

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Instytut Budownictwa



mgr inż. Andrzej Karłowski

ROZPRAWA DOKTORSKA

**HIERARCHICZNY SYSTEM PODEJMOWANIA DECYZJI
PRZY BETONOWANIU W OBNIŻONEJ TEMPERATURZE
PODEJŚCIE ELASTYCZNE**

Praca doktorska wykonana w Zakładzie Inżynierii Produkcji Budowlanej
pod kierunkiem: dr. hab. inż. Jerzego Paślawskiego, prof. PP

Poznań, 2024



HIERARCHICZNY SYSTEM PODEJMOWANIA DECYZJI PRZY BETONOWANIU W OBNIŻONEJ TEMPERATURZE.
PODEJŚCIE ELASTYCZNE.
mgr inż. Andrzej Karłowski



Spis treści

Rozdział 1. Wstęp.....	5
1.1. Wprowadzenie	5
1.2. Istota problemu menadżerskiego	5
1.3. Badania własne.....	11
1.4. Proponowane rozwiązania	13
Rozdział 2. Przegląd literatury.....	16
2.1. Wprowadzenie	16
2.2. Specyficzne warunki betonowania w okresie obniżonej temperatury	16
2.3. Podstawowy mechanizm destrukcji mrozowej betonu	18
2.4. Podstawowe zasady betonowania w obniżonej temperaturze	23
2.5. Nowe tendencje w technologii betonowania w obniżonej temperaturze	42
2.6. Nowe tendencje w dziedzinie zarządzania procesami budowlanymi	44
2.7. Podsumowanie	50
Wnioski	55
Rozdział 3. Cel, tezy i przedmiot rozprawy	59
3.1. Cel rozprawy	59
3.2. Tezy rozprawy	59
3.3. Przedmiot rozprawy	60
3.4. Zakres rozprawy	60
Rozdział 4. Teoretyczne podstawy systemu COLCON.....	64
4.1. Wprowadzenie	64
4.2. Elastyczność jako alternatywna idea dla klasycznego podejścia w zarządzaniu	65
Przesłanki zastosowania elastyczności	68
Dualizm elastyczności	71
Klasyfikacja elastyczności	73
Miernik elastyczności	74
Strategie przyjęte przy wdrażaniu elastyczności.....	75
Monitoring otoczenia i procesów w toku	76
4.3. Termodynamiczne zasady tworzenia struktury betonu	78
Ciepło hydratacji.....	78
Temperatura dojrzewania mieszanki betonowej jako główny parametr procesu.....	79



4.4. Wpływ otoczenia – oddziaływanie niekorzystnych warunków pogodowych	81
Sezonowość robót budowlanych	82
Sezonowość dochodowości przedsiębiorstw budowlanych	83
Sezonowość na rynku pracowniczym oraz problemy w dziedzinie BHP	84
4.5. Możliwości wykorzystania eksploracji danych w systemie doradczym	85
Wybór oprogramowania do analizy danych/Data Mining	85
4.6. Przegląd współczesnych metod monitorowania procesu dojrzewania betonu	89
Rozdział 5. System doradczy COLCON	91
5.1. Idea systemu COLCON	91
5.2. Opis poziomu I – wybór okresu realizacji robót betonowych	95
Rosnący ekstremizm zjawisk pogodowych na tle zmian klimatu	97
Współczynniki sezonowości przy planowaniu w harmonogramie ogólnym	98
Podsumowanie – decyzje menadżerskie na poziomie I	102
5.3. Opis poziomu II – dobór mieszanki i metod pielęgnacji	104
Podsumowanie – decyzje menadżerskie na poziomie II	123
5.4. Opis poziomu III – zapewnienie jakości robót betonowych	124
Podsumowanie działania systemu COLCON na poziomie III	128
Podsumowanie działania w systemie COLCON	128
Wieloetapowe podejmowanie decyzji	129
Rozdział 6. Praktyczne zastosowanie systemu COLCON	131
6.1. Wprowadzenie	131
6.2. Opis sprzętu pomiarowego wykorzystywanego w systemie COLCON	132
Możliwości rozbudowy systemu w przyszłości	140
6.3. Przykład zastosowań systemu COLCON	141
PRZYPADEK A. Betonowanie konstrukcji masywnej z barytobetonu	141
PRZYPADEK B. Wykonanie elementów ściennych w podgrzewanym deskowaniu	145
Rozdział 7. Wnioski	151
7.1. Wnioski ogólne	151
7.2. Wnioski szczegółowe	152
7.3. Kierunki dalszych badań	153
Bibliografia	155
Załączniki	165
Dokumentacja fotograficzna	165
Zestawienie wyników badań terenowych i laboratoryjnych	174



Rozdział 1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Zmieniające się warunki klimatyczne jakie panują w Polsce powodują zwiększone ryzyko problemów jakościowych podczas prowadzenia robót budowlanych w zmieniających się warunkach pogodowych.

Będąc zawodowo związany z branżą budowlaną od około 20 lat czynnie uczestniczyłem w przygotowaniu realizacji inwestycji przez sprawowanie funkcji: projektanta, kierownika budowy czy inspektora nadzoru inwestorskiego. Bezpośrednie uczestnictwo i zaangażowanie w procesy inwestycyjne spowodowało, że zauważyłem iż w obecnym czasie istotnymi elementami są jakość wykonanych prac, możliwość zapewnienia ciągłości zatrudnienia i przede wszystkim - przy krótkich okresach realizacji - możliwości wykonywania robót betonowych i żelbetowych przez cały rok bez względu na warunki atmosferyczne.

Wcześniejsze zasady planowania wykluczające realizację robót betonowych w warunkach wymagania zwiększonego ryzyka pogodowego (np. wykluczenie realizacji robót betonowych w okresie od grudnia do marca) inwestorów związane z możliwie krótkoterminową realizacją inwestycji związanej z dążeniem do jak najszybszego zwrotu zainwestowanego kapitału - stawia przed wykonawcą obecnie wygórowane wymagania związane z realizacją inwestycji często przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych i znacznym ryzyku.

1.2. Istota problemu menadżerskiego

Wykonywanie robót w okresie obniżonej temperatury, a zwłaszcza ryzyka jej obniżenia w sposób nagły, nastrocza wiele problemów organizacyjnych przede wszystkim zmiany technologii wykonania robót związanych z wyposażeniem w odpowiednie materiały, sprzęt budowlany, zabezpieczenie pracowników, ale przede wszystkim wymaga zmiany podejścia w zarządzaniu procesami na budowie.



Główne ograniczenia jakie należy uwzględnić to zapewnienie odpowiedniej temperatury koniecznej do prawidłowego przebiegu procesu technologicznego oraz ochrona przed opadami atmosferycznymi. Dodatkowo istotnym elementem jest zapewnienie pracownikom odpowiednich warunków pracy i spełnienie przepisów dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia.

Sprostanie tym dodatkowym wymaganiom powoduje, że prowadzenie robót budowlanych w warunkach obniżonej temperatury zawsze wiąże się z istotnym wzrostem nakładów finansowych przy jednoczesnym zaostrzeniu rygorów dotyczących jakości robót.

Problem prowadzenia robót w warunkach obniżonej temperatury dobowej się wraz z nadejściem okresu jesienno-zimowego, zimowo-wiosennego który w naszych warunkach klimatycznych występuje od 1 października do 30 kwietnia.

Za warunki obniżonej temperatury zgodnie z wytycznymi ITB określa się czas w którym średnia temperatura dobową spada poniżej $+10^{\circ}\text{C}$. Natomiast większym problemem jest sytuacja kiedy w dniu rozpoczęcia robót monolitycznych warunki były sprzyjające a nagle w ciągu doby dochodzi do znacznego obniżenia temperatury poniżej zera ($<0^{\circ}\text{C}$).

Ze względu na zakres pracy analizę wpływu obniżonej temperatury zawężono do procesów związanych wykonywaniem robót monolitycznych w obniżonej temperaturze.

W trakcie wieloletniej praktyki przy realizacji robót betonowych stwierdzić należy, iż wielu inwestorów i wykonawców nie jest świadomych ryzyka, jakie niesie ze sobą prowadzenie robót monolitycznych w warunkach obniżonej temperatury.

Wykonywanie robót monolitycznych w warunkach obniżonej temperatury ma ujemny wpływ na dynamikę twardnienia betonu - niska temperatura spowalnia przebieg procesu hydratacji cementu, wydłuża jego czas wiązania, co powoduje opóźnienie procesu narastania wytrzymałości, przy niskich temperaturach może nastąpić całkowite zatrzymanie procesu hydratacji oraz – co ma kluczowe znaczenie w omawianym przypadku: ryzyko nagłego obniżenia temperatury powodujące jego zamrożenie.

Istotnym elementem jest znaczne obniżenie temperatury we wczesnej fazie wiązania-dojrzwania betonu, gdyż może to doprowadzić do uszkodzenia powstającej w trakcie dojrzwania mikrostruktury betonu przez zamarzającą wodę prowadzi to do obniżenia



wytrzymałości i trwałości betonu a w wielu przypadkach do znacznej degradacji, co wiąże się z rozbiórką elementu i jego ponownym wykonaniem.

Wyróżnić należy cztery okresy wczesnego dojrzewania betonu:

- przed rozpoczęciem wiązania
- między początkiem i końcem wiązania
- od końca wiązania do uzyskania wytrzymałości tzw. krytycznej
- powyżej wytrzymałości krytycznej.

Największe straty wytrzymałości betonu wywołane jego zamarznięciem zachodzą wtedy, gdy występuje ono w okresie między rozpoczęciem wiązania a uzyskaniem wytrzymałości krytycznej. W przypadku gdy wytrzymałość betonu będzie zbyt niska, aby przenieść naprężenia wynikające z ciśnienia lodu rozszerzającego się przy zamarzaniu, występują uszkodzenia struktury, co związane jest z obniżeniem końcowej wytrzymałości betonu i pogorszeniem jego jakości. Straty wytrzymałości mogą dochodzić nawet do 80%, zwłaszcza jeśli zamrożenie było wielokrotne. Beton po osiągnięciu wytrzymałości krytycznej -odporności mrozowej, tj. $0,2R_{28}$ czyli np. 5 MPa, jest odporny na uszkodzenia spowodowane działaniem niskiej temperatury.

Aby zapewnić skuteczną ochronę przed niską temperaturą konieczne jest wcześniejsze przygotowanie odpowiedniej technologii realizacji procesu betonowania w obniżonej temperaturze. Nie oznacza to jednak, że zastosowanie środków przyjętych na podstawie aktualnie panujących warunków oraz prognozy na najbliższe dni gwarantuje osiągnięcie poprawnych rezultatów. Z reguły prognoza opiera się na scenariuszu najbardziej prawdopodobnym. Należy jednak liczyć się z możliwością zaistnienia scenariusza pesymistycznego, który wiązać się może z nagłym spadkiem temperatury otoczenia, co prowadzić może do destrukcji dojrzewającego betonu.

Zgodnie z zasadami wykonywania robót monolitycznych w warunkach obniżonej temperatury zawartych w instrukcji ITB (Wytyczne wykonywania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonej temperatury) czas w jakim beton może zamarznąć jest zależny od wielu czynników między innymi:



- temperatury otoczenia w trakcie układania mieszanki betonowej;
- temperatury mieszanki betonowej w chwili jej wbudowania.

W związku z powyższym w okresie obniżonej temperatury zaleca się stosowanie odpowiednich technologii poprzez:

- dobór odpowiedniej mieszanki betonowej poprzez stosowanie cementów o wyższej zawartości klinkieru np. CEM I;
- stosowanie domieszek w celu zmniejszenia ilości wody która może zamarznąć;
- stosowanie domieszek przeciwmrozowych zwiększających stężenie soli obniżających, temperaturę zamarzania wody,
- podgrzewanie kruszyw i wody zarobowej,
- napowietrzanie mieszanki betonowej.

Badania związane z doбором odpowiednich technologii zabezpieczenia mieszanki betonowej przed niekorzystnym wpływem oddziaływania obniżonej temperatury przeprowadzono wielokrotnie zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i na budowie, co wykazało iż powyższe rozwiązania sprawdzają się w określonych przewidywanych warunkach. Problem pojawia się wtedy, gdy nagle następuje znaczne obniżenie temperatury otoczenia poniżej spodziewanej (prognozowanej) wartości i założone parametry zabezpieczenia mieszanki betonowej okazują się niewystarczające.

Należy podkreślić, że zbytняя wiara w efektywność modyfikacji betonu domieszkami (np. możliwość realizacji procesów do temperatury otoczenia – 15°C) wynika przede wszystkim z chęci zapewnienia konkurencyjności, a w praktyce – jak podaje wspomniana instrukcja ITB Wykonywanie robót betonowych w okresie obniżonej temperatury, 2020:77) „ **w rzeczywistości, jak wykazują badania, obniżenie temperatury zamarzania betonu przy zalecanym przez producentów maksymalnym dozowaniu dostępnych na rynku domieszek, może być znacznie mniejsze od deklarowanego i nie przekraczać od -0,7 do -0,8°C**”.

Autor w swojej praktyce spotkał się z przypadkiem wykonania stropu nad parterem w budynku mieszkalnym jednorodzinny w warunkach obniżonej temperatury (temperatura w nocy

spadła poniżej -9°C) oraz z posadzką betonową wykonywaną w temperaturze znacznie powyżej 5°C i w tym przypadku w nocy również wystąpiło znaczne obniżenie temperatury do -7°C . W obu przypadkach trzeba było dokonać rozbiórki i wykonać te elementy na nowo. Nie było możliwości naprawy, gdyż wykonane elementy nie osiągnęły odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie (wymaganej w projekcie) oraz wystąpiły znaczne złuszczenia. **Koszty rozbiórki i ponownego wykonania tych elementów przy uwzględnieniu kar wynikających z opóźnienia realizacji ostatecznie wynosiły około 300÷400% w stosunku do wartości zakładanej.**

W wyniku przemrożenia betonu mogą pojawić się mikropęknięcia, a także pojawić się łuszczenie, co oznaczać może konieczność wyburzenia danego elementu ze względu na brak osiągnięcia wymaganych parametrów (np. wytrzymałości na ściskanie lub obniżonej trwałości elementu konstrukcji (niedotrzymanie wymagań w zakresie nasiąkliwości czy wodoprzepuszczalności) oraz odpowiednich walorów użytkowych np. dotyczących odporności na ścieranie.)

Poniższe rysunki (rys.1.1. i rys. 1.2.) przedstawiają typowe uszkodzenia stropu i posadzki w wyniku nagłego obniżenia temperatury otoczenia we wczesnej fazie dojrzewania mieszanki betonowej.



Rysunek 1.1. Uszkodzenie powierzchni stropu



Rysunek 1.2. Uszkodzenie posadzki przemysłowej

Należy podkreślić problemy nawiązujące do wyżej przytoczonych przykładów: uszkodzenie stropu betonowanego i uszkodzenia płyty szczelnej na stacji paliw realizowanych w warunkach zagrożenia spadkiem temperatury. W obu przypadkach do uszkodzeń doszło w weekend. Szef przedsiębiorstwa wykonawczego i jego pracownicy wierzyli, że domieszki umożliwiają betonowanie w temperaturze do -15°C . Następnie kiedy już było jasne, że następuje znaczne obniżenie temperatury – właściciel przedsiębiorstwa wykonawczego wraz z pracownikami przyjechali na budowę w celu zabezpieczenia wykonanych elementów i przykrył je folią budowlaną. Efekt był taki, iż to okrycie powierzchni betonowej nie zabezpieczyło dojrzewającej mieszanki betonowej, a dodatkowo na całym stropie pojawiły się uszkodzenia powierzchni - ślady pracowników układających tą folię. Po kilku dniach beton miał wytrzymałość tylko 4-6 MPa i wszystko wskazywało na uszkodzenia struktury betonu w początkowym etapie dojrzewania. W przypadku realizacji płyty szczelnej na stacji paliw pracownicy pozostawili wykonaną powierzchnię płyty szczelnej w piątek i pojawili się ponownie w poniedziałek, kiedy powierzchniowe uszkodzenia zdyskwalifikowały wykonany element. Konieczność jego naprawy spowodowała naliczenie kar za opóźnienie realizacji całości inwestycji.



Sugerowane przyczyny takiego stanu rzeczy (na podstawie posiadanej wiedzy i doświadczenia) obejmują:

1. Brak odpowiedniej wiedzy wykonawcy i inwestora odnośnie konsekwencji ryzyka związanego z dużą dynamiką zmian w otoczeniu,
2. Tradycyjne podejście do zarządzania procesami budowlanymi,
3. Niska jakość robót budowlanych,
4. Brak odpowiedniej kadry (monitoring i nadzór realizowanych procesów).

Istotne wydają się szczególnie przyczyny związane z brakiem wiedzy odnośnie ryzyka związanego z dużą dynamiką zmian w otoczeniu, tradycyjnym podejściem opartym na jednorazowym podejmowaniu decyzji oraz brakiem odpowiedniej kadry zajmującej się monitoringiem i nadzorem procesów w toku.

1.3. Badania własne

Opisane problemy zmotywowały autora do podjęcia badań skoncentrowanych na analizie zmian temperatury w mieszance betonowej oraz w otoczeniu, w jakim przebiega proces dojrzewania.

W roku 2006 zakupiono pierwszy rejestrator, dzięki któremu można było analizować przebieg zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania betonu z wykorzystaniem czujników przewodowych PT100. Kolejnym etapem było wyposażenie tego rejestratora w moduł GSM oraz zakup drugiego rejestratora z wbudowanym modułem GSM. Umożliwiło to prowadzenie badań zarówno na budowie jak i w laboratorium oraz odczytywanie danych - analizowanie wyniki w czasie rzeczywistym z dowolnego miejsca z zasięgiem danych komórkowych lub z dostępem do Internetu poza laboratorium i placem budowy.

Po wieloletniej analizie przebiegu zmian temperatury mieszanek o różnych parametrach okazało się, iż istotnym zagadnieniem jest sprawdzalność prognozy pogody. W przypadku wyboru odpowiedniej opcji zabezpieczenia mieszanki betonowej dla prognozowanych warunków pogodowych przy niekorzystnej zmianie - pogorszeniu pogody (znaczne obniżenie temperatury otoczenia względem prognozowanej temperatury) może się okazać, iż informacje są błędne, może to spowodować uszkodzenia mieszanki betonowej. W trakcie badań okazało się, że istotne znaczenie mogą mieć znaczne gwałtowne lokalne spadki



temperatury (do -4°C w stosunku do prognozy dotyczącej analizowanego obszaru) wykonywany element nie będzie miał zakładanej wytrzymałości (oraz innych wymaganych właściwości) i **trzeba będzie dokonać rozbiórki i wykonać go na nowo, co wielokrotnie zwiększy koszt realizacji przedmiotowego elementu i dodatkowo wykonawca będzie musiał ponieść kary za opóźnienia lub nieterminowe zakończenie całego przedsięwzięcia.**

W związku z tym kolejnym etapie zakupiono stację pogodową z modułem internetowym dzięki któremu można było zbierać lokalne parametry czynników pogodowych oraz weryfikować zgodność prognozy pogody. Lokalna stacja pogodowa pozwala określić współczynniki korekcyjne względem prognozowanej pogody dla danego obszaru a konkretną lokalizacją na terenie budowy.

W późniejszym czasie park sprzętowy wzbogacono o autonomiczne czujniki bezprzewodowe współpracujące przez protokół BT (bluetooth) z rejestratorem GSM.

