Część I. Od procesu do przepływu – podstawy Lean

1. Przepływ jako cel projektowania procesu produkcyjnego

W wielu klasycznych ujęciach zarządzania produkcją proces opisuje się przede wszystkim przez pryzmat stanowisk, operacji i obciążenia maszyn. W ujęciu Lean punkt ciężkości zostaje jednak przesunięty. Najważniejsze pytanie nie brzmi: „jak bardzo zajęta jest maszyna?", lecz: „jak szybko i jak stabilnie materiał przemieszcza się od wejścia do wyjścia procesu?" [1][2]. Taki sposób myślenia stanowi fundament całej niniejszej książki.

Przepływ materiałowy można rozumieć jako sekwencję działań, dzięki którym materiał, półwyrób lub wyrób gotowy przechodzi przez kolejne operacje technologiczne, kontrolne, transportowe i magazynowe. Z punktu widzenia klienta wartość tworzą jedynie te działania, które realnie zmieniają wyrób i przybliżają go do postaci oczekiwanej przez odbiorcę. Wszystkie pozostałe czynności – oczekiwanie, transport, nadmierny zapas, wielokrotna kontrola czy poprawki – zwiększają koszt oraz wydłużają czas realizacji [1][4].

Przepływ należy odróżnić od prostego „wykorzystania zasobów". Proces może pozornie pracować bardzo intensywnie: maszyny są obciążone, operatorzy zajęci, a magazyny pełne. Jednocześnie rzeczywisty czas przejścia materiału przez proces może być długi, a klient nadal będzie czekać na wyrób. Lean przypomina, że lokalna efektywność poszczególnych stanowisk nie musi przekładać się na sprawność całego strumienia wartości [1][3].

W analizie przepływu szczególnie ważne są następujące wielkości: czas cyklu pojedynczej operacji, takt czasu wynikający z zapotrzebowania klienta, poziom produkcji w toku, czas przejścia przez proces oraz przepustowość. Dodatkowo trzeba uwzględniać niezawodność maszyn, poziom braków, wielkość partii i czasy przezbrojeń. To właśnie relacje pomiędzy tymi parametrami tworzą rzeczywisty obraz procesu.

Pojęcie takt time określa rytm, w jakim klient „pobiera" wyrób z procesu. Jeżeli odbiorca oczekuje 480 sztuk wyrobu podczas jednej zmiany liczącej 28 800 sekund czasu dostępnego, takt wynosi 60 sekund na sztukę. Oznacza to, że cały proces – rozumiany jako system – powinien w długim okresie dostarczać jedną sztukę co 60 sekund. Nie oznacza to jeszcze, że każda operacja ma dokładnie taki sam czas, ale odchylenia od tej logiki będą wpływać na WIP, kolejki i zaburzenia przepływu [2][9].

Bardzo pomocne jest prawo Little'a, zgodnie z którym średni czas przepływu jest w przybliżeniu równy stosunkowi średniego WIP do średniej przepustowości. Nawet bez formalnego wyprowadzania wzoru student powinien zrozumieć jego praktyczny sens: im większy zapas w toku, tym dłużej materiał czeka na swoją kolej. Jest to jedna z najprostszych, a zarazem najpotężniejszych intuicji przy projektowaniu procesu [12].

W wielu przedsiębiorstwach wyjściowy sposób planowania produkcji opiera się na maksymalnym wykorzystaniu każdego zasobu. W rezultacie powstają duże partie, wspólne harmonogramy dla różnych wyrobów oraz lokalna optymalizacja. Z perspektywy Lean znacznie bardziej użyteczne jest dążenie do przepływu, nawet jeżeli oznacza ono częstsze przezbrojenia, mniejsze partie lub pozornie niższe wykorzystanie pojedynczej maszyny. Dopiero taki sposób myślenia otwiera drogę do skracania lead time i obniżania poziomu WIP.

W dalszej części książki przyjmujemy zatem zasadę, że celem projektowania procesu jest nie tylko osiągnięcie wymaganej przepustowości, ale również uporządkowanie i przyspieszenie przepływu materiałowego. Oznacza to konieczność krytycznego spojrzenia na strukturę procesu, sposób przekazywania partii, układ stanowisk, standard pracy oraz stabilność operacji.

Rysunek 1. Podstawowa logika przepływu materiałowego



W układzie idealnym materiał przemieszcza się bez zbędnego oczekiwania pomiędzy kolejnymi operacjami.

