	0,1507992965	0,0003584419	0,0163516424	0,1675093808	0,1121576157	-0,0168305408	-0,042871124	0,0524559508	68,68%	
4	5L	0,1498594389	-0,0003590399	0,0163738216	0,1658742206	0,1065144353	-0,0412542586	-0,0224343881	0,0428257887	74,18%	
5	10L	0,2733266516	0,0051588966	0,000301298	0,2787868462	0,1765649681	-0,069757288	-0,0562266703	0,0505810098	81,86%	
6	10L	0,2308199832	0,0027412885	0,0251736986	0,2587349703	0,1666443651	-0,058927339	-0,05285645	0,0548605762	78,80%	
7	15L	0,3415199036	0,0011959932	0,0401916982	0,3829075949	0,2709974398	-0,1156193421	-0,0805436459	0,0748344517	80,46%	
8	15L	0,3429496168	-0,001733009	0,0382859649	0,3795025727	0,2612994714	-0,127003778	-0,0529042531	0,0813914403	78,55%	
Średnia:										77,66%	

Tabela 3: Zestawienie objętości powietrza w zbiornikach bez i z odzyskiem.

Testy dynamiczny – dane i analiza.

Celem tych testów było zebranie danych o mocach pobieranych przez kompresory podczas pracy z i bez odzysku powietrza. Na podstawie różnic w mocy możliwe jest potwierdzenie lub obalenie otrzymanego w testach statycznych wyniku.

Po pierwszej analizie danych wyniki które otrzymaliśmy w żaden sposób nie były spójne ze sobą. Pobierana moc przez kompresory nie była logiczna w żaden sposób ani z wielkościami rozdmuchiwanymi butelek ani z poprzednimi testami. Dążąc do znalezienia źródła błędu wyodrębniliśmy prawie stałą moc którą kompresory pobierają niezależnie od ilości tłoczonego powietrza. Producent kompresorów potwierdził nam ten fakt. Jest to moc, którą kompresory pobierają na smarowanie siebie i zmienia się ona w niewielkim stopniu w funkcji wydajności kompresorów. Dla naszych potrzeb przyjeliśmy, że ma ona stałą wartość. Zjawisko to dobrze można zaobserwować i wyjaśnić na przykładzie uruchomienia kompresorów i nabijania ciśnienia w zbiornikach powietrza – Rysunek 2.



Rysunek 2: Uruchomienie kompresorów

I tak:

Etap 1. Został uruchomiony kompresor niskiego ciśnienia (I stopień). Stopniowo przyspiesza. Na koniec pierwszego etapu rozpoczyna podawanie powietrza.

Etap 2. Sterowanie cały czas zwiększa prędkość obrotową kompresora widząc że ciśnienie na wyjściu kompresora jest niewystarczające. Na koniec tego etapu dochodzi do przesterowania wydajności kompresora (I stopnia). Sterowanie wprowadza korektę.

Również w tym etapie zostaje uruchomiony kompresor wysokiego ciśnienia (II stopień). Rozpędza się on, ale nie tłoczy jeszcze powietrza.

Etap 3. Kompresor niskiego ciśnienia (I stopień) pracuje z maksymalną wydajnością tłoczenia powietrza nabijając zbiornik niskiego ciśnienia. Kompresor wysokiego ciśnienia (II stopień) wciąż się uruchamia bez podawania powietrza na wyjście.

Etap 4. Kompresor wysokiego ciśnienia (II stopień) rozpoczął tłoczenie powietrza. Cały czas zwiększa swoją wydajność.

Etap 5. Kompresor wysokiego ciśnienia (II stopień) po osiągnięciu zadanego ciśnienia stopniowo zmniejsza swoją moc – wydajność. Kompresor niskiego ciśnienia (I stopień) nadal pracuje z pełną mocą.