Opisany sprzęt zastosowano przy realizacji wielu inwestycji budowlanych związanych z pełnieniem funkcji kierownika i inspektora nadzoru podczas wykonywania elementów betonowych i żelbetowych pozwoliła na wykonywanie badań w warunkach rzeczywistych na budowie. Natomiast w laboratorium Politechniki Poznańskiej wykonywane były badania w warunkach laboratoryjnych w komorze klimatycznej i komorze chłodniczej (skoncentrowane przede wszystkim na innowacyjnych rozwiązaniach dotyczących np. zastosowania modyfikacji materiałowych, opcji podgrzewania mieszanki betonowej w początkowym okresie dojrzewania itp. W badaniach tych potwierdzono ograniczone możliwości zabezpieczenia dojrzewającego betonu domieszkami w przypadku nagłego spadku temperatury otoczenia.

W okresie ponad 15 lat wykonano dziesiątki pomiarów i rejestracji zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania betonu. Badania realizowano na budowie oraz w warunkach laboratoryjnych, co pozwoliło na stworzenie bazy danych opartych na różnorodnych przypadkach. Ze względu na objętość tylko część tych wyników została umieszczona w rozprawie w formie załączników w postaci tablic pomiarowych, wykresów oraz parametrów charakterystycznych dla określonych receptur mieszanki betonowej.

1.4. Proponowane rozwiązania

Zagadnienie betonowania w obniżonej temperaturze oraz niska jakość robót budowlanych (rozumiana jako powszechnie spotykany brak monitoringu potwierdzającego poprawność przebiegu procesów w toku) jest dość powszechna i generuje poważne dalsze konsekwencje w postaci:

- przekroczenia budżetu
- przekroczenia terminów realizacji

oraz dodatkowo inne problemy, takie jak:

- konieczność rozbiórki i ponownego wykonania (ang. rework),
- utrata reputacji na rynku,
- spory pomiędzy uczestnikami przedsięwzięcia (powoływanie ekspertów itp.).

Logicznym działaniem w celu zagwarantowania prawidłowego przebiegu procesów jest przede wszystkim racjonalne planowanie, gwarantujące odpowiednią synchronizację poszczególnych procesów realizowanych przez różnych wykonawców. Już na tym etapie widoczne są problemy wynikające z konieczności realizacji procesów w warunkach zmiennego otoczenia. Nawet relatywnie krótki horyzont planowania nie gwarantuje możliwości realnego przewidywania warunków, w których proces będzie przebiegał. Dodatkowo w przypadku robót betonowych należy wziąć pod uwagę zmieniające się cechy mieszanki betonowej i betonu w czasie. Ma to znaczenie w procesie dostawy mieszanki betonowej. Ryzyko niekorzystnej zmiany jej cech (np. konsystencja czy temperatura mieszanki betonowej) przed dostarczeniem na budowę, jak i w późniejszym procesie dojrzewania (często trudno jest zapewnić odizolowanie betonu w dojrzewającym elemencie betonowym od otoczenia). Istotnymi czynnikami tych zmian właściwości są czas i temperatura (zagrożenie pojawia się w przypadku znacznego spadku temperatury (np. o kilkanaście stopni Celsjusza) w relatywnie krótkim czasie - np. kilku godzin).

Analizując różne możliwości zarządzania produkcją budowlaną i typową produkcją fabryczną, podkreślić należy wysoki poziom ryzyka i niepewności, dużą zmienność i złożoność charakterystyczną dla produkcji budowlanej.



W celu ograniczenia wpływu tych niekorzystnych oddziaływań podejmowane są różne działania, z których wymienić należy:

- usprawnienie planowania (np. Last Planner®),
- zastosowanie rozwiązań zmierzających do upodobnienia budownictwa do produkcji fabrycznej (uprzemysłowienie budownictwa w postaci prefabrykacji czy systemu budownictwa monolitycznego – realizowanego w systemowych urządzeniach formujących),
- zastosowanie systemów zarządzania jakością (łączonych często także z BHP i zarządzaniem środowiskiem), które prowadzą do opracowania biblioteki dobrych praktyk – procedur postępowania przy realizacji procesów budowlanych),
- monitorowanie wybranych parametrów procesów (np. temperatura),
- outsourcingu opartego na zarządzaniu ryzykiem i powierzeniu często wielu procesów zewnętrznym organizacjom (podwykonawcom).

Na bazie doświadczeń własnych autora i licznych przykładów z literatury (omawianej szerzej w następnym rozdziale) stwierdzić można, że powyższe działania przynieść mogą ograniczone efekty, gdyż nie ograniczają ryzyka wynikającego z konieczności podejmowania decyzji technologicznych z pewnym wyprzedzeniem w stosunku do momentu realizacji. Szczególnym przypadkiem są tu procesy związane z zastosowaniem mieszanki betonowej i realizacja ich w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu. **Autor proponuje metodę redukcji ryzyka dzięki zastosowaniu etapowego podejmowania decyzji przy zastosowaniu podejścia elastycznego.** Koncepcja trójpoziomowego systemu doradczego do wspomagania decyzji technologicznych przy betonowaniu jest rozwiązaniem własnym opracowanym na podstawie doświadczeń na budowie jako kierownik budowy czy inspektor nadzoru.

Motywacją do podjęcia przedstawionej tematyki jest wieloletnia praktyczna działalność w dziedzinie budownictwa i obserwacja problemów związanych z prawidłowym przebiegiem procesu dojrzewania mieszanki betonowej. **Kluczową przyczyną problemów w zarządzaniu procesami budowlanymi jest deficyt informacji w momencie podejmowania decyzji i**



podejmowanie decyzji przy akceptacji znacznego ryzyka wynikającego z akceptacji tej luki informacji.

Jedną z wielu przesłanek były zaobserwowane uszkodzenia elementów betonowych wykonywanych w okresie obniżonej temperatury, które wymagały rozbiórki i ponownego wykonania.

W związku z sygnalizowanymi wcześniej problemami (luka informacyjna w momencie podejmowania decyzji, istotna zależność od otaczającego zmiennego środowiska oraz ekstremalnie wysokie koszty w przypadku niedotrzymania wymagań jakościowych) zaproponowano podejście oparte na etapowym podejmowaniu decyzji:

- 1) dobór terminu realizacji robót betonowych (z uwzględnieniem współczynników sezonowości i związanych z tym ryzykiem wystąpienia niekorzystnych warunków realizacji),
- 2) dobór odpowiedniej mieszanki betonowej z uwzględnieniem aktualnej sytuacji pogodowej oraz prognozowanej w najbliższym okresie (do czasu uzyskania wytrzymałości krytycznej, kiedy beton uzyska odporność mrozową)
- 3) Możliwości podjęcia dodatkowej decyzji (dotyczącej opcji zapewniającej osiągnięcie wymaganych parametrów), kiedy pojawi się ryzyko uszkodzenia struktury dojrzewającego betonu w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego.



Rozdział 2. Przegląd literatury

2.1. Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale przedstawiono kluczowe problemy występujące przy betonowaniu w sytuacji zagrożenia nagłym spadkiem temperatury na tle poglądów wielu naukowców, którzy podjęli badania w dziedzinie betonowania w obniżonej temperaturze oraz w świetle obowiązujących zaleceń, instrukcji i norm. W pierwszej części omówiono specyficzne warunki betonowania w okresie obniżonej temperatury – definiując warunki podane w różnych instrukcjach i normach. Następnie opisano mechanizm ewentualnej destrukcji mrozowej. Kolejnym omawianym zagadnieniem są zasady betonowania w obniżonej temperaturze. Następnie omówiono innowacyjne trendy technologiczne w omawianej dziedzinie. Wskazano także podstawowe problemy w zarządzaniu procesami budowlanymi oraz przedstawiono z nowe tendencje w tej dziedzinie. Rozdział zakończono podsumowaniem.

2.2. Specyficzne warunki betonowania w okresie obniżonej temperatury

Warunki zimowe stanowią poważne wyzwanie przy realizacji robót betonowych z racji konieczności zastosowania rozwiązań technologicznych dedykowanych do warunków, kiedy utrzymuje się niska temperatura otoczenia. Natomiast warunki obniżonej temperatury stanowią zagrożenie jakości procesu uzasadniające przyjęcie odpowiednich procedur specjalnych dotyczących betonowania w tych warunkach ze względu na niestabilność warunków realizacji. Obecnie instrukcja na wstępie (ITB 282 2020:67) definiuje jako okres obniżonej temperatury, jako okres, w którym średnia temperatura dobowa powietrza podczas robót betonowych z wynosi poniżej $+10^{\circ}\text{C}$. Zasady wykonywania betonów w obniżonej temperaturze obowiązują, gdy co najmniej w 3 kolejnych dobach średnia temperatura otoczenia jest mniejsza niż $+10^{\circ}\text{C}$ (ITB 282 2020:67). Średnią dobową temperaturę powietrza na poziomie $+5^{\circ}\text{C}$ omawiana instrukcja zaleca traktować jako wartość graniczną, poniżej której ułożoną mieszankę betonową należy chronić przed utratą ciepła. Nawiązuje to do wskazanych dwóch poziomów temperatury w wcześniejszej wersji Instrukcji ITB nr 282 (ITB 282 1995):



- warunków obniżonej temperatury – średnia dobowa poniżej $+10^{\circ}\text{C}$,
- warunków zimowych – średnia dobowa temperatura powietrza poniżej $+5^{\circ}\text{C}$.

Ta ostatnia wartość nawiązuje także do wytycznych zawartych w normach obowiązujących w innych krajach, np.:

- USA – (ACI 306R 2016) – warunki obniżonej temperatury (*cold weather concreting*) występują, gdy temperatura powietrza spadła lub przewiduje się jej spadek poniżej 40°F (4°C) w okresie ochronnym. Okres ten jest określony jako przedział czasu niezbędny w celu ochrony betonu przed niekorzystnym oddziaływaniem niskiej temperatury,
- Kanada – (CSA A23.1/A 23.2) – warunki obniżonej temperatury (*cold weather concreting conditions*), kiedy temperatura powietrza wynosi $+5^{\circ}\text{C}$ lub kiedy istnieje prawdopodobieństwo, że spadnie ona poniżej $+5^{\circ}\text{C}$ w ciągu 24 godzin od ułożenia mieszanki betonowej,
- Afryka Południowa - SANS 10100-2:2014 – Concreting in cold weather (7.2.1.4.1) – beton nie powinien być układany, jeżeli temperatura spada i temperatura otoczenia wynosi poniżej $+7^{\circ}\text{C}$ lub , gdy podczas wzrostu temperatury wynosi poniżej 3°C . Kiedy temperatura podczas układania jest niższa niż 5°C , temperatura betonu nie powinna być niższa niż 10°C . W tym celu dozwolone jest ogrzewanie wody lub/i kruszywa. Podgrzaną wodę i kruszywo należy najpierw wymieszać, a cement dodać dopiero wtedy, gdy temperatura mieszanki będzie niższa niż 30°C . Temperatura układanego betonu nie może spaść poniżej 5°C , dopóki beton nie osiągnie wytrzymałości co najmniej 5 MPa .

W obecnie obowiązującej Instrukcji ITB (ITB 2020) wskazano, że niszczenie struktury twardniejącego betonu może występować już w temperaturze -1°C , kiedy zamarzająca woda znajdująca się w betonie zwiększa swoją objętość, co generuje ciśnienie wywołujące naprężenia rozciągające, które mogą przekraczać wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Jak widać z tego krótkiego przeglądu warunki obniżonej temperatury definiowane są w podobny sposób – temperatura średnia dobowa (obliczana jako średnia z pomiarów o godz. 7 i 19 oraz temperatury minimalnej i maksymalnej dobowej – wg zarządzenia dyrektora IMGW z dnia 06.09.1995). Warto dodać, że wcześniejsza definicja średniej temperatury dobowej



(Instrukcja ITB z roku 1995) opierała się na pomiarach trzech wartości: o godz. 7, 14 i 21, przy czym ostatnia wartość była uwzględniana ze współczynnikiem 2. Zagadnienie zmian zasad obliczeń średniej temperatury dobowej staje się coraz bardziej aktualne w związku z postępującą automatyzacją pomiarów (Bonacci i in., 2013; Y. Li i in., 2014; Z. Li i in., 2016; Villarini i in., 2017).

Przyjęcie temperatury średniej dobowej powyżej 0°C ma swoje uzasadnienie w amplitudzie dobowej, która powinna zapewnić zabezpieczenie betonu przed oddziaływaniem mrozu.

Kluczowym problemem z punktu widzenia betonowania jest zagrożenie nagłym spadkiem temperatury, zwłaszcza podczas dojrzewania betonu. W niekorzystnych warunkach może to oznaczać trwałe uszkodzenie struktury dojrzewającego betonu i obniżenie parametrów wytrzymałościowych do poziomu poniżej wymagań jakościowych. W rezultacie prowadzić to może do konieczności wyburzenia przedmiotowego elementu i wykonania go ponownie. Przyjęto, że uzyskanie odporności mrozowej w oparciu o wytrzymałość na ściskanie (Instrukcja ITB 282 2020) na poziomie 0,2 R_{28} i nie mniej niż 5 MPa. Ponadto w przypadku cyklicznego zamrażania/rozmarzania wskazano wytrzymałość minimalną 15 MPa.

Ponieważ osiągnięcie tej wytrzymałości krytycznej oznacza odporność na zamrożenie (jednak nie na działanie cyklicznego zamrażania/rozmarzania) istotnym jest uzyskanie jej w relatywnie krótkim okresie (najlepiej kilkunastu godzin – w przypadku typowych przymrozków pojawiają się one zwykle nad ranem dnia następnego), co może być utrudnione ze względu na niską temperaturę otoczenia. Niezwykle istotnym jest zatem odpracowanie procedur postępowania umożliwiających osiągnięcie odporności mrozowej w celu ograniczenia ryzyka destrukcji mrozowej.

2.3. Podstawowy mechanizm destrukcji mrozowej betonu

Betonowanie w warunkach obniżonej temperatury stanowi wyzwanie technologiczne szczególnie w przypadku zagrożenia nagłym spadkiem temperatury. Realizacja robót betonowych powinna być prowadzona zgodnie z zasadami podanymi w PN-EN 13670, a jego produkcja powinna spełniać wymagania norm PN-EN 206 oraz PN-B 06265 (ITB 282 2020:71).

Skutki zamrożenia betonu zależą od okresu, w którym nastąpi jego zamrożenie. Z tego punktu widzenia można wyróżnić 4 okresy dojrzewania betonu (ITB 282 2020):

- okres A – przed początkiem wiązania
- okres B – po rozpoczęciu wiązania, ale przed jego końcem
- okres C – po zakończeniu wiązania, ale przed osiągnięciem odporności mrozowej (*frost resistance*)
- okres D – po osiągnięciu tzw. odporności mrozowej – wytrzymałości krytycznej (zamrożenie betonu po uzyskaniu pełnej odporności).

Za szczególnie niebezpieczne uznać należy zamrożenie betonu tuż przed zakończeniem wiązania lub zaraz potem (ITB 282 2020). W tym krytycznym momencie stopień szkodliwości zamrażania (rozumiany jako strata wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości, jaką można osiągnąć przy prawidłowym przebiegu procesu dojrzewania wynosi może do 80% (przy jednokrotnym zamrożeniu) lub do 100% (przy wielokrotnym zamrożeniu (Edmeandes i Day 1992), co ilustruje rys. 2.1.



Rysunek 2.1. Wpływ zamrożenia betonu w okresie dojrzewania na końcową wytrzymałość

(p. 1. czas początku wiązania, p. 2. Czas końca wiązania, p. 3 czas uzyskania przez beton odporności na zamrożenie)

(Neville, 2012) porównuje oddziaływanie mrozu na beton do oddziaływania mrozu na grunty spoiste. Jeżeli beton nie związał, a może zamarznąć, to działanie mrozu będzie podobne do działania ujemnej temperatury na grunt nasycony wodą – ulega pęcznieniu – w rezultacie całkowita objętość betonu wzrasta. Poza tym, z uwagi na brak wody niezbędnej do reakcji



chemicznych, dalsze wiązanie betonu ulega opóźnieniu. Neville zwraca dalej uwagę, że jeżeli zamrożenie betonu nastąpiło bezpośrednio po ułożeniu, to wiązanie nie nastąpi jeszcze, a więc nie utworzy się jeszcze struktura betonu, która będzie mogła być zniszczona przez tworzenie się lodu. W okresie obniżenia temperatury poniżej punktu zamarzania proces wiązania nie zachodzi. Po rozmrożeniu Neville (2012) zaleca ponowne zawibrowanie, co zapewni poprawne wiązanie i twardnienie. W przeciwnym wypadku (brak rewibracji) należy liczyć się, że beton będzie zawierał dużą ilość porów i w konsekwencji wytrzymałość betonu będzie bardzo niska. Jeżeli beton zamarznie po związaniu betonu, jednak przed osiągnięciem odpowiednio wysokiej wytrzymałości na ściskanie, to pęcznienie wynikające z tworzenia się lodu powoduje zniszczenie struktury i nieodwracalną stratę wytrzymałości betonu. Odporność betonu charakteryzującego się odpowiednio wysoką wytrzymałością na ściskanie na zniszczenie podczas oddziaływania mrozu wynika nie tylko z większej wytrzymałości na ciśnienie lodu, ale także z faktu, że duża część wody zarobowej trafi do małych porów żelowych i nie będzie zamarzać (Neville, 2012).

Józwiak, Kliszczewicz i Zybura (Józwiak, Ireneusz; Kliszczewicz, Ryszard; Zybura, 2006) podkreślają znaczenie przemieszczania się fazy gazowej i ciekłej w betonie, przyjmując na potrzeby analizy niszczącego działania mrozu dwa rodzaje przepływów: dyfuzję pary wodnej i przepływ kapilarny wody. Woda w betonie znajduje się w układzie połączonych porów o zróżnicowanym kształcie i różnej budowie. Józwiak podkreśla, że nie łączna porowatość (objętość wolnych przestrzeni), ale rozkład porów w betonie przy uwzględnieniu ich zróżnicowanych rozmiarów ma decydujące znaczenie dla trwałości betonu (przy uwzględnieniu jego przepuszczalności). Klasyfikację porów podano w tabelicy 2.1.



Tabela 2.1 Klasyfikacja porów (Brandt 2003)

Lp.	Klasyfikacja	Rozmiary	Metody badania	Przyczyny powstania	Znaczenie
1	Duże pory	>500 μ m	Mikroskopia optyczna	Sztuczne napowietrzanie albo niedostateczne zagęszczanie	Zmniejszają wytrzymałość
2	Pory wprowadzone (środek napowietrzający)	(50-1250) μ m Zwykle <500 μ m	Mikroskopia optyczna	Sztuczne napowietrzanie	Nieco zmniejszona wytrzymałość, podwyższona odporność na cykliczne zamrażanie/odmrażanie
3	Makropory	>50 nm	Porozymetria rtęciowa	Pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zaczynie	Decydują o przepuszczalności i trwałości
4	Mezopory	(2,5÷50) nm	Porozymetria rtęciowa, adsorbcja-desorpcja gazów	Pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zaczynie, mniejsze pory rozmieszczone w C-S-H	Zjawiska kapilarne powodują naprężenia podczas wysychania betonu
5	Mikropory - pory żelowe	<2,5 nm	adsorbcja-desorpcja gazów	Rozmieszczone w C-S-H	Zjawiska kapilarne mogą występować podczas nawilżania i wysychania

UWAGA: od poziomu 3 – występują pory kapilarne

Za twórcę pierwszej teorii destrukcji mrozowej uznać można (Powers, 1945), który zauważył, że główną przyczyną zniszczenia betonu jest narastające ciśnienie hydrauliczne, które rośnie podczas tworzenia się lodu, kiedy woda jest usuwana z porów betonu. Hipoteza ta nosi nazwę hipotezy ciśnienia hydraulicznego (*hydraulic pressure theory*).