Dla zachowania spójności we wszystkich dalszych rozdziałach i ćwiczeniach stosowane będą stałe oznaczenia wskaźników. Ich pełne definicje zebrano w rozdziale 15, jednak już na tym etapie warto zapamiętać najważniejsze skróty: TT – takt time, CT – cycle time, LT – lead time, WIP – work in process, TH – throughput, ST – setup time, BT – batch size, TB – transfer batch, FPY – first pass yield [7][9].

2. Co przeszkadza w uzyskaniu przepływu ciągłego?

Przepływ ciągły jest atrakcyjnym ideałem, lecz w realnych procesach produkcyjnych napotyka liczne bariery. Część z nich wynika z samej technologii, część z organizacji pracy, a część z jakości danych wejściowych oraz zmienności popytu. Zadaniem inżyniera nie jest zatem bezrefleksyjne narzucanie *one piece flow* (czyli tzw. przepływowi jednej sztuki)

każdemu procesowi, lecz rozpoznanie rzeczywistych przeszkód i dobór adekwatnych środków zaradczych [1][4].

Pierwszą grupę barier stanowią ograniczenia technologiczne. W wielu procesach nie da się fizycznie przetwarzać jednej sztuki w sposób ekonomiczny. Dotyczy to między innymi obróbki cieplnej, mycia przemysłowego, niektórych procesów lakierniczych, pieców, autoklawów czy zgrzewania opakowań w gniazdach wielosztukowych. Technologia wymusza wówczas przetwarzanie partii, a rolą projektanta staje się takie połączenie operacji partiowych z pozostałymi elementami procesu, aby ograniczyć negatywny wpływ tej konieczności na przepływ [6][12].

Drugą grupą są bariery związane z przezbrojeniami. Im dłużej trwa setup, tym silniejsza pokusa produkowania dużych partii, ponieważ koszt przezbrojenia „rozkłada się" na większą liczbę sztuk. Taki sposób myślenia jest zrozumiały ekonomicznie, ale prowadzi do wzrostu WIP, wydłużenia lead time i mniejszej elastyczności systemu. Narzędzia SMED nie eliminują tej zależności całkowicie, lecz obniżają próg opłacalności zmiany asortymentu i otwierają drogę do mniejszych partii [3][5].

Kolejna przeszkoda dotyczy niezawodności i stabilności procesów. Jeżeli stanowisko regularnie ulega awariom, ma niestabilny czas cyklu lub generuje braki, to bezpiecznikiem staje się bufor materiałowy. Lean nie neguje sensu buforów całkowicie, ale wskazuje, że często są one symptomem głębszego problemu: słabej prewencji, braku standardowej pracy, niewystarczającej jakości wejścia albo niekontrolowanej zmienności [4][8].

Następną grupę stanowią bariery materiałowe i logistyczne. Braki komponentów, nieregularne dostawy, źle dobrane opakowania transportowe, niewygodne miejsca składowania czy długie drogi transportu wewnętrznego prowadzą do przestojów i dodatkowych ruchów. Bardzo często zakłócenia przepływu są powodowane nie tyle przez samą technologię, ile przez organizację zaopatrzenia i zasilania stanowisk [2][10].

Istotna jest również zmienność popytu i struktury asortymentowej. W procesach typu *mixed-model* ten sam zasób obsługuje wiele wariantów wyrobu, co powoduje konieczność częstego przełączania się pomiędzy rodzinami produktów. Jeżeli nie zostanie wdrożone odpowiednie poziomowanie produkcji, supermarket lub logiczny system sekwencjonowania, wówczas nawet dobrze zaprojektowana fizycznie linia zacznie generować przeciążenia i oczekiwanie [2][4].

W praktyce warto patrzeć na przeszkody w uzyskaniu przepływu w sposób objawowy. Jeżeli w procesie obserwuje się długi lead time, duże zapasy w toku, kolejki przed pojedynczym zasobem, nierównomierne obciążenie operatorów albo częste zaburzenia dostępności materiału, to należy cofnąć się do przyczyn pierwotnych. Część z nich będzie miała charakter Lean, część jakościowy, a część stricte techniczny.

Bariera	Skutek dla przepływu	Typowe środki zaradcze
Długie przezbrojenia	duże partie, wzrost WIP, dłuższy LT	SMED, redukcja setup, grupowanie rodzin produktów
Operacja partiowa	oczekiwanie na zebranie partii	zmniejszenie BT/TB, supermarket, FIFO
Awarie i mikroprzestoje	niestabilny CT, bufory bezpieczeństwa	TPM, autonomiczne utrzymanie, analiza przyczyn
Braki materiałowe	przestoje, zmienne obciążenie	supermarket, Kanban, standaryzacja zasilania
Niska jakość	rework, sortowanie, opóźnienia	Poka-Yoke, kontrola u źródła, poprawa FPY
Nierówny mix zleceń	skoki obciążenia, planowanie dużych partii	heijunka, sekwencjonowanie, EPEI