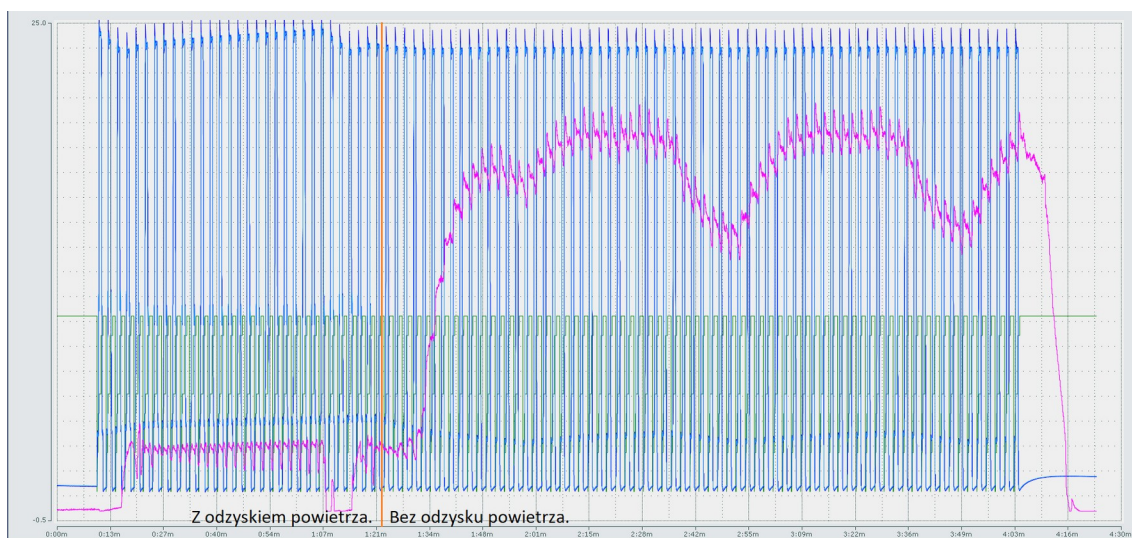
Etap 6. Kompresor wysokiego ciśnienia (II stopień) osiągnął swój minimalny wydatek. Jego zawór proporcjonalny po stronie ssącej zostaje całkowicie zamknięty (objawia się to na wykresie niewielkim pikiem i dalszym niewielkim spadkiem mocy). To jest moment w którym kompresor II stopnia przestaje tłoczyć powietrze, ale wciąż pobiera moc na poziomie 8,6 kW. Po wyłączeniu się kompresora wysokiego ciśnienia (II stopień) kompresor niskiego ciśnienia (I stopień) z powodu braku zapotrzebowania na powietrze zmniejsza swoją moc stopniowo do minimum wydajności.

Etap 7. Kompresor niskiego ciśnienia (I stopień) całkowicie zamyka zawór ssący. Znowu objawia się to niewielkim pikiem mocy. Na koniec etapu 7 obydwie kompresory nie tłoczą powietrza, ale oba pobierają moc ~9,5 kW (I stopień) i 8,6 kW (II stopień). Sumarycznie ~18,1 kW.