Kolejna hipoteza mechanizmu zamkniętego pojemnika (*closed container theory*) została również zaprezentowana przez (POWERS, 1958). Bazuje ona na znanym powszechnie fakcie, że objętość lodu jest około 9,3% większa od objętości wody. Przy odpowiednio wysokim poziomie saturacji – powyżej 91,7%, jak podają zgodnie (Chatterji, 2003; Rosenqvist i in., 2015) oraz (Łagoda & Gajda, 2021), w temperaturze – 1°C (Jóźwiak-Niedźwiedzka, 2006)), ciśnienie



osiągnie ok. 10 MPa, co doprowadzi do uszkodzenia struktury o niewielkiej wytrzymałości na rozciąganie.

Jednakże nie wszystkie obserwacje zmian objętościowych dadzą się wyjaśnić przy użyciu omawianych wyżej teorii (a zwłaszcza teorią ciśnienia hydraulicznego) (Rosenquist i in. 2015):

- nasycone próbki nienapowietrzonej zaprawy cementowej nadal się rozszerzały, pomimo że zatrzymania spadku temperatury i utrzymywania jej na stałym poziomie,
- zaobserwowano, że próbki napowietrzonej zaprawy cementowej skurczyły się bardziej niż to można wyjaśnić skurczem termicznym.

Kolejna teoria – teoria ciśnienia osmotycznego – została zaproponowana przez Helmut'a i Powers'a (Powers & Helmut, 1953). Zgodnie tą teorią (*osmotic micro ice body growth*) zamarzanie zaczyna się w większych porach – kapilarach, a przy stopniowym obniżaniu temperatury ciśnienie wzrasta w mniejszych porach. Dla danej temperatury w porach kapilarnych ustala się pewna równowaga pomiędzy ilością wody i lodu. Jak podaje Józwiak (2006), po przejściu przemiany fazowej pewnej ilości wody w lód, stężenie pozostałego roztworu wzrasta i osiąga taka wartość, że dalsze obniżenie temperatury musi nastąpić w celu zapewnienia postępu zmiany wody w lód. Nazwa omawianej teorii wynika z różnic w stężeniu roztworu w małych i większych porach – roztwór dążąc do wyrównania stężeń dyfunduje z mniejszych do większych porów (o większej koncentracji roztworu) (Wawrzeńczyk, i, i in., b.d.; Wawrzeńczyk, Molendowska, i in., b.d.).

Z pozostałych, dostępnych w literaturze teorii (Łagoda i Gajda, Józwiak 2006, Rosenquist i in. 2015), na uwagę zasługuje hipoteza (Fagerlund, 1977) , oparta na krytycznym stopniu nasycenia. Fagerlund (1977) badając próbki tego samego betonu, lecz o różnym stopniu zawilgocenia określił krytyczny jego poziom. Dla betonów zwykłych zakres krytycznego stopnia nasycenia wynosi od 0,75 do 0,90 (Fagerlund, 1971, 1977; M. Levitt, 1977).

Podane na podstawie powyższego przeglądu podstawowe teorie destrukcji mrozowej stanowią podstawę zrozumienia tego mechanizmu. Jak widać samo uwzględnienie problemu zwiększania objętości wody pod wpływem przemiany fazowej cieczy w lód nie wystarczą – chodzi przede wszystkim o uwzględnienie zróżnicowania oddziaływania mrozu na wodę



znajdującą się w porach o różnej średnicy. Stanowi to podstawę zabezpieczenia betonu przed destrukcyjnym działaniem mrozu poprzez jego napowietrzanie.

2.4. Podstawowe zasady betonowania w obniżonej temperaturze

Ogólna analiza literatury przedmiotu rozprawy pozwala na stwierdzenie zastosowania dwóch zasadniczych podejść przy ustalaniu zasad prowadzenia robót betonowych w obniżonej temperaturze:

- prowadzenie robót przy założeniu jak najszybszego uzyskania wytrzymałości mrozowej (zakładamy utrzymanie warunków dojrzewania w temperaturze dodatniej i zapewnienie relatywnie wysokiego tempa dojrzewania betonu),
- zapewnienie możliwości dojrzewania betonu w temperaturze obniżonej (poniżej +5°C) bazujące na wykorzystaniu systemu modyfikacji betonu ukierunkowane na obniżenie temperatury zamarzania wody w betonie (Cold Weather Admixture System –(L. A. Barna i in., 2011)).

Drugie z wymienionych podejść preferowane może być w sytuacji, gdy podłoże stanowi wieczna zmarzlina (Krylov & Raton London New York, 2020), (Alzaza i in., 2022) co jest często spotykane w północnej części Rosji, Norwegii, Finlandii czy Kanady. Naturalnie te wyjątkowe sytuacje wymuszają zerwanie z tradycyjnymi metodami i poszukiwanie możliwości specjalnych (np. pozostawienie świeżego betonu do zamarznięcia i oczekiwanie na ocieplenie).

Typowym podejściem jest natomiast dążenie do osiągnięcia wytrzymałości mrozowej poprzez stosowanie osłon i/lub nagrzew, jednak należy zdawać sobie sprawę, że w niektórych sytuacjach stosowanie osłon może być utrudnione (np. silny wiatr – (Yoneyama i in., 2021)).

Omawiając postępowanie przy betonowaniu w obniżonej temperaturze można wskazać 5 głównych etapów tego postępowania:

1. Przygotowanie do robót betonowych na placu budowy.

Należy przygotować plan działania przed nadejściem okresu obniżonej temperatury (np. przygotować sprzęt grzejny, materiały izolacyjne, osłony) – stąd zalecenia w wersji



instrukcji ITB nr 282 z roku 1995 (ITB 282 1995) o pierwszym progu temperatury +10°C.

Projektując mieszankę betonową należy rozważyć zastosowanie różnych dodatków i domieszek – np. domieszkę napowietrzającą oraz różne opcje dodatkowe (np. podgrzewanie składników mieszanki betonowej).

Wyczyścić powierzchnie i zbrojenie ze śniegu, lodu i szronu.

Rejestrować codzienne warunki pracy (o godz. 7, 13 i 19, na zakończenie zmiany, a innych zjawisk meteorologicznych – w okresach między pomiarami temperatury i w czasie gwałtownej ich zmiany).

2. Produkcja mieszanki betonowej.
3. Transport mieszanki betonowej.
4. Układanie mieszanki betonowej.
5. Zabezpieczenie betonu (wraz z odpowiednią pielęgnacją) dające gwarancję osiągnięcia odporności mrozowej (określanej z reguły poprzez zadaną wytrzymałość betonu na ściskanie) – zakończenie specjalnej procedury.

Projekt organizacji robót betonowych w obniżonej temperaturze

Naturalnie poszczególne etapy mogą przebiegać w różny sposób, jednak poprzedzone muszą być przygotowaniem budowy do realizacji robót w obniżonej temperaturze. Podstawowym dokumentem przygotowania budowy do prowadzenia robót budowlanych w warunkach obniżonej temperatury jest projekt organizacji robót. Przed przystąpieniem do jego wykonania należy ustalić na podstawie analizy danych klimatycznych przewidywane okresy występowania warunków obniżonej temperatury na terenie planowanych robót. Projekt organizacji robót budowlanych wykonywanych w okresie obniżonej temperatury powinien zawierać (ITB 282 2011):

- ogólny plan zagospodarowania terenu z naniesionym rozlokowaniem mediów, placów składowych, magazynów, obiektów socjalno-bytowych oraz administracyjnych
- opis robót wraz z uzasadnieniem techniczno-ekonomicznym przyjętych sposobów ich realizacji
- harmonogram wykonania robót budowlanych,



- rysunki i opis sposobów przystosowania infrastruktury budowy (mediów budowlanych, placów składowych, magazynów) oraz elementów konstrukcji, zarówno istniejących, jak i przewidywanych do wykonania,
- instrukcje prowadzenia robót budowlanych,
- wzór dziennika pomiarów temperatury i stanu pogody, stanowiącego załącznik do dziennika budowy
- harmonogram dostaw materiałów budowlanych, maszyn i urządzeń związanych z robotami budowlanymi wykonywanymi w obniżonej temperaturze, konieczny do zachowania wymaganej ciągłości i jakości robót,
- wykaz środków zapobiegawczych w przypadku występowania zagrożeń podczas robót budowlanych,
- rodzaje usług przewidzianych do wykonania przez jednostki obce oraz terminy zakończenia tych prac,
- zestawienie dodatkowych kosztów poniesionych z uwagi na prowadzenie robót budowlanych w obniżonej temperaturze.

Naturalnie odpowiednie przepisy dotyczą zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników.

Generalnie można wskazać przykłady ograniczenia działania w zakresie robót betonowych w warunkach obniżonej temperatury (np. wyłączenie robót betonowych w okresie grudzień-marzec z harmonogramu), co ma swoje uzasadnienie w podwyższonych kosztach, ryzyku braku jakości oraz zwiększaniu ryzyka wypadkowego.

Produkcja mieszanki betonowej w okresie obniżonej temperatury

W poniższym opisie sposobu produkcji mieszanki betonowej zawarto najważniejsze zalecenia dotyczące materiałów stosowanych do produkcji mieszanki betonowej.

Materiały:

Cement

Cement przeznaczony do produkcji mieszanki betonowej powinien posiadać certyfikat wydany przez jednostkę certyfikowaną – każda partia cementu powinna być oznakowana znakiem zgodności CE i spełniać wymagania odpowiednich norm. Można stosować cementy



spełniające wymagania normy (PN-EN 197-1) przy uwzględnieniu następujących uwag (ITB 282 2020):

- „w warunkach obniżonej temperatury wskazane jest stosowanie cementów typu CEM I i CEMII/A 32,5R i klas wyższych, a poniżej 0°C – cementów portlandzkich typu CEMI 42,5R, 52,5N i 52,5R,
- cement hutniczy typu CEM III może być stosowany do wszystkich konstrukcji, jeżeli średnia temperatura dobowa **otoczenia** wynosi minimum +5°C,
- konstrukcje masywne mogą być wykonywane z cementów typu CEM III w temperaturze do – 15°C, jeżeli przeprowadzona zostanie weryfikacja receptury dla warunków zimowych”.

Poza podwyższeniem dynamiki narastania wytrzymałości oraz wydzielania ciepła hydratacji uzyskanej ze względu na zastosowanie cementów o wysokiej wytrzymałości wczesnej podobne korzystne efekty można uzyskać poprzez: zwiększenie ilości cementu o 10÷15% i zmniejszenie wartości stosunku w/c (ITB 282 2020:75).

Zalecenia te nie dotyczą konstrukcji masywnych.

Z punktu widzenia możliwości budowy symulacyjnego modelu dojrzewającego betonu bardzo korzystne jest podanie w instrukcji ITB 282 (2020) orientacyjnych wartości ciepła hydratacji dla różnych klas cementu (ITB 282 2020:75).

W warunkach obniżonej temperatury cement zaleca się przechowywać w zamkniętych, szczelnych zbiornikach lub magazynach w temperaturze nie niższej niż +8°C. Istotny jest także okres przechowywania cementów:

- do 30 dni – cementy o wysokiej wytrzymałości wczesnej,
- do 45 dni dla cementów CEM I 42,5 N - normalnej wytrzymałości wczesnej,
- do 90 dni – cementy innego rodzaju.

Dodatki do betonu

Nie zalecane jest stosowanie dodatków do mieszanek betonowych – mają one najczęściej właściwości opóźniające wiązanie i/lub twardnienie oraz spowalniają wydzielanie ciepła



hydratacji (ITB 282 2020:75-76), np. mielony żużel wielkopieczowy (PN-EN 15167-1 2007).
Przedmiotowa instrukcja dopuszcza stosowanie w warunkach obniżonej temperatury pyłu krzemionkowego (PN-EN 13263-1 2010).

Domieszki do betonów

Przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2011) w warunkach obniżonej temperatury wskazuje do stosowania następujące domieszki (PN-EN 934-2):

- przyspieszające wiązanie,
- przyspieszające twardnienie,
- plastyfikatory i superplastyfikatory (używane w celu zmniejszenia ilości wody zarobowej)
- domieszki kompleksowe (wykazujące więcej niż jedno działanie podstawowe).

Przedmiotowa instrukcja wskazuje na korzystne dodatkowe działanie domieszek lekko napowietrzające, co dodatkowo zabezpiecza młody beton przed niekorzystnym działaniem mrozu.

Wskazano dwie kluczowe grupy domieszek sklasyfikowane ze względu zastosowane składniki domieszek stosowanych w warunkach obniżonej temperatury:

- domieszki zawierające wyłącznie sole nieorganiczne – azotan(V) wapnia lub tiocyjanian sodu,
- domieszki będące kompozycją wymienionych wyżej związków chemicznych z substancjami organicznymi wykazującymi działanie uplastyczniające lub upłynniające.

Wskazano także substancje, które powodują, że domieszki na ich bazie nie są stosowane:

- ze względu na silne oddziaływanie toksyczne – azotan(III) sodu (NaNO_3)
- ze względu na konieczność stosowania ich w kombinacji z domieszkami opóźniającymi - węglan sodu (Na_2CO_3) i węglan potasu (K_2CO_3).

Istotną (wcześniej wspomnianą metodą umożliwiającą betonowanie w obniżonej temperaturze) jest obniżenie temperatury zamarzania wody w mieszance betonowej. W przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2020) stwierdzono, że nie należy przeceniać możliwości tego działania – możliwe do uzyskania są zmiany od $-3,5^\circ\text{C}$ do -4°C . Dalsze obniżanie tej



temperatury wymaga zastosowania substancji wcześniej podanych jako nie wskazane do stosowania ze względu na właściwości toksyczne lub graniczenia technologiczne. Wskazano także wyniki badań (Bajorek 2009), które wykazały znacznie mniejsze możliwości ograniczenia temperatury zamarzania wody – w granicach od $-0,7$ do $-0,8^{\circ}\text{C}$. Podobnie (z dystansem) do tych możliwości podchodzi (Neville 2012), wskazując, że akceptacja tego rodzaju domieszek pozostaje jeszcze w sferze dyskusji. Uzasadnia to podjęcie badań w zakresie deklarowanym w rozprawie - etapowego podejmowania decyzji wspartego uczeniem się z przykładów.

W przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2020) wskazano wyraźnie, że zastosowanie modyfikacji betonu przy zastosowaniu domieszek nie może wiązać się z zaniechaniem stosowania innych zabiegów umożliwiających ochronę młodego betonu przed zamarzaniem. Podkreślono, że nie można zrezygnować z całkowitej ochrony, nawet jeżeli w instrukcji producenta podano inaczej.

Biorąc pod uwagę znane powszechnie zróżnicowanie efektów stosowania domieszek z różnymi rodzajami cementów logicznym wydaje się przeprowadzenie badań sprawdzających z zastosowaniem właściwych materiałów danej temperaturze.

Woda

Woda stosowana do przygotowania mieszanki betonowej powinna spełniać wymagania normy PN-EN 1008. W okresie obniżonej temperatury ważne jest zapewnienie odpowiedniej ilości wody zarobowej o zadanej temperaturze, co może mieć istotne znaczenie z punktu widzenia powtarzalności efektów modyfikacji mieszanki dostarczanej sukcesywnie na budowę (np. zmiany konsystencji w trakcie transportu). Nie należy dodawać wody o temperaturze powyżej 40°C bezpośrednio do cementu (ITB 282 2011:78).

Mieszanka betonowa – produkcja

Mieszanka betonowa powinna być produkowana zgodnie z normą PN-EN 206-1 w wytwórniach mieszanki betonowej zapewniających temperaturę w pomieszczeniach ogrzewanych nie niższą niż 10°C .



Projektowanie mieszanki betonowej

W warunkach obniżonej temperatury niezwykle istotnym jest zapewnienie szybkiego dojrzewania betonu – stosunek wytrzymałości badanej po 2 dniach do wytrzymałości po 28 dniach powinien być większy/równy 0,5.

Z kolei stosunek wodno-cementowy odgrywa w warunkach obniżonej temperatury niezwykle istotne znaczenie – nie powinien przekraczać 0,5. Ograniczenie to wynika z konieczności (ITB 282 2020):

- maksymalnego obniżenia ilości wody zarobowej,
- uniknięcia *bleedingu* - samoczynnego wydzielania się wody z mieszanki betonowej i segregacji kruszywa,
- przyspieszenia wiązania i twardnienia betonu.

Niezwykle istotnym z punktu widzenia idei niniejszej rozprawy jest wymóg przeprowadzenia badań wstępnych potwierdzających uzyskanie założonych właściwości i – co szczególnie ważne – **zweryfikowanie ich w warunkach obniżonej temperatury** (ITB 282 2020:78).

Woda wydzielająca się na powierzchni betonu w warunkach obniżonej temperatury może zamarznąć, co spowoduje obniżenie wytrzymałości i obniżenie trwałości. Stąd - o ile woda występować będzie na powierzchni betonu, to należy ją usunąć.

Mieszanie składników

W przypadku, gdy temperatura składników nie przekracza 40°C, kolejność podawania składników powinna być następująca: kruszywo, piasek, cement i woda zarobowa z domieszkami w postaci roztworów wodnych o stężeniu określonym w recepturze.

Temperatura mieszanki betonowej w węźle betoniarskim

Temperatura mieszanki betonowej przy załadunku betonowozu (lub innego środka transportu) powinna uwzględniać straty ciepła powstające podczas mieszania, transportu mieszanki betonowej na budowę, transportu mieszanki betonowej na budowie (transport poziomy i pionowy) oraz podczas układania mieszanki betonowej. Należy również uwzględnić

spadek temperatury mieszanki układanej w zimnym deskowaniu z uwzględnieniem zbrojenia i innych warstw (np. ocieplenie).

Do określenia minimalnej temperatury mieszanki betonowej można skorzystać z rekomendacji ACI 306R podanych w tabelicy 2.2. - wartości podaje instrukcja ITB.

Tabela 2.2. Rekomendowana minimalna temperatura mieszanki betonowej wg ITB 282 2020 na podstawie ACI 306R

	Minimalny wymiar elementu [mm]			
Temp. powietrza zewnętrznego [°C]	< 300	300 ÷ 900	900÷1800	ponad 1800
	Minimalna temperatura mieszanki betonowej			
Powyżej-1	16	13	10	7
- 15 ÷ -1	18	16	13	10
Poniżej -15	21	18	16	13

Należy podkreślić, że ACI 306R podaje również minimalną temperaturę po ułożeniu mieszanki (wynosi ona dla poszczególnych przedziałów z tabeli 2.2 odpowiednio: 13°C, 10°C, 7°C i 5°C).

Poza minimalną temperatura mieszanki należy także zwrócić uwagę na wartość maksymalną, która zależy od rodzaju użytego cementu (ITB 282 2020) oraz odległości transportowej i nie powinna przekraczać wartości podanych w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Maksymalna temperatura mieszanki betonowej (ITB 282 2020)

Rodzaj cementu	Maksymalna temperatura mieszanki betonowej [°C]
CEM I, CEM II/A 42,5	30
CEM I, CEM II/A 32,5	40
CEM II/B, CEM 32,5	45



Oczywiście celem jest osiągnięcie odpowiedniej temperatury mieszanki dostarczonej na budowę, która będzie jeszcze poddana dalszemu wychłodzeniu podczas jej transportu na miejsce wbudowania i układania. Należy liczyć się z ujemnym wpływem wysokiej temperatury mieszanki betonowej na późniejsze cechy trwałościowe betonu.

W celu kalkulacji temperatury mieszanki betonowej można użyć równania bilansu cieplnego lub wyznaczyć ją z tablicy 2.4.

Podane w tablicy 2.4. wartości należy traktować jako wartości szacunkowe. W przypadku, gdy w kruszywie znajduje się zamrznięta woda należy uwzględnić w bilansie termicznym ciepło właściwe lodu oraz ciepło przemiany fazowej lodu w wodę.