Część III. Ćwiczenia projektowe Lean Six Sigma

11. Ćwiczenia – procesy realizowane partiami

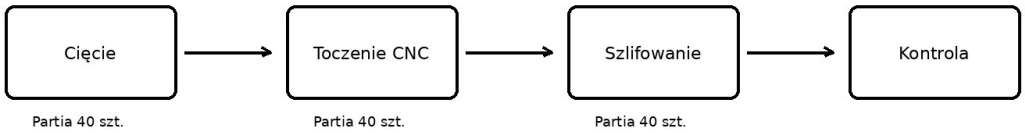
Ćwiczenia z tego rozdziału dotyczą sytuacji, w których proces lub jego fragment z przyczyn technologicznych bądź ekonomicznych pracuje partiami. Zadaniem studenta jest nie tyle „usunąć partię za wszelką cenę", ile tak zaprojektować wielkość BT i TB, przezbrojenia, sekwencję zleceń oraz bufory, aby poprawić przepływ przy zachowaniu realiów procesu.

11.1. Obróbka wałków – zbyt duża partia uruchomieniowa

Zakład produkuje rodzinę wałków napędowych w trzech wariantach średnicy. Przezbrojenia tokarki CNC są relatywnie długie, dlatego planista zleca obróbkę większych partii. W efekcie wyrób spędza znaczną część czasu w oczekiwaniu pomiędzy operacjami.

Ilustracja procesu do ćwiczenia 11.1.

Obróbka wałków



Schemat pokazuje przepływ partiowy; przekazanie do kolejnej operacji następuje po zakończeniu obróbki większej liczby sztuk.

Parametry operacyjne stanu PRZED przedstawiono w tabeli poniżej. Student powinien rozpocząć analizę od rozpoznania wąskiego gardła, wielkości partii, przezbrojeń oraz zależności pomiędzy czasem cyklu a wymaganym taktem.

Operacja	Opis	CT [s]	ST [min]	Operatorzy/zasoby
O1	Cięcie pręta na odcinki	24	10	1
O2	Toczenie CNC	52	55	1 maszyna
O3	Szlifowanie średnicy	37	18	1
O4	Kontrola i pakowanie	28	0	1

Wskaźnik	Wartość PRZED
TT [s/szt.]	45
$C\bar{T}$ procesu [s]	52
sCT [s]	4,8
LT [min]	465
WIP [szt.]	120
TH [szt./zm.]	480
ST [min]	55
BT [szt.]	40
TB [szt.]	40
FPY [%]	96,2
SCRAP [%]	3,8

Problem do rozwiązania:

- Zidentyfikować, która zależność najbardziej wydłuża lead time procesu.
- Ocenić, czy zmniejszenie BT i TB jest możliwe bez utraty wymaganej przepustowości.
- Zaproponować działania redukujące wpływ długiego ST na harmonogram produkcji.

Proponowany sposób rozwiązania 1. Redukcja ST na tokarce metodą SMED oraz zmniejszenie BT z 40 do 20 sztuk.

Proponowany sposób rozwiązania 2. Rozdzielenie BT i TB: obróbka nadal w partii 20 sztuk, lecz przekazywanie po 5–10 sztuk do szlifowania.

Proponowany sposób rozwiązania 3. Wprowadzenie prostego FIFO pomiędzy toczeniem a szlifowaniem oraz poziomowanie kolejności wariantów.

Wskaźnik	Wartość PO
TT [s/szt.]	45
$\bar{CT}$ procesu [s]	45
sCT [s]	3,9
LT [min]	220
WIP [szt.]	54
TH [szt./zm.]	512
ST [min]	22
BT [szt.]	20
TB [szt.]	10
FPY [%]	97,4
SCRAP [%]	2,6

Największą poprawę uzyskano nie przez przyspieszenie każdej operacji, lecz przez zmianę logiki przepływu. Redukcja czasu przezbrojenia umożliwiła zmniejszenie partii, a rozdzielenie BT od TB skróciło oczekiwanie pomiędzy toczeniem a szlifowaniem. Dodatkową korzyścią jest lepsza widoczność problemów jakościowych – wadliwa sztuka ujawnia się wcześniej, zanim cała partia przejdzie przez proces [3][6].

Wniosek dydaktyczny: ćwiczenie należy traktować nie jako jedyny możliwy wariant rozwiązania, ale jako wzorzec logicznego przechodzenia od diagnozy przepływu do doboru działań Lean, a następnie do oceny efektów liczbowych po wdrożeniu zmian.