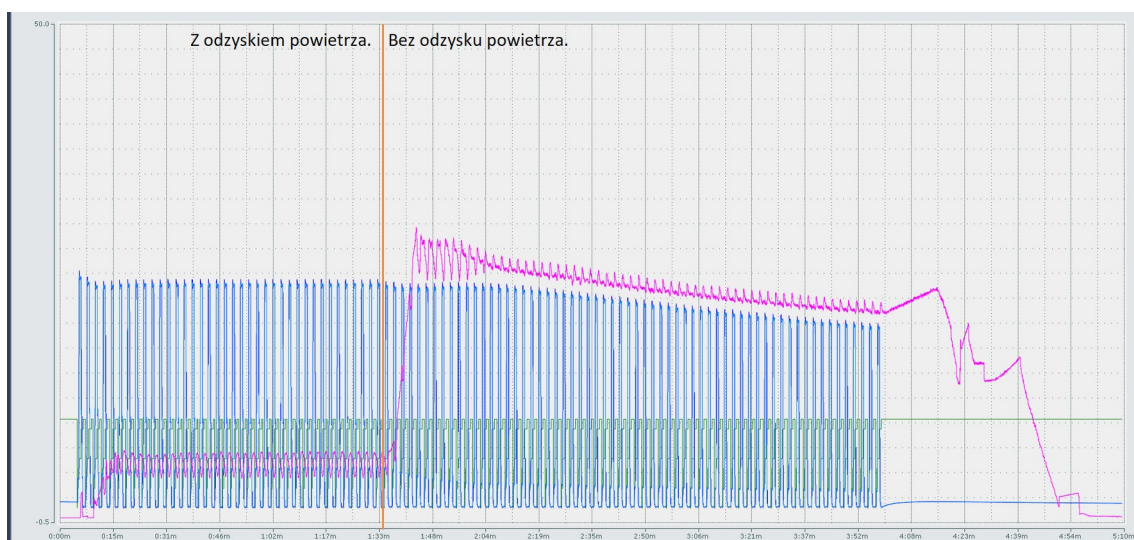
Etap 8. Widzimy tu sytuację w której nie jest tłoczone żadne powietrze a znaczna moc wciąż jest pobierana przez nie. Właśnie ten fakt bardzo skutecznie przekłamywał wyniki skuteczności rekuperacji.

Na potrzeby pomiarów ta stała moc tracona przez kompresory została odjęta od ich mocy nominalnej i powstała **całkowita moc użyta do sprężania powietrza** (linia różowa). To ona będzie używana w dalszych analizach wyników testów dynamicznych. Odpowiada to sytuacji w której kompresory miałyby sprawność 100%, a ich straty całkowicie pomijamy.

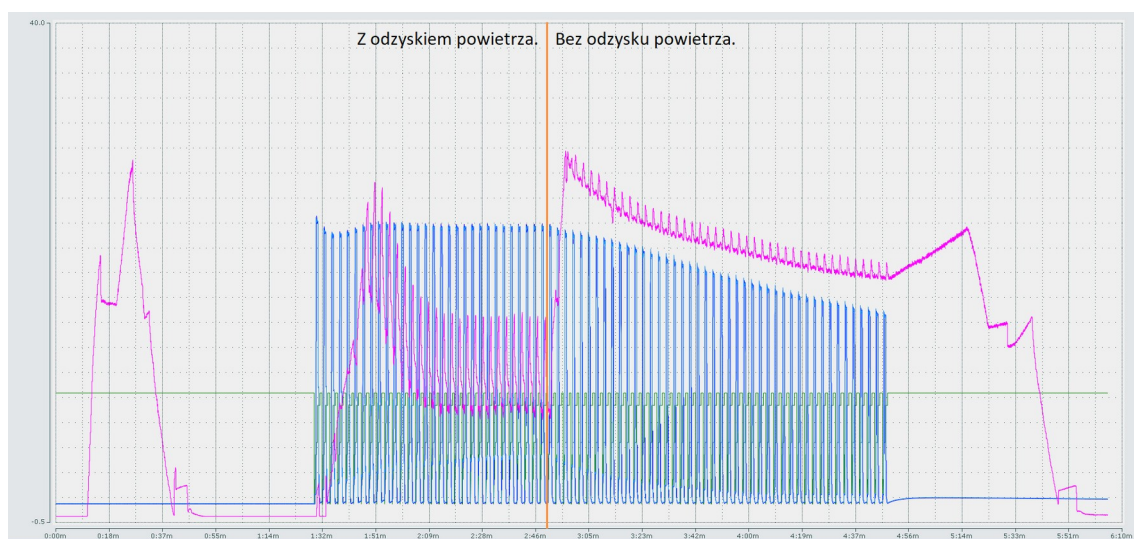
Najpierw zaprezentujemy wykresy przedstawiające kluczowe pozyskane dane – Rysunki 3, 4, 5, 6. Od razu widać, że konieczne będzie uśrednienie mocy powietrza. Na Rysunkach 5 i 6. dostrzegamy, że kompresory mają niewystarczającą moc do pracy bez odzysku. O ile w przypadku 10L braki są niewielkie, tak w przypadku 15L pozyskane dane w tym obszarze nie są akceptowalne. Niezależnie od w/w aspektów wyraźnie zaznacza się różnica poboru mocy w momencie wyłączenia odzysku powietrza na każdym z wykresów.