Tabela 2.4. Temperatura mieszanki betonowej w zależności od temperatury kruszywa i wody (ITB 282 2020:83)

Temperatura kruszywa [°C]	Temperatura wody [°C]								
	5	10	20	30	40	50	60	70	80
5	5	6	9	11	14	16	19	22	24
10	8	9	12	15	17	20	22	25	27
15	11	13	15	18	21	23	26	28	31
20	15	16	19	21	24	26	29	31	34
30	21	23	25	28	30	33	35	38	40

Należy zwrócić uwagę, że nagrzewanie kruszywa (np. w silosach) wymaga czasu – należy przewidzieć taką operację z odpowiednim wyprzedzeniem.

Wykonywanie robót betonowych

Przystąpienie do wykonywania robót betonowych powinno być poprzedzone zapewnieniem (PN-EN 13760):

- kompletnego projektu wykonywanej konstrukcji wraz ze specyfikacją wykonawczą,



- kierownictwa przedsięwzięcia dysponującego odpowiednimi kompetencjami do jego realizacji zgodnie z dokumentacją projektową i wymaganiami określonymi w umowie, instrukcjach i normach, itp.
- kierownictwa budowy odpowiedzialnego za organizację robót, zachowanie zasad bezpiecznego i właściwego użytkowania maszyn, zgodna z wymaganiami jakości materiałów, wykonanie robót zgodnie z dokumentacją projektową oraz bezpieczne jego użytkowanie do odbioru robót budowlanych (Bajorek 2012).

Spośród 3 klas wykonania – tabl. 2.5. (i związanego z tym poziomu zarządzania jakością) zawartych w PN-EN 13670 przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2020) zaleca przy betonowaniu w warunkach obniżonej temperatury poziom 3 – najwyższy. Jednocześnie zaznaczono, że wybór klasy wykonania powinien być dostosowany do rangi budowy.

Tabela 2.5. Zarządzanie jakością – kontrola wykonania – rodzaj i dokumentacja kontroli (PN-EN 13670:2011)

Przedmiot	Klasa wykonania 1	Klasa wykonania 2	Klasa wykonania 3
Rodzaj kontroli	Kontrola wizualna i pomiary wybiórcze	Kontrola wizualna elementów i regularne pomiary głównych elementów	Kontrola wizualna. Szczegółowa kontrola wszystkich robót, istotnych dla nośności i trwałości konstrukcji
Strona odpowiedzialna za przeprowadzenie kontroli	Samokontrola	Samokontrola. Kontrola zgodnie z procedurami wykonawcy. Możliwe dodatkowe wymagania zgodnie ze specyfikacją wykonawczą	Samokontrola. Kontrola zgodnie z procedurami wykonawcy. Dodatkowe wymagania zgodnie ze specyfikacją wykonawczą
Zakres	Wszystkie roboty	Oprócz samokontroli powinny być przeprowadzane regularne kontrole robót	Oprócz samokontroli powinny być przeprowadzane regularne kontrole robót
Raport z kontroli	Niewymagany	Wymagany	Wymagany
Powykonawcze rysunki geometrii	Niewymagane	Zgodnie ze specyfikacją wykonawczą	Zgodnie ze specyfikacją wykonawczą



Organizacja robót i niezbędna dokumentacja techniczna

Specyfika wykonywania robót betonowych w okresie obniżonej temperatury wymaga poza spełnieniem typowych wymagań wynikających z dokumentacji projektowej oraz przedmiotowych norm (a w szczególności PN-EN 13670) określenia szczególnych metod organizacji produkcji w tych niesprzyjających warunkach.

Zgodnie z przedmiotową instrukcją (ITB 282 2020) po podjęciu decyzji o betonowaniu w obniżonej temperaturze należy określić (obowiązek po stronie specyfikującego):

- wymaganą wytrzymałość betonu na ściskanie w momencie zaprzestania ochrony,
- długość możliwego okresu dojrzewania betonu – zgodnie z przyjętymi założeniami projektowymi i terminami wykonania robót,
- metodę ochrony cieplno-wilgotnościowej betonu (z uwzględnieniem zastosowania modyfikacji domieszkami),
- miejsce produkcji mieszanki betonowej i rodzaj zamawianego betonu,
- właściwości betonu lub recepturę (w zależności od rodzaju zamawianego betonu projektowanego/recepturowego),
- temperaturę mieszanki betonowej po jej dostarczeniu (z uwzględnieniem przy jej kalkulacji spadku temperatury w trakcie układania mieszanki betonowej),
- rodzaj izolacji, deskowania, środków antyadhezyjnych, itp. – dostosowane do przedmiotowej konstrukcji,
- **sposobu monitorowania stanu betonu** (co jest niezwykle istotne z punktu widzenia idei niniejszej rozprawy),
- sposób i kryteria rozformowania betonu.

Producent wraz z dostawcą betonu powinni podać (ITB 282 2020:87):

- możliwości modyfikacji receptury betonu projektowanego w zakresie: stosunku w/c, konsystencji, ilości i rodzaju stosowanych cementów, kruszyw oraz domieszek i dodatków,
- temperaturę mieszanki betonowej na węźle (z uwzględnieniem spadku temperatury na późniejszych etapach),



- rodzaj środków transportu, czas niezbędny do transportu oraz sposób ocieplenia środków transportu.

Istotnym zagadnieniem jest rozpatrzenie możliwości produkcji mieszanki betonowej na budowie, co ograniczyć może zdecydowanie problemy związane z niekorzystnymi warunkami otoczenia (np. czas ekspozycji mieszanki betonowej w warunkach obniżonej temperatury), jednak kluczowe jest uwzględnienie związanych z tym kosztów oraz możliwości produkcji mieszanki betonowej o określonych parametrach.

Przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2020:88) wskazuje następujące przedziały temperatury, dla których należy określić wymagania dotyczące realizacji robót betonowych:

- do +5°C (granica dopuszczalnej pielęgnacji betonu bez ochrony cieplnej)
- do – 1°C
- poniżej -1°C do – 10°C
- poniżej -10°C do -15°C.

Ostatni przedział przedmiotowa instrukcja definiuje jako warunki zimowe, w których problemy technologiczne zaczynają odgrywać główną rolę. W związku z tym w temperaturze poniżej -10°C betonowanie powinno być wykonywane wyjątkowo, a w temperaturze poniżej – 15°C nie powinno się wykonywać betonowania na wolnym powietrzu.

Biorąc pod uwagę możliwość zaistnienia znacznych spadków temperatury w okresie nocnym (przymrozki) przedmiotowa instrukcja zaleca betonowanie w ciągu dnia.

W zakresie metod zabezpieczeń pozwalających na uzyskanie przez beton odpowiedniej odporności na zamrażanie na etapie projektowania i produkcji betonu przedmiotowa instrukcja podaje:

- **modyfikację składu betonu i mieszanki betonowej:**
 - **(zwiększenie ilości cementu lub zmianę cementu na cement o wyższej klasie wytrzymałości i wysokiej wytrzymałości wczesnej - oznaczane literą R),**
 - **modyfikacja składu mieszanki betonowej przy zastosowaniu domieszek i dodatków (dobrych odpowiednio do rodzaju cementu i rodzaju konstrukcji – betonowa, żelbetowa, sprężona, cienkościenna, itp.)**



- **podgrzewanie składników mieszanki betonowej do temperatury zapewniającej odpowiednią temperaturę mieszanki po ułożeniu w konstrukcji.**

Na etapie realizacji na budowie w powyższym celu można zastosować:

- **osłanianie elementów lub całej konstrukcji materiałami ciepłochronnymi/wodoszczelnymi, aby mieszanka betonowa ułożona w deskowaniu zachowała korzystne warunki dojrzewania,**
- **ogrzewanie młodego betonu w deskowaniu za pomocą pary, ciepłego powietrza lub prądu elektrycznego,**
- **wykonywanie robót betonowych w pomieszczeniach zamkniętych ogrzewanych lub w ciepłakach (stałych lub przesuwnych) o temperaturze powietrza wewnątrz nie niższej niż +10°C.**

Powyższe metody mogą być stosowane rozdzielnie lub łączone w zależności od rodzaju wykonywanej konstrukcji (przede wszystkim od jej masywności), warunków atmosferycznych oraz czasu, w jakim beton powinien osiągnąć wymagane parametry wytrzymałościowe.

Przygotowanie budowy do wykonywania robót betonowych

Przy realizacji robót betonowych niezwykle ważne jest zapewnienie wiarygodnej prognozy meteorologicznej. Podkreślenia wymaga sytuacja konieczności podjęcie decyzji o podgrzewaniu kruszywa w węźle betoniariskim na kilka dni przed planowanym betonowaniem. **W obecnej sytuacji zaburzeń klimatycznych należy liczyć się z dużym ryzykiem zaistnienia nagłych zmian i możliwością wystąpienia ekstremalnych wartości czynników pogodowych. Podkreślić należy w tej sytuacji z jednej strony dostęp do prognoz z wielu źródeł, a z drugiej strony trudności w ich interpretacji ze względu na duże niezgodności (Burgeno & Joslyn, 2020; Løhre i in., 2019). Wyjściem jest podejmowanie decyzji na podstawie prognoz bardziej spójnych, co zwykle oznacza skrócenie horyzontu prognozy.**



Przedmiotowa instrukcja wskazuje następujący zakres decyzji podejmowanych na podstawie prognoz meteorologicznych (ITB 282 2020:89):

- przygotowanie środków ochrony materiałów oraz maszyn i urządzeń (np. transportowych),
- przygotowanie odpowiednich materiałów izolacyjnych oraz urządzeń grzewczych w celu zapewnienia ciągłości betonowania konstrukcji,
- przygotowania materiałów i konstrukcji w celu zabezpieczenia wykonanych konstrukcji przed wystąpieniem szkód mrozowych,
- planowanie i realizacja harmonogramu prac betonowych.

Niezbędna informacja meteorologiczna powinna uwzględniać:

- temperaturę (wskazano 3 terminy pomiaru temperatury: o godzinie 7, 13 i 19),
- prędkość wiatru i okresy jego trwania,
- rodzaj opadów atmosferycznych i ich intensywność,
- mgły i inne zjawiska atmosferyczne.

Informacje te powinny być ewidencjonowane w dzienniku pomiarów, a ich prawidłowość – kontrolowana przez kierownika budowy. Korzystne jest także gromadzenie informacji o temperaturze minimalnej i maksymalnej dobowej – można korzystać w tym celu z pomocy IMGW PIB.

Przygotowanie podłoża, deskowania i zbrojenia

Kluczowym jest zapewnienie niezbędnej temperatury wszystkich powierzchni, które będą mieć kontakt z mieszanką betonową (PN-EN 13670). W przedmiotowej instrukcji sugerowana jest temperatura wyższa od temperatury zamarzania mieszanki betonowej, jednak nie przekraczała wartości minimalnej temperatury mieszanki betonowej podanej w tabelicy 2.2. (strona 25) o więcej niż kilka stopni.

W przypadku zamrożonego podłoża – należy je rozmrozić (i ewentualnie zagęścić). W przypadku zalegania na pokrywy śnieżnej i/lub lodu na zbrojeniu i deskowaniach – należy je usunąć bez stosowania otwartego płomienia oraz ciepłego powietrza zmieszanego ze



spalinami. Przedmiotowa instrukcja zaleca stosowanie łopat, mioteł i ciepłego czystego powietrza pod ciśnieniem.

Materiały pomocnicze

Środki antyadhezyjne powinny zapewniać możliwość zastosowania w obniżonej temperaturze (odpowiednia temperatura płynięcia środków na bazie olejów). Nie zaleca się stosowania preparatów emulsyjnych (na bazie wody) oraz wosków (trudności w zastosowaniu w obniżonej temperaturze). Środki te powinny spełniać wymagania PN-B-19305.

W przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2020:92-93) omówiono szczegółowo różne rodzaje materiałów izolacyjnych służących do osłaniania betonu w okresie obniżonej temperatury, które pełnić mogą podwójną funkcję: ochrony cieplnej oraz ochrony powierzchniowej zabezpieczającej przed utratą wilgoci a także oddziaływaniem wiatru.

Transport i układanie mieszanki betonowej

Planując transport mieszanki betonowej o podwyższonej temperaturze należy brać pod uwagę następujące czynniki:

- okres, jaki upłynie od chwili zarobienia mieszanki do chwili rozpoczęcia wiązania (ze względu przyspieszenie procesów),
- rodzaj środków transportu i możliwy sposób ich ocieplenia (z uwzględnieniem czasu transportu),
- wpływ warunków atmosferycznych (z uwzględnieniem temperatury otoczenia) na szybkość obniżania temperatury mieszanki betonowej,
- zmianę temperatury mieszanki betonowej na skutek zetknięcia ze zbrojeniem i deskowaniem.

Wcześniej opublikowana wersja przedmiotowej instrukcji podaje wzory umożliwiające szacowanie spadku temperatury mieszanki przy transporcie. W najnowszej wersji przedmiotowej instrukcji także zawarto wzory do szacowania strat ciepła i związanego z tym spadku temperatury mieszanki betonowej. Przykładowo dla betonu z obracającym się bębniem przybliżony spadek temperatury wynosi (ITB 282 2020:85):

$$\Delta T = 0,25 (t_r - t_a), (2.1.)$$

gdzie:

ΔT – spadek temperatury przy czasie dostawy w ciągu 1 h,

t_r – temperatura betonu wymagana w miejscu dostawy [°C]

t_a – temperatura powietrza podczas transportu [°C]

Zgodnie z aktualną wersją Instrukcji ITB 282 (2020) spadek temperatury mieszanki betonowej transportowanej na terenie budowy można szacować na podstawie podanych w przedmiotowej instrukcji tabel (ITB 282 2020:93-94). Określono w nich nie tylko spadek temperatury przy różnych wariantach transportu poziomego i pionowego, ale także przy układaniu dla różnych elementów konstrukcyjnych (płyty, belki i słupy).

Układanie mieszanki betonowej

Kluczowe znaczenie ma temperatura układanej mieszanki betonowej, która jest określona w PN-EN 206-1 – w momencie dostarczenia na budowę i podczas jej układania nie powinna być ona niższa niż +5°C. W przypadku, gdy temperatura otaczającego powietrza jest niższa niż +5°C przedmiotowa instrukcja zaleca korzystanie z zaleceń ACI (ACI 306R), przy czym w zależności od wymiaru najmniejszego przekroju betonowanego elementu (analogicznie do danych z Tabelicy 2.2.) minimalna temperatura układanej mieszanki betonowej wynosi: 13°C (dla wymiaru poniżej 0,3 m), 10°C (0,3÷0,9 m), 7°C (0,9÷1,8 m) i 5°C (powyżej 1,8 m).

Przedmiotowa instrukcja zwraca uwagę na fakt, że podwyższona temperatura (wyższa od zalecanej) nie zwiększa proporcjonalnie długości okresu ochrony przed zamarzaniem ze względu na znaczne straty ciepła wynikające ze zwiększonej różnicy temperatury. Naturalnie należy uwzględnić straty ciepła w procesie transportu i układania mieszanki betonowej, jednak temperatura mieszanki nie powinna być wyższa od zalecanej przez ACI 306R o więcej niż 10°C.

Należy podkreślić, że w przypadku temperatury otoczenia do +5°C wystarczająca jest temperatura mieszanki +5°C.



Zapewnienie jakości mieszanki betonowej

Przy dostawie mieszanki betonowej należy dokumentować parametry mieszanki betonowej przez sprawdzenie klasy zamówionej mieszanki z dokumentem dostawy oraz wykonać niezbędne pomiary temperatury oraz konsystencji.

W celu wykonania podstawowych pomiarów niezbędna jest organizacja laboratorium polowego do wykonania pomiarów wraz z udokumentowaniem w dzienniku betonowania otrzymanych wyników pomiarów.

W celu dokładnej weryfikacji mieszanki betonowej należy z każdego zarobu-betonowozu pobrać minimum 3 próbki. Pobrane próbki należy opisać i przechowywać w warunkach zbliżonych do warunków dojrzewającej mieszanki betonowej w wykonywanym elemencie.

Pielęgnacja betonu w warunkach zimowych

Kluczowymi elementami przy wyborze metody pielęgnacji w obniżonej temperaturze są:

- tempo przyrostu wytrzymałości dla danej mieszanki betonowej,
- możliwe do zastosowania zabezpieczenie termiczne wykonywanego elementu przez zastosowanie izolacji odpowiedniego rodzaju,
- kształt elementu - wpływ powierzchni zewnętrznych elementu na oddziaływanie obniżonej temperatury.

W przedmiotowej instrukcji ITB 282 2020 znaleźć można odpowiednie wykresy, tablice i zestawienia umożliwiające szacowanie efektów pielęgnacji betonu przy zastosowaniu różnych metod pielęgnacji np. w zależności od modułu powierzchniowego przedmiotowego elementu (okrycie materiałem ciepłochronnym, zachowanie ciepła, podgrzewanie dojrzewającego betonu).

Monitoring temperatury betonu

Zależność temperatury betonu od temperatury otoczenia jest oczywista, jednak trudno – pomimo różnych tablic i wzorów ją ustalić bez bazowania na pomiarach w miejscu realizacji. Zaleca się zatem monitoring nie tylko temperatury otaczającego powietrza oraz mieszanki



betonowej, ale także temperatury dojrzewającego betonu. Należy przy tym uwzględnić fakt, że najbardziej narażone na niekorzystne warunki dojrzewania są naroża i krawędzie betonowanego elementu, na co wskazuje przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2020:121). Zaleca ona umieszczenie czujników temperatury przy jego powierzchni, jednak wskazano, że wystarczającą dokładność osiągnąć można poprzez umieszczenie termometrów na powierzchni betonu (pod czasowymi pokrywami z efektywnego materiału izolacyjnego aż do momentu ustalenia się wskazania temperatury).

W przypadku konstrukcji masywnych należy także kontrolować temperaturę wewnątrz konstrukcji, aby się upewnić, że nie został przekroczony dopuszczalny gradient temperatury (ITB 282 2020:121).

Rozdeskowanie konstrukcji betonowych

Z punktu widzenia kryterium ekonomicznego rozdeskowanie konstrukcji betonowej powinno być wykonywane jak najszybciej (oczywiście z założeniem o minimalizacji ryzyka uszkodzenia konstrukcji i dojrzewającego betonu. Przedmiotowa instrukcja zaleca, aby okres ten określić opierając się na doświadczeniu (bazując na wynikach badań laboratoryjnych, gdyż zależny jest on od wielu czynników - poza typowymi, jak rodzaj i ilość cementu czy temperatura należy wziąć pod uwagę np. umiejętności pracowników (ITB 282 2020:123)).

Przed przystąpieniem do rozdeskowania należy sprawdzić wytrzymałość przedmiotowego betonu na podstawie badania próbek przechowywanych w takich samych warunkach, jak dojrzewał beton w konstrukcji lub określić ją na podstawie monitoringu temperatury. Wskazano na metodę amerykańską wg ASTM C1064-86 bazującą na wskaźniku dojrzałości (ITB 282 2020:122). We wcześniejszych edycjach przedmiotowej instrukcji podano także metody nieniszczące: (sklerometryczną – PN-EN 12504-2 i ultradźwiękową PN-EN 12504-4) (ITB 282 2011:120).

Po rozformowaniu należy osłonić beton materiałem izolacyjnym (lub chronić w zamkniętej przestrzeni ogrzewanej) w celu zapewnienia prawidłowych warunków dojrzewania do czasu wyrównania temperatury (powolne schłodzenie).

Długość okresu ochrony

Wymagany czas trwania okresu ochrony betonu zależy od przyjętej klasy pielęgnacji. Zależy ona od oczekiwanego procentu wytrzymałości 28-dniowej w chwili zakończenia ochrony, temperatury powierzchni betonu utrzymywanej (i mierzonej) w okresie ochrony współczynnika rozwoju wytrzymałości r (r to stosunek wytrzymałości na ściskanie betonu 2-dniowej i 28-dniowej określonej w warunkach laboratoryjnych). Zgodnie z PN-EN 13670 wyróżnia się cztery klasy pielęgnacji betonu (tablica 2.6.).

Tabela 2.6. Klasy pielęgnacji betonu wg PN-EN 13670 (Bajorek 2012)

	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 2	Klasa pielęgnacji 3	Klasa pielęgnacji 4
Czas [godziny]	12 ^{a)}	Nie stosuje się	Nie stosuje się	Nie stosuje się
Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	Nie stosuje się	35%	50%	70%
^{a)} pod warunkiem, że wiązanie nie trwa dłużej niż 5 godzin, a temperatura powierzchni betonu jest równa +5°C lub wyższa				

Oczekiwany procent wytrzymałości 28-dniowej należy w myśl przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2020:124) ustalić zgodnie ze specyfikacją i harmonogramem robót oraz uwzględniając sposób użytkowania (obciążenia) elementu bezpośrednio po zakończeniu okresu ochrony.

Klasa 1 przyjmowana jest w przypadku, gdy brak jest obciążenia i brak ekspozycji, co odpowiada – wg przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2020) **np. fundamentom czy części podziemnej konstrukcji, które nie podlegają wczesnemu obciążeniu, a podczas eksploatacji nie będą podlegać ekspozycji na zamrażanie i rozmrażanie. Niezbędna jest tylko ochrona przed zamarznięciem we wczesnym okresie.** Natomiast zalecanie jest zastosowanie pielęgnacji w klasie 2.

W klasie 2 wymagany przyrost wytrzymałości przyjęty na poziomie 35% 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie w przypadku elementu konstrukcji oraz możliwości pielęgnacji



betonu w temperaturze +5°C w stosunku do 5 MPa, jako wielkości wymaganej z punktu widzenia odporności na jednorazowe działanie mrozu dla klasy 1 może wpływać na przyjęcie klasy 1 (zwłaszcza, że w klasie 2 wskazano jako przykłady konstrukcji masywne nabrzeża i tamy, których powierzchnie są wyeksponowane na oddziaływanie mrozu i czynników atmosferycznych).

Wskazania okresu ochrony podane w przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2020:124-126) i powiązane klasy pielęgnacji oraz tzw. kategorii użytkowania elementów bezpośrednio po zakończeniu ochrony są bardzo istotne z punktu widzenia idei rozprawy, gdzie wskazano różne wymagania w stosunku do danego elementu ze względu na warunki ekspozycji na oddziaływanie obniżonej temperatury oraz konsekwencje uszkodzeń (np. powierzchni danego elementu inne w przypadku płyty postojowej na stacji paliw a inne w przypadku stopy fundamentowej).

2.5. Nowe tendencje w technologii betonowania w obniżonej temperaturze

Analizując postęp technologiczny na podstawie porównania instrukcji ITB 282 z lat 1995 (ITB 282 1995), 2011 (ITB 282 2011) i 2020 (ITB 282 2020) można dostrzec korzystne tendencje zmierzające w kierunku zapewnienia jakości betonu wbudowanego w konstrukcjach betonowych realizowanych w warunkach obniżonej temperatury. Natomiast pomimo tego wyraźnego rozwoju omawianych metod (np. w dziedzinie monitoringu otoczenia i betonu dojrzewającego w konstrukcji nadal istnieje problem nagłych zmian w otoczeniu, które w warunkach zmian klimatycznych stają się z jednej strony – mimo postępu w dziedzinie czujników i metod prognozowania – coraz trudniej przewidywalne, a z drugiej – należy liczyć się z możliwością nagłych zmian o ekstremalnym charakterze (z racji rosnącej dynamiki i niepewności w otoczeniu).

Wprawdzie nie brak sceptycyzmu w podejściu naukowców do innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie np. modyfikacji mieszanki betonowej domieszkami (Neville 2012, Bajorek 2009) warto wziąć pod uwagę możliwości wprowadzenia nowych rozwiązań. Innowacje w przedmiotowej dziedzinie wiedzy dotyczą przede wszystkim:



- Możliwości przekroczenia bariery technologicznej w postaci niskiej temperatury otoczenia (z jednej strony system domieszek do stosowania w niskiej temperaturze - *cold weather admixture system* (Tomita i in., 2020) – stosowany głównie w celu możliwości betonowania w temperaturze uznanej za niedopuszczalną, a z drugiej – zastosowanie materiałów zmienno-fazowych – *phase change materials* (Liu i in., 2020), które dają możliwość utrzymania sprzyjających warunków dojrzewania pomimo spadku temperatury otoczenia,
- Zastosowanie nano-materiałów (Elkady i in., 2019), które dzięki swojej ultra drobnej strukturze mogą polepszyć właściwości betonu (także mogą przyspieszyć kinetykę hydratacji cementu), uszczelnić międzyfazową strefę przejściową między zaczynem cementowym a kruszywem oraz zastąpić częściowo cement w mieszance betonowej,
- Nowych metod pielęgnacji w postaci: izolowanego od strony zewnętrznej deskowania systemowego (Won i in. 2016), wykorzystanie arkuszy grzewczych wykorzystujących reakcję egzotermiczną między wapnem palonym (CaO) a wodą (Choi i in., 2017; Nitheanandan i in., 2017)
- Monitoringu temperatury (przewodowego i bezprzewodowego) w betonie dojrzewającym w celu śledzenia procesu jego dojrzewania w zmiennych warunkach (L. Barna i in., 2019; L. A. Barna i in., 2011; Rushing i in., 2017).

W dziedzinie naukowych opracowań wyróżnić należy:

- Rozprawę doktorską (Osetek i in., 2021), która wnosi wiele nowych idei w zakresie kształtowania odporności młodego betonu poprzez odpowiednią modyfikację i wprowadzenie odpowiednich procedur;
- Rozprawę doktorską (Kotwa, 2011), która skoncentrowana na możliwościach modyfikacji i mieszanki betonowej i jej pielęgnacji.

(Osetek i in., 2021) w swojej rozprawie skoncentrował się na modyfikacji betonu w oparciu o: zastosowania cementu portlandzkiego CEM I 42,5R (wyższej klasy niż powszechnie stosowane cementy CEMII) oraz domieszek przyspieszających wiązanie, zastosowanie napowietrzenia oraz mikrosfer polimerowych, wprowadzenie zamiennika cementu na siarczano-glinowy (CSA) – o wysokim przyroście wytrzymałości i wysokiej intensywności cieplnej. Ponadto Osetek zaprojektował beton samozagęszczalny (SCC), który dzięki większe



zawartości spoiwa zapewnia większą odporność młodego betonu na destrukcyjne działanie obniżonej temperatury w porównaniu z betonem zwykłym.

(Kotwa, 2011) także uwzględniła możliwości modyfikacji mieszanki betonowej (obniżenie wskaźnika w/c, wybór odpowiedniego cementu, kruszyw oraz napowietrzenie mieszanki betonowej i zastosowanie domieszek). Ponadto uwzględniono metody: podgrzewania składników, zachowania ciepła (osłony) i elektronagrzew).

Problem omawiany jest także przez producentów cementu (HOLCIM 2024)¹ oraz omawiany na konferencjach (Mazur & Kotwa, 2019), jednak nie stwierdzono zastosowania podejścia proponowanego w niniejszej rozprawie – wspomaganie decyzji menadżerskich przy betonowaniu w obniżonej temperaturze w warunkach zagrożenia nagłym spadkiem temperatury otoczenia.

2.6. Nowe tendencje w dziedzinie zarządzania procesami budowlanymi

Poza innowacjami związanymi ściśle z zarządzaniem procesem betonowania warto również poddać krótkiej analizie innowacyjne tendencje w zarządzaniu procesami budowlanymi. Do kluczowych kierunków innowacji w tym zakresie zaliczyć należy:

1. Industry 5.0 - nowy paradygmat zarządzania, który powinien przyczynić się do osiągnięcia celów społecznych poza poprawą wydajności, wzrostu gospodarczego powinien przyczynić się do tworzenia także miejsc pracy (Komisja Europejska, 2021). Głównym celem Przemysłu 5.0 jest wykorzystanie ludzkich specjalistów i ekspertów we współpracy z inteligentnymi systemami produkcyjnymi, aby uzyskać wydajność w najbardziej efektywny sposób (Maddikunta i in., 2022), ((Nahavandi, 2019), (Longo i in., 2020).

Główne zmiany zaproponowane w tej nowej wizji dotyczyć będą nowych technologii, które muszą opierać się na trzech powiązanych ze sobą podstawowych wartościach (Xu i in., 2021):

¹ HOLCIM 2024 Betonowanie i pielęgnacja betonu w obniżonych temperaturach, pobrano z Internetu: [pielegnacja-betonu-w-obnizonych-temperaturach-poradnik.pdf \(holcim.pl\)](https://www.holcim.pl/rodzaje-betonow/rodzaje-betonow-w-obnizonych-temperaturach-pielęgnacja-betonu-w-obnizonych-temperaturach-poradnik.pdf), dnia 15.09.2024



- Human-centricity: podstawowe potrzeby i interesy ludzkie i społeczne powinny być w centrum procesów projektowania i produkcji (znanych również jako Society 5.0, (M. Fukuyama, 2018; Pedroza De Almeida i in., 2023));
 - Zrównoważony rozwój: należy rozwijać procesy neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla i procesy o obiegu zamkniętym, które umożliwiają ponowne wykorzystanie, zmianę przeznaczenia i recykling zasobów naturalnych, a także zmniejszenie ilości odpadów i wpływu na środowisko, co doprowadzi do gospodarki o obiegu zamkniętym
 - Elastyczność i odporność - obecne problemy gospodarcze (wynikające także z konfliktów międzynarodowych) i zmiany klimatyczne na świecie zwróciły uwagę na potrzebę ponownego przemyślenia istniejących metod pracy i podejść w celu zmniejszenia podatności łańcuchów dostaw i procesów produkcji na zakłócenia.
2. Agile Management oparte na strategiach, taktykach i opcjach elastyczności jako odpowiedź na konieczność działania w turbulentnie zmiennym środowisku (przykładowo decyzje o temperaturze nagrzewu kruszywa należy podejmować z 1-2 dniowym wyprzedzeniem, podczas gdy aktualnie trudno jest uzyskać wiarygodną prognozę meteorologiczną na okres dłuższy niż 24 h – uzasadnia to wprowadzenie opcji elastyczności opartych zarówno na odporności (elastyczność pasywna) – np. PCM, domieszki, jak i adaptacyjności (podgrzewane deskowania, nagrzew pod osłonami itp.).

Na podkreślenie zasługuje powiązane z Agile Management przejście do Project Management 2.0 (Kerzner, 2015a) z tradycyjnego zarządzania (nazwanego Project Management 1.0), gdzie:

- Celem jest bieżące podejmowanie decyzji na podstawie monitoringu procesów i otoczenia w czasie rzeczywistym i przewidywanych zmian (scenariusze oparte na prognozach) w celu osiągnięcia wartości dla klienta – w przeciwieństwie do tradycyjnego podejścia opartego na dążeniu do eliminacji odchyłeń od stałego planu
- Pracownicy są motywowani wewnętrznie – można polegać na ich samokontroli
- Aktywność jest oparta na małych zespołach



- Komunikacja jest równoległa, a nie – hierarchiczna i jednostronna
- Planowanie jest zdecentralizowane
- Metodologia elastyczna (otwarta na zmiany wynikające z konieczności działania w turbulentnie zmiennym otoczeniu).

3. Symulacja i modelowanie systemów produkcyjnych

Analizując możliwości zastosowania idei Industry 4.0 i 5.0 w odniesieniu do budownictwa wskazać można cztery podstawowe kierunki wdrożenia (Oesterreich & Teuteberg, 2016) :

- Inteligentny plac budowy:
 - Monitoring procesów i otoczenia w czasie rzeczywistym
 - Technologia zbierania danych oparta na zastosowaniu czujników (z możliwością przesyłania danych bezprzewodowo)
 - Technologia śledzenia zasobów i zarządzania nimi w celu optymalizacji czasu i kosztów (wykorzystanie technologii RFID)
 - Internet rzeczy i usług – stworzenie wirtualnej sieci dla wsparcia inteligentnej budowy
 - Nowe metody produkcji (3D printing i budownictwo modułarne)
- Symulacja i modelowanie:
 - Symulacja obiektu (także w stadium użytkowania) w wirtualnej rzeczywistości
 - Zastosowanie technologii BIM w kolejnych stopniach zaawansowania 3D, 4D planowanie realizacji, 5D szacowanie kosztów, 6D budownictwo zrównoważone, 7D zarządzanie obiektem w trakcie eksploatacji (Ybañez i in., 2022; N. Zhao, 2021)
- Cyfryzacja i wizualizacja (Leśniak i in., 2021; Moon i in., 2019; Skrzypczak i in., 2022; H. Wang i in., 2019) :
 - Projektowanie obiektów budowlanych w chmurze
 - Projektowanie obiektów druk miniatur 3d
 - Zarządzanie projektami w chmurze
 - Kontrola i nadzorowanie budowy za pośrednictwem kamer i dronów
 - Inwentaryzacja skomplikowanych obiektów – wykorzystanie chmury punktów



- Obliczenia w chmurze
- Jedno źródło poprawnych danych
- Big data
- Wykorzystanie urządzeń mobilnych
- Digitalizacja produktów i usług.
- Zarządzanie cyklem życia budynków i budowli
- Cyfrowa realizacja:

Drukowanie budynków García-Alvarado (2021), Qaidi (2022), Tay (2017)

4. Inteligentne systemy wspomaganie decyzji

Kluczowymi elementami zarządzania przedsiębiorstwem są nie tylko nadzór nad realizacją procesów, ale przede wszystkim rozwiązywanie problemów wynikających z konieczności podejmowania decyzji w zmiennym otoczeniu Business Intelligence - Jerzy Surma (Książka) - Księgarnia PWN (b.d.). Występujące problemy mogą być dobrze, jak również słabo ustrukturalizowane i rozpoznane. Bez względu na ich charakterystykę każda decyzja powinna być poparta odpowiednią informacją pozwalającą na wybór racjonalnego (w danych warunkach) rozwiązania (*Systemy informatyczne zarządzania - Jerzy Kisielnicki (Książka) - Księgarnia PWN, b.d.*) . W dobie nadmiaru informacji i ich redundancji kluczowe stają się identyfikowanie, klasyfikowanie i grupowanie najistotniejszych atrybutów, mających wpływ na podejmowane działania. Przy wzrastającej ilości danych duże znaczenie ma pozyskiwanie (tworzenie bazy danych) i wyznaczanie istotności atrybutów, ponieważ błąd decyzji może być obciążony znacznymi kosztami zarówno dla przedsiębiorstwa-wykonawcy, jak i jej klienta.

Inteligentne systemy wspomaganie decyzji mogą ułatwić to zadanie przez wskazywanie korelacji i asocjacji łączących ze sobą poszczególne składniki analizowanego wolumenu. Niemniej jednak zgodnie z założeniem *klątwy wymiarowości* (Flach 2012) im więcej dostępnych atrybutów tym mniej wiarygodne stają się prognozy – efekt przeuczenia w przypadku algorytmów genetycznych. Z uwagi na powyższe istotne jest zapewnienie odpowiedniej jakości informacji (np. prognozy pogody) wspomagających proces zarządzania na poszczególnych etapach podejmowania decyzji od taktycznego począwszy a na



strategicznym skończywszy.

W niniejszej rozprawie skupiono się na wykorzystaniu algorytmów takich jak: drzewa decyzyjne, Random Forest oraz Gradient Boost Trees. Celem wykorzystywania algorytmów wspomagających podejmowanie decyzji jest zwiększenie wydajności i wyeliminowanie błędów właściwych dla zaangażowania czynnika ludzkiego. Podejmowanie decyzji przy wykorzystaniu algorytmów to w praktyce oddelegowanie obowiązku decydowania i implementowania decyzji wypracowanej w oparciu o uczenie maszynowe (Machine learning). Aby było to możliwe, maszyny uczą się i wyciągają wnioski, rozpoznając pewne wzorce w zestawach dostarczonych do nich danych. Algorytmy mają sporą przewagę nad ludźmi, jeśli weźmiemy pod uwagę ich zdolność wykrywania korelacji - powtarzalnych wzorców czy związków przyczynowo - skutkowych - w ogromnych zbiorach danych.

W pewnym rozumieniu algorytmy są niezawodne - zawsze dają ten sam wynik dla dokładnie tego samego sygnału wejściowego (przynajmniej w przypadku tych systemów, które nie uczą się „na bieżąco”). Oczekuje się od nich, że będą zawsze podejmować obiektywne decyzje. W celu kontroli skuteczności działania algorytmu wyznacza się zbiór uczący oraz zbiór testowy. Komputerowe wspomaganie decyzji biznesowych stanowi jedno z najważniejszych zastosowań systemów typu BI - *business intelligence*. Termin ten, pochodzący z lat 80., dotyczy wielu działań mających na celu usprawnienie procesów wewnętrznych organizacji i ułatwienie decydom działań operacyjnych. Zalicza się do tej kategorii systemy ekspertowe, opierające się na skodyfikowanej w postaci reguł wiedzy specjalistów dziedzinowych (Chomiak-Orsa & Wójcik, 2017; Olszak & Mach-Król, 2018). Współczesne możliwości w zakresie indukcyjnego gromadzenia doświadczenia, automatycznego wyciągania wniosków i aplikowania posiadanej wiedzy do rozwiązywania nowych problemów sprawiają, iż także uczenie maszynowe oraz rozpoznawanie wzorców stają się nieodłącznymi elementami BI (Chomiak-Orsa & Mrozek, 2017a, 2017b). W połączeniu z odpowiednią architekturą hurtowni danych tworzą narzędzia odkrywania nowych trendów oraz algorytmów wspomaganie zarządzania i podejmowania decyzji na wszystkich szczeblach zarządzania przedsiębiorstwem lub organizacją Olszak & Batko (2012). Do najistotniejszych kategorii problemów rozwiązywanych przez sztuczną inteligencję należą:



- **Klasyfikacja** – wieloklasowa lub binarna, będąca przedmiotem zastosowań w niniejszej rozprawie,
- **Grupowanie** – polegające na łączeniu elementów zbliżonych pod względem badanych cech,
- **Regresja** – przewidywanie wartości numerycznych.

Z biznesowego punktu widzenia klasyfikacja odgrywa bardzo ważną rolę – pozwala na tworzenie uproszczonych modeli opisujących określone zjawiska i stanowiące uogólnienie wiedzy, opartej na przypadkach, zgromadzonych przez system Biga Data. W zależności od wykorzystanej techniki lub algorytmu modele klasyfikacyjne mogą poddawać się inspekcji i analizie, dostarczając dodatkowych informacji o przesłankach stojących za podejmowanymi decyzjami (Morzy T., 2013; Racka, 2015).

Klasyfikacja należy do najpowszechniejszych zadań wykonywanych przez systemy uczenia maszynowego. W modelach klasyfikacyjnych mamy najczęściej do czynienia z dwoma zbiorami: zbiorem treningowym, służącym do uczenia się, oraz zbiorem testowym, używanym do weryfikacji rezultatów.

Systemy regułowe należą do jednych z najwcześniejszych algorytmów uczenia maszynowego, najbliżej spokrewnionych z klasycznymi systemami eksperckimi (Mitchell, 1997). Ich głównym zadaniem jest wyszukiwanie reguł, zdolnych objaśniać korelacje i zależności zachodzące w zbiorach danych. Algorytmy uczenia maszynowego tworzą bardzo rozległą rodzinę, o wewnętrznym zróżnicowaniu, zależnym od konkretnej implementacji. Łączą je jednak pewne wspólne cechy charakterystyczne, z których czytelność struktury modelu jest dla odbiorcy biznesowego jedną z najistotniejszych właściwości.