Rysunek 3: Moc w sprężonym powietrzu dla objętość rozdmuchy 5L.



Rysunek 5: Moc w sprężonym powietrzu dla objętość rozdmuchy 10L.



Rysunek 6: Moc w sprężonym powietrzu dla objętość rozdmuchy 15L.

Dane przedstawione w Tabeli 4 są danymi uśrednionymi. W podanych plikach źródłowych odpowiednio: kolorem zielonym zaznaczono zakres ustabilizowanego poboru mocy dla pracy z odzyskiem powietrza i na pomarańczowo zakres ustabilizowanego poboru mocy dla pracy bez odzysku. W tych zakresach obliczono średnią arytmetyczną mocy sprężonego powietrza. Wyniki dla pojemności 15L bez odzysku zostały odrzucone – poza zakresem wydajności kompresorów.

Lp.	źródło	Pojemność sumaryczna Butelek	j.m.	Moc średnia Z odzyskiem	j.m.	Moc średnia Bez odzysku	j.m.	Odzysk	j.m.
1	2L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE	2L		1,63 kW		5,78 kW		71,87%	
2	5L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE	5L		4,14 kW		17,84 kW		76,80%	
3	10L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE	10L		5,58 kW		23,50 kW		76,25%	
4	15L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE	15L		11,10 kW		brak danych		brak danych	
Średnio:								74,97%	

Tabela 4: Zestawienie średnich mocy sprężonego powietrza z i bez odzysku

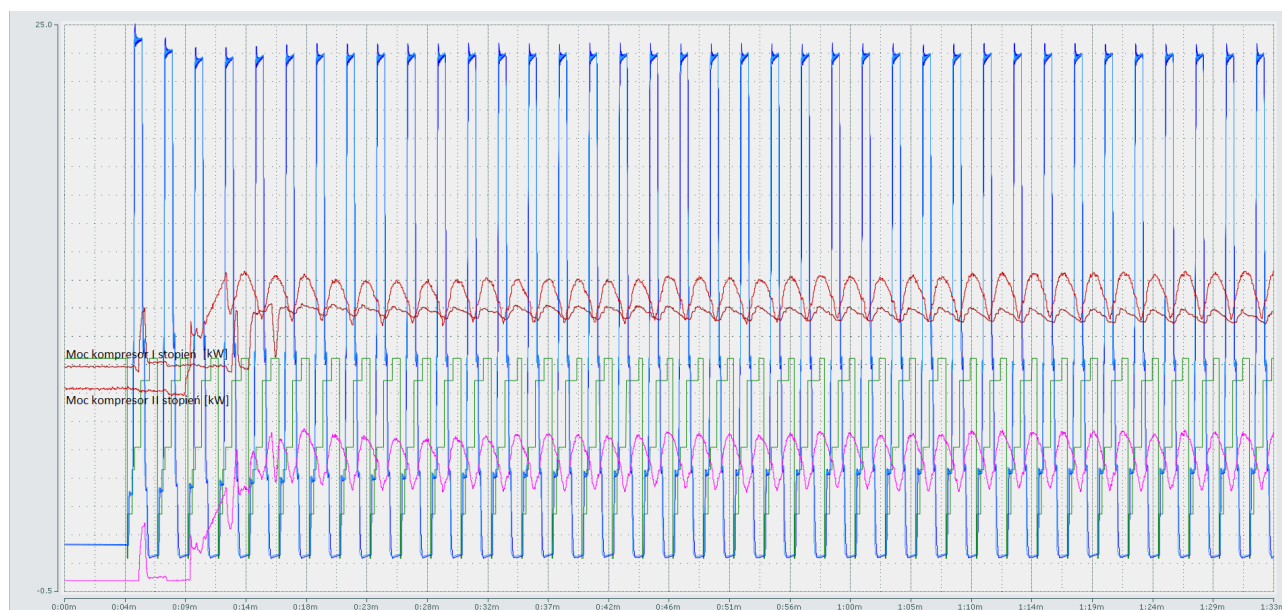
Otrzymane dane po przeliczeniu w w/w sposób dały zaskakująco zbliżone wyniki do otrzymanych w testach statycznych.