Jednym z najbardziej znanych algorytmów regułowych jest RIPPER (*Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction*), zaproponowany po raz pierwszy w latach 90 ubiegłego wieku przez (Cohen, 1993, 1995). Generuje on reguły decyzyjne dla każdej klasy z osobna w iteracjach. Wolumen danych jest dzielony na tzw. konstrukcyjny, pozwalający doskonalić reguły w miarę nabierania doświadczenia, oraz tzw. walidacyjny, kontrolujący złożoność całości.

Procedura ta została wybrana do analizy z kilku względów. Po pierwsze, reprezentuje grupę algorytmów białoskrzynkowych, opartych na regułach – a więc czytelnych i zrozumiałych dla



człowieka. Co więcej – należy ona do najtrafniejszych w swojej kategorii. Jednocześnie jest mniej skuteczna niż np. sieci neuronowe lub drzewa decyzyjne. Po drugie, RIPPER jest wrażliwy na niezrównoważone proporcje klas w zbiorach danych. Po trzecie wreszcie – jest stosunkowo wolny, gdy musi przetworzyć wiele atrybutów iteracyjnie. Taki zestaw cech pozwala zaprezentować metody optymalizacji użyte w niniejszej pracy.

Zagrożenia związane z procesami cyfryzacji

Cyfryzacja procesów oferuje liczne możliwości w zakresie automatyzacji zadań, upraszczaniu procesów, wspomaganie podejmowania decyzji oraz zwiększenia bezpieczeństwa.

Niestety cyfryzacja gospodarki niesie ze sobą również różnego rodzaju zagrożenia: zagrożenia związane m.in. ze społecznymi skutkami automatyzacji procesów zmniejszenia liczby zatrudnionych pracowników wymagania związane z elastyczną zmianą kwalifikacji na rynku pracy.

Innym istotnym nowym zagrożeniem jest cyberprzestępczość i związane z nią cyberbezpieczeństwo. Cyberbezpieczeństwo to temat ogólny, a sektor budowlany zapożycza ogólne rozwiązania i ramy z innych branż. Branża budowlana jest jednak specyficzna i potrzebuje specjalistycznych ram, które pomogłyby w zrozumieniu cyberbezpieczeństwa i zarządzaniu nim tak by współczesne techniki wspomagające procesy budowlane nie stały się zagrożeniem. (Jackowska, 2015; Turk i in., 2022).

Zagrożenia wynikające z cyberbezpieczeństwa mogą powodować przestoje cyfrowo sterowanych procesów budowlanych – np. węzłów betoniarskich, systemów kierowania robotami ziemnymi, przepływem informacji oraz utratę/przyjęcie istotnych danych.

2.7. Podsumowanie

Betonowanie w warunkach obniżonej temperatury wymaga specjalnego przygotowania budowy, zapewnienia specjalnych warunków produkcji i transportu mieszanki betonowej, układania jej oraz późniejszej pielęgnacji. W zakresie zapewnienia jakości kluczową rolę odgrywają aktualne warunki atmosferyczne oraz prognoza na najbliższe 24-48 h. Zasadniczy problem polega zatem na tym, że biorąc pod uwagę możliwości zmiany sytuacji meteorologicznej po podjęciu decyzji dotyczącej składu mieszanki i metod pielęgnacji istotnym jest możliwe skorygowanie wcześniejszej decyzji (elastyczność w postaci adaptacji). Najkorzystniejszym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie domieszek jako opcji elastyczności

biernej - zapewnienie szerokiego zakresu tolerancji warunków, że przewidywana zmiana warunków dojrzewania nie wpłynie negatywnie na oczekiwane rezultaty. Wprawdzie należy odnotować w tej dziedzinie znaczący postęp (np. wprowadzenie domieszek na bazie związków azotu, które poszerzyły zakres działania i uprościły dozowanie), jednak poglądy autorytetów (ITB 282 2020, Neville 2012) nadal zalecają ostrożność wobec deklaracji producentów.

Istotne znaczenie ma przede wszystkim definicja warunków obniżonej temperatury. W poniższej tabeli 2.7. zestawiono omówione wcześniej definicje i zasady obowiązujące przy betonowaniu w obniżonej temperaturze i warunkach zimowych na podstawie instrukcji i norm obowiązujących w różnych krajach.

Tabela 2.7. Definicje i zasady obowiązujące przy betonowaniu w obniżonej temperaturze

Aspekt	Canadian Standards Association A23.1/A23.2	South African National Standard 10100.1	Instrukcja ITB (2020)	American Concrete Institute ACI 306R (2016)
Warunki zimowe/obniżonej temperatury – definicja	5°C	7°C przy spadku, 3°C przy wzroście temperatury	Temperatura 10°C, poniżej 5°C – wartość graniczna	4°C
Materiały	Ograniczenia wsp. w/c i minimalnej wytrzymałości w zależności od klasy ekspozycji	Minimalna temperaturamiestanki betonowej +10°C	Ograniczenie w/c do 0,5 Wskazanie zastosowanie cementów o wyższej klasie wytrzymałości i wysokiej wytrzymałości wczesnej (R)	Niskie w/c
Wymagana wytrzymałość krytyczna	3,5 MPa	5 MPa	5,0 MPa CEM I 8 MPa CEM II 10 MPa CEM III	3,5 MPa, 24,5 MPa – dla wielokrotnego
Metoda zabezpieczenia/ograniczenia	Ośłony z nagrzewem, izolacja, przykrycia	Zachowanie ciepła -Ograniczenie realizacji robót w niesprzyjających warunkach	Metoda zachowania ciepła (preferowana), nagrzew, domieszki, zwiększenie ilości cementu, redukcja w/c	Ośłony z nagrzewem, wewnętrzny nagrzew, przykrycia



Analizując dane dotyczące definicji warunków obniżonej temperatury warto podkreślić przyjęty ogólnie poziom $+5^{\circ}\text{C}$. Temperatura ta jest jednocześnie temperaturą graniczną dla zastosowania cementów CEM III. Korzystne wydają się stwierdzenia zawarte w normie SANS 10100.1, która zakłada zakaz betonowania, jeżeli temperatura jest niższa od 7°C przy tendencji do spadku temperatury. Przyjęcie takiej zasady wyeliminowałoby typowe ryzyko wynikające z zastosowania cementów CEM III, gdy późniejszy spadek temperatury stwarza realne ryzyko uszkodzenia ze względu na niższe tempo przyrostu wytrzymałości (znany przypadek uszkodzenia płyty postojowej na stacji paliwowej - układanie w listopadzie w warunkach sprzyjających (ponad $+5^{\circ}\text{C}$) i późniejszy szybki spadek temperatury (przymrozek).

Biorąc pod uwagę zwiększone koszty wynikające z podjęcia decyzji o betonowaniu w obniżonej temperaturze oraz zwiększone ryzyko braku jakości ze względu na możliwość zaistnienia błędów ludzkich (brak przeszkolenia, nieuwaga, błędy odczytów, brak kontroli), problemów wynikających ze zmienności otoczenia oraz występowania ekstremalnych warunków pogodowych trudnych do przewidzenia jedną z możliwych decyzji jest wstrzymanie robót w okresie obniżonej temperatury.

W przypadku podjęcia ryzyka i betonowania w tych niesprzyjających warunkach można rozpatrywać kilka opcji technologicznych, które mogą być zastosowane na zasadniczych dwóch etapach:

- a. Projektowania i produkcji mieszanki betonowej oraz jej transportu:
 - Stosowanie domieszek chemicznych
 - Zastosowanie większej ilości cementu/cementu szybkosprawnego – o wysokiej wytrzymałości wczesnej np. klasy 42,5R lub wyższej przy jednoczesnym zwiększeniu ilości cementu o 10-15% i zmniejszeniu stosunku w/c,
 - Podgrzewanie składników mieszanki betonowej w celu zapewnienia odpowiedniej temperatury mieszanki po ułożeniu
- b. Układania mieszanki betonowej i odpowiedniej pielęgnacji
 - Metody zachowania ciepła mieszanki betonowej (z opcją osłanianie elementów lub całej konstrukcji)
 - Metody dostarczania ciepła do betonu



- Wykonywanie robót betonowych w pomieszczeniach zamkniętych ogrzewanych lub ciepłakach (stałych lub przesuwnych) o temperaturze wewnątrz nie niższej niż +10°C.

Naturalnie możliwe są kombinacje tych metod, przy czym – pomimo wyraźnej tendencji do stosowania domieszek chemicznych (i niezaprzeczalnego postępu w tej dziedzinie) – w myśl obowiązującego podejścia nadal preferowane jest osiągnięcie odporności mrozowej przez beton dojrzewający w temperaturze dodatniej. Wskazują na to rozwiązania innowacyjne (dodatkowa izolacja deskowań, wkładki grzewcze w deskowaniach, zastosowanie PCM, podgrzewane deskowania itp.). Wydaje się celowe stworzenie systemu, który będzie uwzględniał synergiczne efekty zastosowania różnych opcji technologicznych przy założeniu możliwości skorygowania pierwotnie podjętej decyzji na podstawie monitoringu procesu i otoczenia oraz wiarygodnej prognozy meteorologicznej (systematycznie aktualizowanej).

Zasadniczy problem polega zatem na tym, że podejmując roboty betonowe w okresie jesienno-zimowym i wiosennym (przy czym aktualna przy układaniu temperatura otoczenia jest sprzyjająca - powyżej +5°C), temperatura mieszanki betonowej spełnia wymogi przedmiotowej instrukcji – wynosi +5°C (co jest temperaturą graniczną dla dojrzewania mieszanki betonowej bez konieczności ochrony cieplnej). Biorąc pod uwagę rosnącą dynamikę zmian sytuacji pogodowej (trudności w prognozowaniu) oraz zwiększająca się tendencję do wstępowania ekstremalnych wartości czynników pogodowych tradycyjne rozwiązanie oparte na tradycyjnym jednorazowym podejmowaniu decyzji i założeniu o utrzymaniu sprzyjających warunków dojrzewania mogą generować znaczne ryzyko pogodowe.

Realizacja w większości w zmiennym otoczeniu – sezonowość produkcji budowlanej – dla wielu procesów – wpływ czynników pogodowych/klimatycznych – wiodąca rola pogody jako dominującego zakłócenia zewnętrznego (po wpływie czynnika ludzkiego jako czynnika wewnętrznego)

Analizując możliwości wprowadzenia zarówno PM 2.0, jak i zarządzanie tradycyjne można zestawić charakterystykę porównawczą tradycyjnego i nowego podejścia PM 2.0 w formie tabelarycznego zestawienia - Tablica 2.2 - koncepcja własna bazująca na (Boehm, 2004; Kerzner, 2015b; R. E. Levitt, 2011)



Tablica 2.8. Porównanie tradycyjnego podejścia PM 1.0 i Project Management 2.0

Opis	Project Management 1.0	Project Management 2.0
Podstawowe cele	Zarządzanie przedsięwzięciem jako śledzenie i eliminacja odchyłeń od stałego planu, który został określony przed rozpoczęciem	Sprawne monitorowanie, integrowanie i analizowanie informacji w czasie rzeczywistym i przewidując zmiany w trakcie w celu osiągnięcia wartości dla klienta
Pracownicy	Pracownicy kontrolowani na poszczególnych szczeblach zarządzania	Wysokiej klasy specjaliści motywowani zewnątrz, można polegać na ich samokontroli
Zespoły	Duże	Małe
Komunikacja	Hierarchiczna i jednostronna	Równoległa
Planowanie	Zcentralizowane	Zdecentralizowane
Wymagania	Jasno określone wymagania	Ewolucja i elastyczność wymagań
Metodologia PM	Sztywna	Elastyczna
Przywództwo	Styl autorytarny	Styl partycypacyjny (współpraca)
Dostęp do informacji	Lokalny i ograniczony	Nieograniczony globalny dostęp
Kultura	Oparta o ramowe zasady i procedury (porządek)	Bazująca na opcjach elastyczności (możliwość zmiany decyzji)

Do podstawowych problemów wynikających z zastosowania tradycyjnego zarządzania PM 1.0 zaliczyć można przede wszystkim:

- z reguły zespół realizujący nie jest zaangażowany w wykonanie głównego planu – nie czuje się zaangażowany w osiągnięcie określonych tam celów,
- okresowe raporty stanu są z reguły zbyt optymistyczne,
- w warunkach sztywnego wyznaczania celów ograniczona jest kreatywność,
- powstaje luka komunikacyjna pomiędzy menedżerami wysokiego szczebla i zespołami realizującymi.

Pomimo krytyki zawartej w powyższych przesłankach należy także docenić zalety tradycyjnego podejścia, zwłaszcza w przypadku przedsięwzięć o wysokim poziomie ryzyka



(elektrownie atomowe, zakłady chemiczne itp.), gdzie ryzyko skażenia promieniotwórczego, eksplozji chemicznej czy skażenia żywności uzasadnia rygorystyczne przestrzeganie planu, kontroli zasad i procedur. Wydaje się także, że w przypadku projektów niezbyt skomplikowanych i ograniczonym wpływie otoczenia także należy rekomendować do stosowania podejście tradycyjne.

Można ogólnie stwierdzić, że brak jest jednej uniwersalnej metody zarządzania przedsięwzięciami – należy uwzględnić zalety zarówno elastycznego podejścia, jak i dyscypliny. Możliwe jest wykorzystanie częściowo podejścia tradycyjnego (np. budowa hali sportowej), a wykorzystanie podejścia PM 2.0 zastosować przy budowie i wdrażaniu sterowania systemu zarządzania obiektem.

Natomiast w obu metodach bardzo przydatny może być system monitoringu procesów w toku i otoczenia.

Wnioski

Celem niniejszego rozdziału jest analiza istniejącej sytuacji w zakresie możliwości wprowadzenia innowacyjnej metody wspomagania decyzji menadżerskich przy betonowaniu w okresie obniżonej temperatury. Poniżej przedstawiono wnioski ogólne (związane przede wszystkim z możliwościami podejmowania decyzji technologicznych) oraz szczegółowe (związane z realizacją procesu betonowania w obniżonej temperaturze).

Wyciągając wnioski ogólne z niniejszego podsumowania oraz analizy literatury można stwierdzić, że:

- W zarządzaniu procesami budowlanymi trudno jest osiągnąć zgodność między planem i realizacją, co wynika ze specyfiki budownictwa jako dziedziny gospodarki (podobnie, jak rolnictwo – także uzależnione w dużej mierze od otoczenia),
- Jednym z kluczowych czynników wewnętrznych generujących zakłócenia jest wciąż człowiek jako realizator procesów (wahania wydajności, błędy itp.),
- Do czynników zewnętrznych wpływających znacząco (zwłaszcza w klimacie zmiennym – Polska) są czynniki pogodowe,



- Unowocześnienie zarządzania procesami produkcyjnymi w budownictwie w tym ujęciu pozwala na wprowadzenie większej mechanizacji i automatyzacji procesów, wykorzystanie ICT (Information and Communications Technology), co w efekcie prowadzi do ograniczenia wpływu pracowników na rezultaty realizowanego procesu budowlanego oraz wpływu warunków pogodowych jego poprawny na przebieg,
- Pomimo dążenia do uprzemysłowienia budownictwa, co przejawia się w coraz większym wprowadzaniu betonowania w systemowych urządzeniach formujących, prefabrykacji i – ostatnio – budownictwie modułowym, jednak należy liczyć się z pewnym udziałem robót na placu budowy – przykładem są roboty betonowe,
- Ich realizacja jest obciążona w sposób szczególny wpływem zmiennego otoczenia, gdyż decyzje dotyczące składu mieszanki betonowej, metod jej układania i pielęgnacji podjąć trzeba z relatywnie dużym wyprzedzeniem, co generuje duże ryzyko – decyzje trzeba podejmować w warunkach ograniczonej ilości i jakości informacji (np. prognoza pogody),
- W tak opisanych warunkach niepewności i ryzyka pozostają dwie strategie działania: zwiększenie ilości i jakości informacji dotyczącej realizowanych procesów i otoczenia (także prognoza) oraz wprowadzenie elastyczności (warianty technologiczne oparte o opcje materiałowe i procesowe),
- Stwierdzić można rosnące zainteresowanie badaczy monitorowaniem procesu betonowania, co potwierdza istotne znaczenie tego procesu przy realizacji przedsięwzięć budowlanych – z reguły są one zlokalizowane na ścieżce krytycznej,
- Istotnymi motywatorami do podjęcia nowych inicjatyw w tym zakresie są nowatorskie programy Industry 4.0/5.0 i Project Management 2.0 promujące zastosowanie technologii innowacyjnych (coraz doskonalsze czujniki, automatyczne zbieranie, transmisja i analiza danych, wykorzystanie uczenia maszynowego itp.) oraz zdecentralizowane zarządzanie zwinne oparte na elastyczności,
- Bazując na analizie literatury stwierdzić można lukę umożliwiającą wprowadzenie systemu wspomaganie decyzji menadżerskich podczas betonowania w obniżonej



temperaturze, a szczególnie w warunkach ryzyka związanego z nagłym obniżeniem temperatury otoczenia.

Na podstawie analizy podstawowych standardów dotyczących wykonywania robót betonowych w warunkach obniżonej temperatury można przedstawić następujące wnioski szczegółowe:

1. Systematyczne doskonalenie instrukcji ITB nr 282 na przestrzeni ostatniego ćwierćwiecza zmierza do zapewnienia jakości robót prowadzonych w tych niekorzystnych warunkach, dążąc do wprowadzenia procedur opartych m.in. odpowiednim przygotowaniu procesu betonowania i monitorowaniu jego rezultatów.
2. Przedstawione w przedmiotowej instrukcji tablice umożliwiają szacowanie spadku temperatury zarówno podczas transportu poziomego, jak i pionowego oraz przy układaniu i pielęgnacji mieszanki betonowej,
3. Zaleca się pomiary temperatury otoczenia, mieszanki betonowej i betonu, jednak zaznaczono, że wystarczającą dokładność można osiągnąć poprzez umieszczenie termometrów na powierzchni betonu,
4. Zalecane wykonywanie odczytów dwukrotnie na dobę wydaje się wysoce niewystarczające w przypadku zagrożenia nagłym spadkiem temperatury,
5. Utrzymuje się nadal (podobnie, jak w poprzednim wydaniu przedmiotowej instrukcji z roku 2011) sceptyczne podejście dotyczące efektywności modyfikacji betonu domieszkami w zakresie obniżenia temperatury zamarzania wody w betonie,
6. Stwierdzono, że beton w początkowej fazie dojrzewania może ulec uszkodzeniu nawet przy nieznacznym spadku temperatury poniżej 0°C (w granicach 1°C).

Pomimo istotnego rozwoju w dziedzinie zapewnienia jakości robót betonowych w obniżonej temperaturze wobec postępującej ekstremalizacji zjawisk pogodowych istnieje potrzeba opracowania procedur postępowania w tych niekorzystnych warunkach w oparciu o badania laboratoryjne oraz testowanie ich (także bazujących na synergii różnych metod) w warunkach budowy przy oddziaływaniu otoczenia charakteryzującego się dużą niepewnością i wysoką dynamiką postępujących zmian.



W wyniku przedstawionej analizy literatury oraz własnych doświadczeń zaproponowano innowacyjne rozwiązanie bazujące na koncepcji trzypoziomowego systemu doradczego COLCON (**C**old **C**oncrete), który opiera się o:

- wieloetapowe podejmowanie decyzji,
- naukę z przykładów (wykorzystanie dotychczasowych doświadczeń),
- wprowadzenie innowacji materiałowych i procesowych,
- przygotowanie wariantów technologicznych: zgodnych z ideą elastyczności czynnej (adaptacyjność) i biernej (odporność).