Testy dynamiczne: ~75% rekuperacji
Testy statyczne: ~77,7% rekuperacji

Tak duża zbieżność wyników pozyskana tak różnymi metodami badawczymi i obliczeniowymi raczej nie pozostawia wątpliwości co do ich poprawności.

Założenia w kontekście danych pomiarowych – wnioski i jej obrona.

Tak jak wcześniej analizowane były proporcje mocy z pominięciem strat kompresorów dla pracy z i bez odzysku powietrza, tak teraz zestawimy rzeczywisty całkowity pobór mocy przez kompresory do założeń teoretycznych. Punktem wyjścia jest plik: „10L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE.xlsx”. Interesujące nas dane z tego pliku przedstawia Rysunek 7. Ukazuje on rzeczywisty pobór mocy przez kompresory na sumarycznej objętości rozdmuchu najbardziej zbliżonej do przyjętej dla wyliczeń teoretycznych, to jest 10L.



Rysunek 7: Moc pobierana przez kompresory dla 10L

Wyliczenia teoretyczne zakładały 7500 but./h o pojemności 1,5L. W tym przypadku sumaryczna objętość rozdmuchu dla 1 cyklu to: $(7500 \text{ but./h} \times 1,5 \text{ L}) / 1500 \text{ cykli/h} = 7,5 \text{ L}$. A to stanowi 75% przyjętej w próbie objętości ($10 \text{ L} / 7,5 \text{ L} \times 100\%$).

Lp.	źródło	Pojemność sumaryczna Butelek	j.m.	Moc średnia I stopień kompresji	j.m.	Moc średnia II stopień kompresji	j.m.	Całkowita moc Średnia	j.m.
3	10L-WithRecuperation_WithoutRecuperation-SCOPE	10L		12,01	kW	12,92	kW	24,92	kW

Tabela 5: Rzeczywista moc pobierana przez kompresory dla pojemności rozdmuchu 10L.

Tabela 5 Przedstawia średnią arytmetyczną rzeczywistego poboru mocy przez kompresory podczas pracy z odzyskiem powietrza dla objętości rozdmuchu 10L. Po pomnożeniu tej wartości przez w/w stosunek otrzymujemy: $24,92\text{kW} \cdot 75\% = 18,69\text{kW}$. Wartość ta odbiega od przyjętej w założeniach i przedstawionej na Rysunku 8 (20kW) o 6,55% i to w dół.

Zestawienie mocy kompresorów istniejących rozwiązań na rynku z rozwiązaniami przez nas proponowanymi						
Warunki analizy:						
Wydajność: 7500 butelek/h						
Objętość butelki: 1,5 litra						
Lp	Opis	Wyliczona Moc pobierana	j. m.	Oszczędność energii		
1	Opis: Najbardziej klasyczne i najstarsze rozwiązanie. Ciśnienie rozdmuch zasadniczego: 40 bar. Odzysk: 2 etapowy rozdmuch, brak rekuperacji	120 kW		74%	76%	83%
2	Opis: Najbardziej popularne rozwiązanie z tych ekonomicznych Ciśnienie rozdmuch zasadniczego: 25 bar. Odzysk: 2 etapowy rozdmuch, brak rekuperacji	56 kW		45%	48%	64%
3	Opis: Rzadko spotykane na rynku, najbardziej ekonomiczne Ciśnienie rozdmuch zasadniczego: 25 bar. Odzysk: 2 etapowy rozdmuch, 1-dno etapowa rekuperacja.	40 kW		23%	28%	50%
4	Opis: Propozycja nr 1 Worktech (nie występuje na rynku) Ciśnienie rozdmuch zasadniczego: 25 bar. Odzysk: 3 etapowy rozdmuch i 1-dno etapowa rekuperacja	31 kW				
5	Opis: Propozycja nr 2 Worktech (nie występuje na rynku) Ciśnienie rozdmuch zasadniczego: 25 bar. Odzysk: 3 etapowy rozdmuch i 2-wu etapowa rekuperacja	29 kW				
6	Opis: Propozycja nr 3 Worktech (nie występuje na rynku) Ciśnienie rozdmuch zasadniczego: 25 bar. Odzysk: 3 etapowy rozdmuch i 3-y etapowa rekuperacja (wymagana integracja kompresorów)	20 kW				

Rysunek 8: Założenia - zestawienie mocy i sprawności.

Podsumowanie.

Założenia teoretyczne zostały potwierdzone. Efektywność układu odzysku powietrza waha się w zakresie 75-80%. Są to wartości znacząco odbiegające od konkurencji i standardów rynkowych – o 2-2,5 razy. Dzięki tak wysokiej sprawności układu ilość ciepła która powstaje jest stosunkowo niewielka. Do tego chłodzenie wodne jest bardzo skuteczne. To wszystko przekłada się na brak problemów w kwestiach termicznych.

Rozwiązanie na pewno będzie dalej rozwijane już poza programem dofinansowania przez NCBiR.

Obszarem istotnym dla efektywności maszyny okazała się sprawność kompresorów. Maszyna jest uniwersalna jeżeli mówimy o zakresie rozdmuchiwanym butelek (od 8x0,2L do 3x15L) to przekłada się na 7,5 krotną zmianę zapotrzebowania na powietrze. Użyte kompresory powinny mieć stałą sprawność w funkcji wydatku powietrza. Niestety kompresory użyte w budowie prototypu mają stałe straty. To owocuje bardzo małą efektywnością przy małym (nie nominalnym) wydatku powietrza. Należy rozważyć użycie kompresorów np. spiralnych. W przypadku budowy maszyny dedykowanej do konkretnej sumarycznej objętości rozdmuchu (nieuniwersalnej) to rozwiązanie jest akceptowalne.

Zauważono również występowanie zjawisk falowych i rezonansu im towarzyszącemu w układzie rozdmuchu. Wynika on najprawdopodobniej z rozbudowanej instalacji pneumatycznej oraz zbiorników (Foto 1). Widzimy, że te zjawiska wpływają na moce pobierane przez kompresory. Najprawdopodobniej za ich przyczyną moce nie są liniowe w funkcji rozdmuchiwanej objętości. Jednak badanie tych zjawisk nie jest przedmiotem tego programu i tego dokumentu. Nie mniej ze względu na ich korzystny wpływ będą prowadzone dalsze badania nad nimi w ramach prac własnych.



Foto 1: Instalacja układu rozdmuchu powietrza.

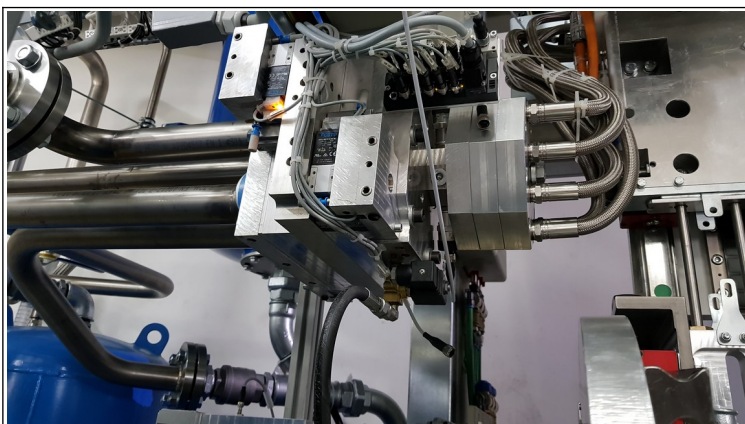


Foto 1: Zintegrowany zawór rozdmuchowy.