Rozdział 3. Cel, tezy i przedmiot rozprawy

3.1. Cel rozprawy

Celem rozprawy jest wskazanie możliwości usprawnienia procesu podejmowania decyzji technologicznych w budownictwie. Metoda bazuje na podejściu elastycznym – decyzje są podejmowane hierarchicznie i wieloetapowo – w zależności od poziomu zarządzania i horyzontu planowania oraz konieczności uzupełniania informacji. Przewidziano możliwość korekty dotychczasowej decyzji w oparciu o zarządzanie procesem w czasie rzeczywistym (poziom III). Skoncentrowano się na technologii betonowego budownictwa na bazie betonu cementowego, jednak założenia metody można uogólnić na zarządzanie procesami budowlanymi uzależnionymi od stanu zmiennego otoczenia.

Zaproponowano system doradczy oparty o tablicę decyzyjną uwzględniającą aktualny stan procesu i otoczenia, jak i prognozę stanu otoczenia na najbliższy okres.

3.2. Tezy rozprawy

Podczas realizacji postawionego celu rozprawy zostały sformułowane następujące tezy badawcze:

- T1. Zastosowanie elastycznego proaktywnego podejścia umożliwi osiągnięcie wymaganych efektów procesu pomimo działania w zmiennym otoczeniu (zapewnienie jakości)
- T2. Monitorowanie procesów i otoczenia on-line pozwala podejmować właściwe decyzje przy uwzględnieniu możliwości korekty decyzji w kolejnym etapie
- T3. Budowa systemu doradczego w oparciu o program Rapid Miner wykorzystujący uczenie się z przykładów systematycznie zwiększa efektywność i skuteczność decyzji menadżerskich przy realizacji procesów budowlanych.

Tezy te wynikają z postawionego powyżej celu rozprawy – podejście proaktywne (teza T1) umożliwia działanie wyprzedzające zaistnienie zakłócenia, które w przypadku uszkodzenia/zniszczenia elementu może oznaczać poważne konsekwencje. Zastosowanie



zarządzania w czasie rzeczywistym (teza T2) jest związane ze znaczącym zaawansowaniem metod zarządzania procesami budowlanymi w dziedzinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport – wynika z idei Industry 5.0. Program Rapid Miner wykorzystany do uczenia się z przykładów (teza T3) jest bardzo przydatnym narzędziem ułatwiającym systematyczne gromadzenie wiedzy i poszukiwania bazy dobrych praktyk w systemie zarządzania jakością.

3.3. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest proces betonowania realizowany w warunkach zmiennego otoczenia ze szczególnym uwzględnieniem obniżonej temperatury. Naturalnie zbieranie danych do systemu ograniczone do okresu przejściowego (jesienno-zimowego i zimowo-wiosennego) wymagało gromadzenia informacji na przestrzeni wielu lat. Jednak przy wyborze przedmiotu rozprawy kierowano się przede wszystkim własnymi obserwacjami z prowadzonych inwestycji i przekonaniem o doniosłości problemu z punktu widzenia praktyki budowlanej. W tradycyjnym ujęciu najprościej można zakazać realizacji procesu betonowania w niesprzyjających warunkach, jednak z punktu widzenia rosnącej presji czasu i dążenia do stworzenia przewagi konkurencyjnej prezentowana metoda COLCON jest rozwiązaniem przedstawionego problemu menadżerskiego.

3.4. Zakres rozprawy

W rozdziale 1 przedstawiono wprowadzenie bazujące na motywacji autora. Przedstawiono przede wszystkim doniosłość problemu betonowania w warunkach obniżonej temperatury otoczenia. Wprawdzie najprościej jest – było – zaplanować w harmonogramie przerwy w realizacji robót w okresie niesprzyjającym dla danych procesów. Jednak z jednej strony presja inwestorów (do realizacji robót pomimo utrudnień) oraz rosnąca konkurencja i – z drugiej strony - postęp technologiczny (np. kolosalny postęp w dziedzinie monitorowania otoczenia i procesów w toku (także dostępność czujników i sprzętu pomiarowego z opcją wykorzystania komunikacji bezprzewodowej, nowoczesne domieszki do betonu na bazie związków azotu czy materiały zmiennofazowe, a także programy wykorzystujące uczenie maszynowe (Rapid Miner) uzasadniają podjęcie badań i implementację systemu wspomagania decyzji technologicznych w tej dziedzinie. Poza istoty prezentacją problemu menadżerskiego opisano



także badania własne w oparciu o stopniowe kompletowanie urządzeń pomiarowych – osiągnięto synergii pomiędzy zakupami dokonanymi przez Doktoranta oraz stopniowym rozwojem urządzeń pomiarowych w laboratorium na Politechnice Poznańskiej (np.. komora klimatyczna). Na zakończenie przedstawiono proponowane zestawy urządzeń umożliwiające osiągnięcie celu rozprawy

W rozdziale 2 omówiono stan wiedzy w zakresie rozprawy wskazując typowe problemy wynikające z odpowiednich norm i standardów (przede wszystkim instrukcji ITB nr 282), nowych możliwości związanych z zastosowaniem innowacyjnych technologii i metod zarządzania procesami budowlanymi. Wskazano też istotny kierunek wsparcia decyzji menadżerskich w budownictwie – w oparciu o systemy doradcze. Wskazano możliwości oprogramowania (Rapid Miner) oraz korzyści z zastosowania algorytmu Random Forest.

W Rozdziale 3 przedstawiono w sposób zwięzły cel, tezy rozprawy, przedmiot rozprawy oraz jej zakres. Cel rozprawy przedstawiono w świetle aktualnego problemu menadżerskiego – problemów jakościowych związanych z realizacją robót betonowych w okresie przejściowym, kiedy nagły spadek temperatury może spowodować poważne problemy – zagrażające realizacji robót w terminie, a także przekroczenie budżetu w przypadku konieczności wyburzenia elementu i ponownego wykonania. Tezy rozprawy związane są z przedstawionym celem i bazują na osiągnięciach innowacyjnych technologii i metod zarządzania.

W rozdziale 4 omówiono teoretyczne podstawy systemu COLCON (COLd CONcreting). W tym rozdziale omówiono pięć podstawowych zagadnień (zastosowanie elastyczności, monitoring jako element wsparcia systemu w celu efektywnego wdrożenia elastyczności, temperaturę – element kluczowy w modelu dojrzewania betonu w elemencie, sezonowość w budownictwie przejawiającą się w spadku wydajności procesów budowlanych, kiedy warunki atmosferyczne są niesprzyjające, oraz zastosowanie oprogramowania Rapid Miner w celu tworzenia drzew decyzyjnych i tablic decyzyjnych, które pozwalają na wybór racjonalnego rozwiązania w danych warunkach.

W rozdziale 5 przedstawiono opis systemu doradczego COLCON, który działa na trzech poziomach zarządzania – taktycznym, operacyjnym oraz w czasie rzeczywistym. Każdy z tych poziomów scharakteryzowano i opisano działanie menadżera. Na poziomie pierwszym

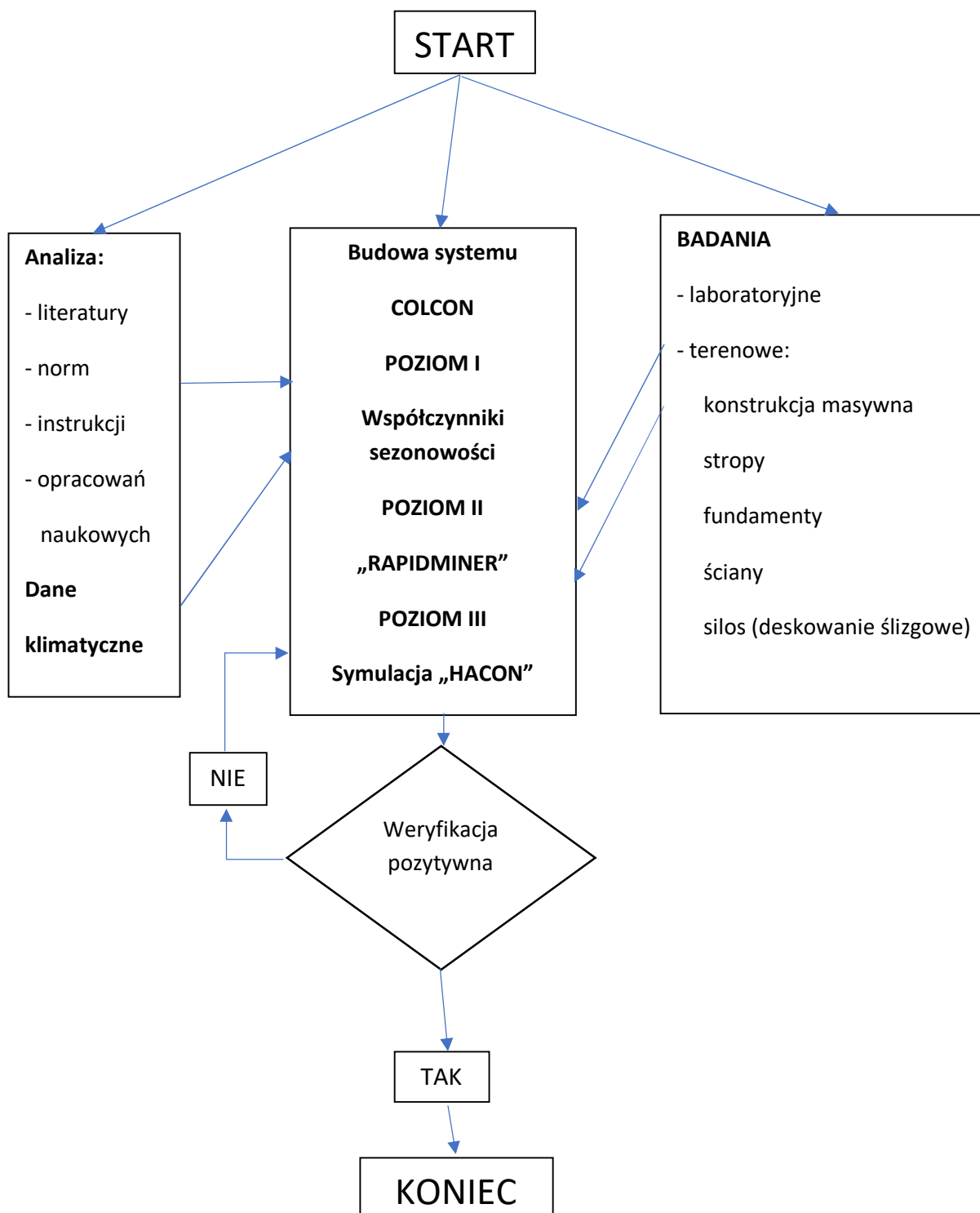


podejmowane są decyzje dotyczące okresu realizacji robót betonowych – działanie opiera się na współczynnikach sezonowości, które wskazują na wpływ warunków pogodowych na możliwości realizacji procesu betonowania w otwartym terenie. Na poziomie drugim dobierana jest receptura mieszanki betonowej i metody pielęgnacji na podstawie sytuacji aktualnej i prognozy pogody (24/48 h). Na poziomie trzecim na podstawie symulacji przebiegu procesów w dojrzewającym elemencie w oparciu o monitoring i prognozy pogody podejmowana jest decyzja o uruchomieniu dodatkowej opcji elastyczności czynnej – np. podgrzewanego deskowania w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego – nagłego spadku temperatury otoczenia niezgodnego z wcześniejszą prognozą.

W rozdziale 6 omówiono praktyczne zastosowanie systemu COLCON. Przedstawiono opis zastosowanego sprzętu oraz przedstawiono dwa przykłady zastosowania systemu COLCON. Przykłady obejmują podstawowe kierunki zastosowania systemu COLCON: 1) betonowanie konstrukcji masywnej (kiedy typowa jest dominacja elastyczności biernej – odporności) oraz betonowanie elementu ściennego w typowych deskowaniach systemowych wyposażonych dodatkowo w opcję nagrzewu (zastosowanie także elastyczności czynnej – adaptacyjności).

W rozdziale 7 przedstawiono wnioski ogólne i szczegółowe oraz zaprezentowano problematykę dalszych badań.

Ogólną ideę i zakres badań w rozprawie doktorskiej przedstawiono na rys. 3.1.



Rysunek 3.1 Schemat działania przy badaniach związanych z realizacją rozprawy doktorskiej



Rozdział 4. Teoretyczne podstawy systemu COLCON

4.1. Wprowadzenie

Współczesny system doradczy związany z podejmowaniem decyzji w zmiennym otoczeniu powinien być oparty o strategię elastyczności i podejście proaktywne. Dotychczas dominujące podejście reaktywne wynika przede wszystkim z wieloletniej praktyki w zarządzaniu procesami i przedsięwzięciami budowlanymi opartej o PM 1.0, które bazuje na jednoetapowym podejmowaniu decyzji. Idea PM 2.0 bazująca na podejściu elastycznym z wykorzystaniem monitoringu online parametrów otoczenia oraz przebiegu zmian temperatury w dojrzewającej mieszance betonowej jest możliwa teraz dzięki postępowi technologicznemu i dostępności (czujników, urządzeń mobilnych oraz możliwości zbierania, przesyłania i obróbki informacji) oraz dostępności oprogramowania umożliwiającego generowanie tablic decyzyjnych, a także systematyczne uczenie się na bazie przykładów. System doradczy COLCON umożliwi podejmowanie właściwych decyzji menadżerskich przy uwzględnieniu oddziaływania zmiennego otoczenia oraz uwarunkowań termodynamicznych dojrzewającego betonu z możliwością adaptacji - korekty decyzji w kolejnych etapach zarządzania procesem betonowania w obniżonej temperaturze. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione kluczowe elementy systemu COLCON:

- podejście elastyczne,
- monitoring otoczenia i procesów w czasie rzeczywistym,
- podstawy termodynamiczne zjawisk zachodzących w dojrzewającym betonie – umożliwienie szacowania procesu dojrzewania betonu aż do osiągnięcia wytrzymałości zadanej mrozowej,
- wpływ niekorzystnych warunków atmosferycznych na realizację robót budowlanych
- możliwości uczenia maszynowego na przykładzie programu Rapid Miner.



4.2. Elastyczność jako alternatywna idea dla klasycznego podejścia w zarządzaniu

Dynamiczne zmiany społeczne i technologiczne mają ogromny wpływ na realizację procesów – rosnące wymagania (skrócenie czasu realizacji poszczególnych etapów robót, działanie w warunkach niepewności przy ograniczonej ilości informacji) a co za tym idzie również warunki funkcjonowania przedsiębiorstwa. O ile jeszcze kilkanaście lat temu w odpowiedzi na dynamiczne zmiany środowiska można było odpowiedzieć poprzez restrukturyzację, transformację oraz adaptację dzisiaj jest to niewystarczające do pomyślnego zrealizowania zadania oraz osiągnięcia przewagi konkurencyjnej na rynku budowlanym (Wojtkowiak, 2015). Powyższe czynniki powodują powiększenie obszarów niepewności i ryzyka oraz brak skutecznej możliwości ich wyeliminowania z drugiej strony stwarzają możliwości ich wykorzystania i osiągnięcia korzyści – wykorzystania pojawiających się szans (Skrodzka, 2013).

Nieustanne przeobrażanie się przedsiębiorstw działających w tradycyjnych strukturach i stosujących klasyczne technologie jest nie wystarczające, by sprostać dynamicznie zmieniającemu się otoczeniu zarówno na rynku zleceń oraz przede wszystkim w trakcie realizacji inwestycji. Dlatego nowoczesne przedsiębiorstwa budowlane powinny zmieniać narzędzia i strategie i podążać w kierunku upodobnienia produkcji budowlanej do produkcji fabrycznej. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu rozwiązań wykorzystywanych przede wszystkim podejściu zgodnym z ideą Industry 4.0/5.0 oraz coraz szerszym zastosowaniem technologii BIM.

Nowoczesne technologie oparte o wymianę i przepływ informacji w czasie rzeczywistym pozwoliły na stworzenie nowych elastycznych rozwiązań w postaci elastyczności określanej jako zwinność (Trzecieliński, 2011) czyli sprawną adaptację do warunków zmieniającego się środowiska pracy i otoczenia w celu eliminacji/ograniczenia wpływu niepewności i ryzyka

Elastyczność jest elementem nowoczesnej strategii zarządzania na różnych jego poziomach: od – podejścia do zarządzania współczesnym przedsiębiorstwem przez realizację przedsięwzięć po realizację procesów na budowie. Elastyczność ideowo zmierza nie tylko do redukcji ryzyka, ale także do możliwości wykorzystania okazji.

Elastyczność poprzez zdolności adaptacyjne wpływa na wszystkie obszary zarówno organizację produkcji, zasoby ludzkie, finansowe i informacyjne o czym świadczy rozwój wiedzy w



poszczególnych obszarach, a także osiągnięcie synergii z innymi metodami zarządzania – np. lean management (Saurin i in., 2013; Thüerer, 2013), (Nowotarski i in., 2016; Nowotarski & Paślawski, 2018)

Specyfika branży budowlanej – zwłaszcza sezonowość związana z cyklem rocznym oraz logistyka obsługi różnych lokalizacji w przestrzeni geograficznej wymaga elastycznego przeliczania zasobów oraz adaptacyjnej zmiany technologii i organizacji pracy niezbędnej w turbulentnym i dynamicznie zmieniającym się otoczeniu dla skutecznego podejścia opartego na proaktywnym zarządzaniu, a nie tradycyjnemu „gaszenia pożarów” (dążenia do opanowania sytuacji po zaistnieniu zakłócenia).

W tak zdefiniowanej elastyczności mamy do czynienia z paradoksem łączenia różnych technologii i generowania dodatkowych kosztów dla osiągnięcia odpowiedniej równowagi między tymi czynnikami co pozwala wyeliminować ryzyko lub złagodzić konsekwencje jego wystąpienia.

Tak pojmowana elastyczność w zarządzaniu polegać będzie na poszukiwaniu optymalnych rozwiązań w celu zapewnienia możliwie jak najwyższej skuteczności i efektywności na bazie opcji, taktyk i strategii elastyczności.

Elastyczność możemy podzielić ogólnie na wewnętrzną i zewnętrzną (Golden i Powell 2004):

- elastyczność wewnętrzna organizacji to zdolność do dostosowania przewidywanych czynników zmienności – możliwość realizacji zadania pomimo zaistnienia zakłóceń dzięki np. utrzymywaniu rezerw zdolności produkcyjnych;
- elastyczność zewnętrzna to zdolność do ograniczenia wpływu określonych czynników niepewności i ryzyka np. dzięki dysponowaniu kilkoma źródłami zaopatrzenia w beton towarowy;

W porównaniu do rozwiązań tradycyjnych, które charakteryzują się stałym układem procesów i rozwiązań (podejście deterministyczne zgodne z PM 1.0) podejście elastyczne powoduje, że menadżer dysponuje zarówno opcjami elastyczności czynnej (adaptacyjność) oraz biernej (odporność), co umożliwia realizację procesów pomimo stosunkowo dużej częstotliwości zmian w otoczeniu.

Takie podejście wydaje się być odpowiednie dla zarządzania procesami betonowania w obniżonej temperaturze przy zagrożeniu jej nagłym spadkiem ze względu na możliwość indywidualizacji i dopasowania produkcji elementów betonowych o różnorodnym kształcie i przekroju realizowanych w zmiennych warunkach lokalizacyjnych oraz dynamicznie zmieniającego się otoczenia np. warunków atmosferycznych (zwłaszcza temperatury).

Dokonując przeglądu i analizy literatury pod kątem zastosowania elastyczności należy wyodrębnić dwa główne nurty: adaptacja i odporność. Przyjęty podział elastyczności na dwie podstawowe składowe jako odpowiedzi wymienić można przykładowo koncepcje Krupskiego (poziom strategiczny), Paślawskiego (poziom strategiczny, taktyczny i operacyjny) Ross'a i innych (przede wszystkim odporność w ujęciu systemowym) (Krupski, 2005; Paślawski, 2017; Ross i in., 2008).

Ponadto osiąganie wysokiego poziomu elastyczności to zdolność tworzenia przewagi konkurencyjnej organizacji, co w niektórych przypadkach może być jedynym warunkiem przetrwania przedsiębiorstwa w zmiennym otoczeniu (Wojtkowiak, 2015). Możliwości wykorzystania elastyczności jako czynnika konkurencyjności ilustruje rys. 4.1 (Paślawski 2009 na podstawie Lau 1996).

Wysoka	JAKOŚĆ		ELASTYCZNOŚĆ	
Zdolność do spełniania oczekiwań klienta				
Niska	KOSZT		INNOWACYJNOŚĆ	
	Niski	Potencjał reakcji na zmiany	Wysoki	

Rys. 4.1. Cztery zasadnicze elementy konkurencyjności – adaptowana koncepcja Lau (1996)

Porównanie ogólnej koncepcji elastyczności oraz specyficznego podejścia do elastyczności w budownictwie przedstawiono w tablicy 4.1.

Tabela 4.1. Ogólna koncepcja elastyczności i elastyczność w inżynierii procesów budowlanych - porównanie (Paślawski 2009)

Koncepcja	Ogólna koncepcja elastyczności	Specyficzne podejście do elastyczności w budownictwie
Wyszczególnienie	Możliwość dostosowania do wymagań indywidualnego klienta - customerization	Możliwości dostosowania do specyficznych warunków realizacji - conditionalization
Obiekt dostosowania	Klient/Odbiorca	Otoczenie/środowisko
Kluczowy element ryzyka	Zapotrzebowanie klienta	Warunki realizacji
Przykłady	Przemysł samochodowy, maszynowy elektroniczny	Budowa dróg lotnisk, montaż elewacji budynków wysokich

Zasadnicza różnica polega na tym, że w ogólnym ujęciu (w odniesieniu do większości dziedzin gospodarki (np. przemysł samochodowy) elastyczność służy do dostosowania do wymagań klienta – zwłaszcza do spełnienia jego indywidualnych preferencji. Kastomeryzacja (ang. customerization) może odbywać się dzięki dostosowaniu produktów lub usług do potrzeb klientów dzięki elastyczności systemów produkcyjnych. W budownictwie natomiast problemy zmienności manifestują się przede wszystkim w zmiennym otoczeniu (wewnętrznym i zewnętrznym).

Przesłanki zastosowania elastyczności

Elastyczność w zarządzaniu przedsiębiorstwem oraz w organizacji procesów jest odpowiedzią na zmieniające się warunki otoczenia w jakich musi funkcjonować i realizować zadania współczesna organizacja – przedsiębiorstwo budowlane.

Współcześnie mamy do czynienia z postępującą globalizacją, deregulacją rynków, rosnącym natężeniem walki konkurencyjnej przy realizacji wszelkich inwestycji.

Wszystkie te zjawiska w makro i mikro otoczeniu, jak również działania podejmowane przez firmy, generują wysoką zmienność w codziennej działalności przedsiębiorstwa. W związku z powyższym odpowiednia elastyczność organizacji pozwala sprawnie funkcjonować w turbulentnym otoczeniu i stanowi ważny, coraz ważniejszy, element budowania konkurencyjności i efektywności przedsiębiorstwa (Osbert-Pociecha i in., 2008)



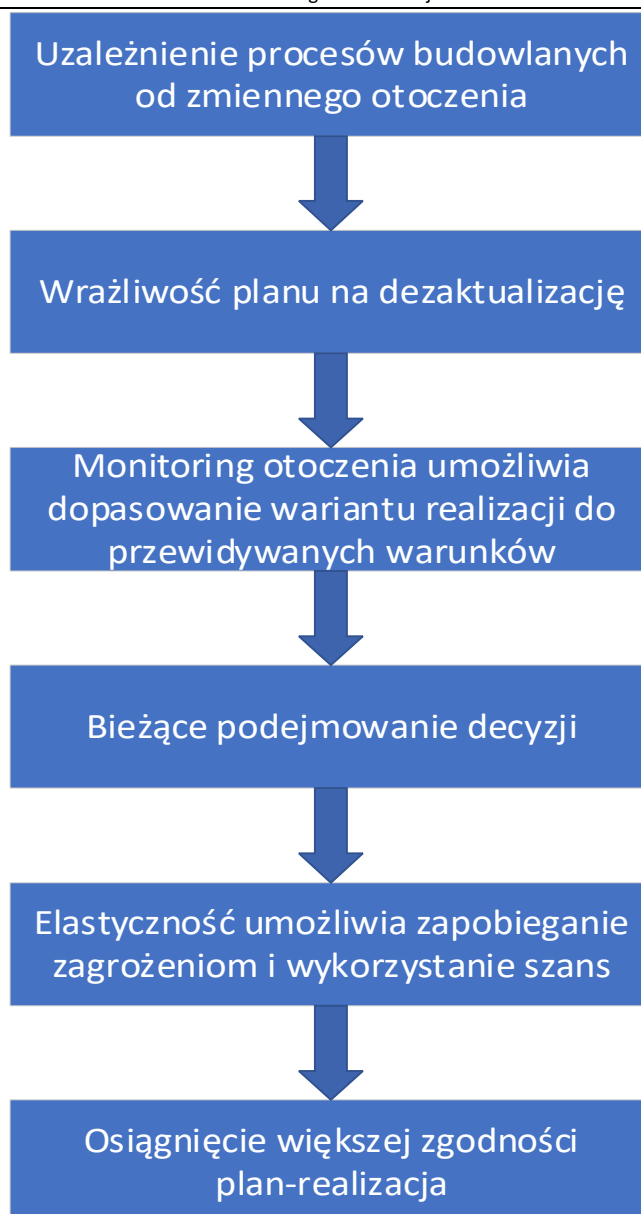
Jednocześnie elastyczność przedsiębiorstwa wymaga przełamania barier technologicznych związanych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii.

Szybki postęp sprzyja wprowadzeniu elastyczności przez wykorzystanie takich elementów chociażby jak monitoring otoczenia i procesów w toku w czasie rzeczywistym.

Stosowanie nowoczesnych technologii – innowacji ułatwia wprowadzenie podejścia elastycznego w inżynierii procesów budowlanych poprzez wykorzystanie proaktywnego podejścia bazującego na monitorowaniu i symulowaniu procesów w toku. (Paślawski, 2009)

Zastosowanie elastyczności pozwala na etapowe podejmowanie decyzji poprzez dostosowanie poszczególnych etapów realizowanego procesu do zmieniającego się otoczenia w celu osiągnięcia możliwości dalszego działania w oparciu o odpowiednie taktyki elastyczności (opracowane na bazie opcji elastyczności). Wybór odpowiedniego - racjonalnego rozwiązania na kolejnym etapie – w zależności od aktualnego stanu otoczenia jest wynikiem zastosowania odpowiednich taktyk i ogólnej strategii elastyczności, co ilustruje rys. 4.2.

Do podstawowych przesłanek zastosowania elastyczności zaliczyć należy przede wszystkim konieczność działania w zmiennym otoczeniu. W związku z występowaniem tego rodzaju niepewności opracowany wcześniej harmonogram jest wrażliwy na dezaktualizację. Tymczasem nowe możliwości, jakie stwarza monitoring otoczenia i procesów w toku dają możliwość dopasowania opcji realizacji do rzeczywistych warunków realizacji (opisanych w taktykach elastyczności jako elementów strategii elastycznej realizacji procesu budowlanego). Istotna jest w tym wypadku możliwość zapobiegania zagrożeniom i wykorzystania pojawiających się szans. W rezultacie możliwe jest zwiększenie zgodności plan – realizacja.



Rysunek 4.2. Ciąg logiczny uzasadniający zastosowanie elastyczności (Paśtawski, 2009)

Zasadniczą przesłanką wprowadzenia elastyczności jest zatem niepewność, która wynika przede wszystkim z trudności przewidywania warunków realizacji (np. warunki pogodowe). Jak wiadomo zmiany klimatyczne prowadzą nie tylko do podniesienia średniej temperatury rocznej, suszy i powodzi, ograniczenia dostępu do wody słodkiej, zwiększonego poziomu mórz, ale także do ekstremalizacji zjawisk pogodowych ((EU 2023 – Climate Action², Kundzewicz i in. (2007).

² EU 2023 – Climate Action, pobrano z Internetu: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_pl, dnia 10.08.2024



Dualizm elastyczności

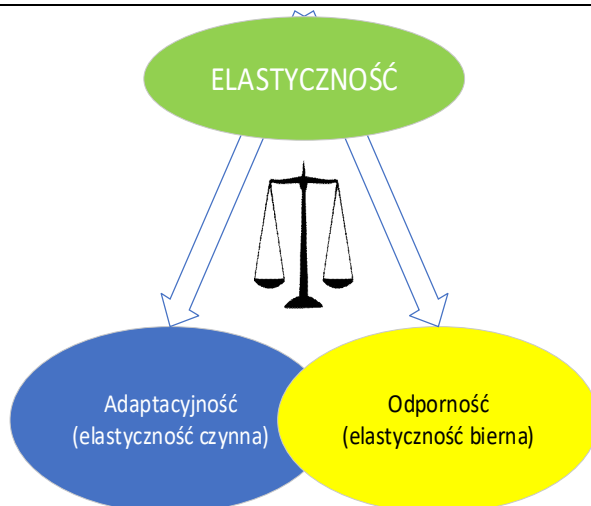
Z analizy literatury pod kątem zastosowania elastyczności omówionej powyżej można wyodrębnić podział na elastyczność zewnętrzną i wewnętrzną związaną głównie z funkcjonowaniem przedsiębiorstwa oraz elastyczność bierna i czynną związaną z realizacją procesów.

Z punktu zawartości niniejszej rozprawy kluczową parą jest elastyczność bierna określona tutaj jako odporność i elastyczność czynna zwana adaptacyjnością.

Odporność (ang. robustness) to możliwość osiągnięcia zakładanych efektów pomimo wystąpienia nieprzewidywalnych w pewnym zakresie zmian w otoczeniu. Istotne jest określenie zakresu zmian oraz przedziału czasu, w którym to zakłócenie występuje.

Adaptacyjność (ang. adaptability) to zdolność do przystosowania się do zmieniających się warunków oraz właściwość umożliwiająca odpowiednie reagowanie systemu na zmiany otoczenia. Mechanizm dostosowania powinien opierać się na systemie monitorowania (zbierania, przesyłania i analizy danych), który umożliwia podjęcie właściwej decyzji.

W przypadku betonowania odporność w przeciwieństwie do adaptacyjności uznać należy za cechę bardzo korzystną, gdyż łatwiej jest zawyżyć parametry mieszanki betonowej w celu kompensacji zakłóceń, które mogą wystąpić we wczesnej fazie wiązania betonu niż stosować adaptacyjność w postaci np. ogrzewanych deskowań. Podobnie korzystne wydaje się zastosowanie modyfikacji mieszanki betonowej przy zastosowaniu domieszek (jednak w tym przypadku należy zwrócić uwagę na sceptycyzm sygnalizowany w zakresie np. możliwości obniżenia temperatury zamarzania wody w betonie (Neville 2012, ITB Instrukcja nr 282, 2020), co sygnalizowano w rozdziale 2. Na rys. 4.3. przedstawiono podział elastyczności czynnej i biernej oraz pewien obszar synergii obu opcji.



Rysunek 4.3. Schemat podziału elastyczności: czynna (adaptacyjność) oraz bierna (odporność)

W proponowanej metodzie COLCON założono wykorzystanie obu form elastyczności. Elastyczność bierna na drugim poziomie podejmowania decyzji (np. zastosowanie odpowiedniej receptury mieszanki betonowej przy uwzględnieniu możliwości jej modyfikacji domieszkami - dla danych warunków początkowych oraz przy uwzględnieniu prognozy. Wykorzystanie odporności zakłada się w przypadku zaistnienia scenariusza optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego. Natomiast na trzecim poziomie (przy założeniu działania monitoringu otoczenia i procesów dojrzewania – narastania wytrzymałości betonu oraz śledzenia prognoz pogody (wraz z symulacją zjawisk w przedmiotowym elemencie betonowym), istotną rolę odgrywa elastyczność czynna – adaptacyjność która pozwala na dostosowanie decyzji w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego.

W pierwszej fazie realizacji procesu betonowania (etap II w systemie COLCON) to odporność stanowić będzie kluczowy element elastyczności poprzez przede wszystkim modyfikację mieszanki betonowej – takie rozwiązanie jest relatywnie tanie, a co za tym idzie uzasadnione ekonomicznie. W III etapie i kolejnych etapach poprzez zastosowanie monitoringu procesu w toku oraz stosowanie dodatkowych elementów w postaci elektronagrzewu czy też podgrzewanych deskowań możliwe będzie zwiększenie odporności danego procesu na niekorzystne warunki zewnętrzne (długotrwałe oddziaływanie obniżonej temperatury) poprzez zastosowanie elastyczności czynnej – adaptacyjności przez odpowiednie uruchamianie wymienionych urządzeń w odpowiednim czasie.



Klasyfikacja elastyczności

Poza omawianymi wyżej elastycznością wewnętrzną i zewnętrzną oraz czynną i bierną Paślawski omawia także inne rodzaje elastyczności zgodnie z opracowaniem (Paślawski, 2009). W celu prezentacji pełniejszej klasyfikacja elastyczności należy wymienić następujące warianty:

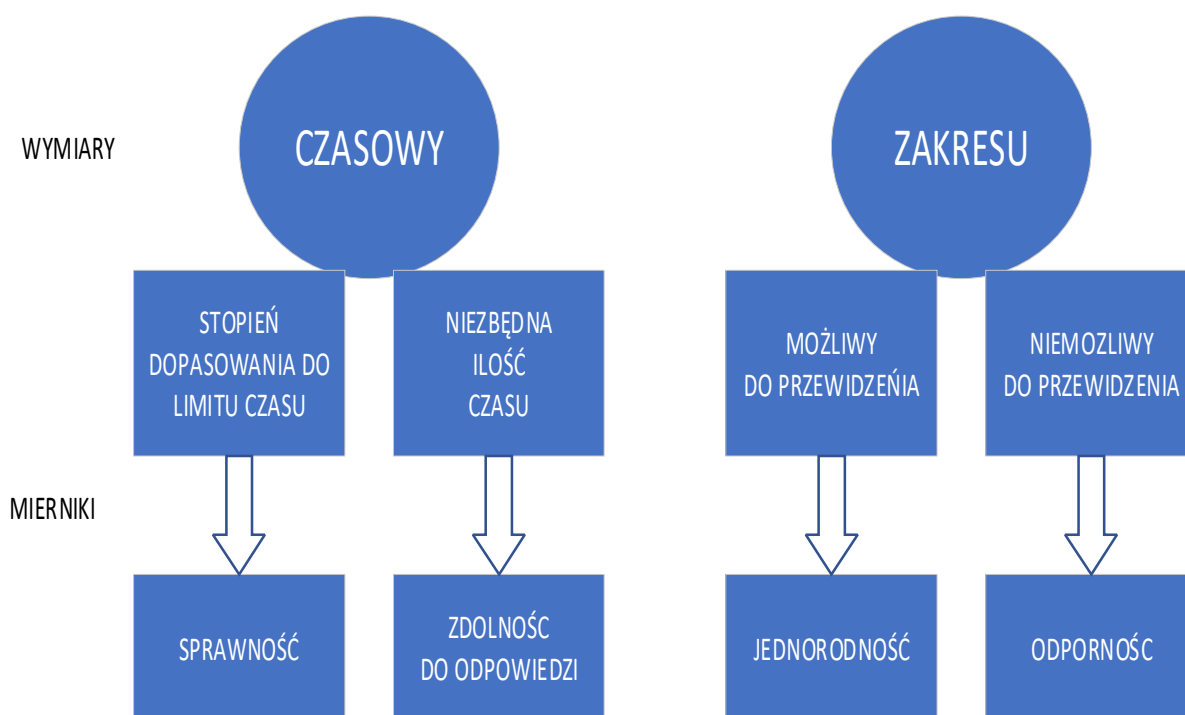
- Elastyczność horyzontalna – odnosząca się do poszczególnych faz i stanów produkcji, a główny cel stanowi wyznaczenie granic analizowanego podsystemu (w budownictwie może to oznaczać produkcję mieszanki betonowej, jej transport, wbudowanie oraz pielęgnację i dojrzewanie),
- Elastyczność pionowa – hierarchiczna, która dotyczy pojedynczych zasobów lub całego systemu, można wyróżnić kilka poziomów podejmowania decyzji (np. strategiczny, taktyczny i operacyjny),
- Elastyczność czasowa - oparta na czasie reakcji w odpowiedzi na zmiany otoczenia, Golden i Powell (2000) proponują podział oparty na czasie reakcji organizacji na zmiany zachodzące w otoczeniu,
- Elastyczność według możliwości przewidywania zmian – jest to kluczowa kategoria, biorąc pod uwagę podział na możliwe do przewidzenia oraz trudne (niemożliwe) do przewidzenia oraz informacji, jakimi możemy dysponować
- Elastyczność według reaktywności: proaktywna i reaktywna związana z podejmowaniem działań przed lub po wystąpieniu zdarzenia,
- Elastyczność według strategii działania: ofensywna i defensywna,
- Elastyczność lokalizacji: wewnętrzna/zewnętrzna – zależnie od obszaru, gdzie się znajduje,
- Elastyczność według ważności czynników ryzyka i niepewności,
- Elastyczność według lokalizacji elastyczności w strukturze procesu,

Rozwiązanie proponowane w systemie COLCON bazuje przede wszystkim na elastyczności biernej i czynnej zgodnie z opisaną wyżej sekwencją. Z punktu widzenia możliwości

przewidywania zmian, to dzięki dużej bezwładności cieplnej elementów betonowych dysponujemy pewnym zapasem czasu niezbędnym na podjęcie decyzji i zapobieganie destrukcji mrozowej (analizując prognozy pogody oraz symulując procesy termiczne w dojrzewającym elemencie betonowym).

Miernik elastyczności

Wyniki badań nad niepewnością i ryzykiem w przypadku przedsiębiorstw i przedsięwzięć budowlanych wykazują, że największe wymierne korzyści związane z eliminacją niepewności i ryzyka daje wykształcenie odpowiedniego poziomu elastyczności jako kluczowej kompetencji (Tworek, 2013). Powstaje zatem pytanie w jaki sposób mierzyć skuteczność elastyczności? Golden i Powell (2000, 2004) zaproponowali kompleksowe podejście w tym zakresie, które zaprezentowano na rys. 4.4.



Rysunek 4.4. Powiązania między wymiarami elastyczności i jej miernikami (Golden, Powell 2000)

Golden i Powel w późniejszych badaniach (2004) w odniesieniu do elastyczności organizacyjnej proponują poszerzenie przedstawionego podziału na rys.4.4 o kolejne dwa wymiary celowości i zogniskowania uwagi, które łączą się czterema miernikami: sprawnością, wszechstronnością,



proaktywnością i elastycznością wewnętrzną. Późniejsze badania Shahu i in. (2012), Kis i in. (2017³) kładą nacisk na poszerzenie typowego trójkąta (czas - koszt – jakość) o elastyczność. W interpretacji Kis i in. (2017) zgodnej z ideą utrzymania przepływów produkcyjnych elastyczność definiuje się jako: zdolność do utrzymywania przepływów produkcyjnych na mniej więcej stałym poziomie w przypadku wahań obciążenia. Bazuje ona przede wszystkim na elastyczności technologicznej/technicznej. Mamy w tym przypadku ukierunkowanie na możliwości technologiczne podtrzymania możliwości kontynuacji procesów w toku dzięki zastosowaniu np. modyfikacji mieszanki betonowej domieszkami.

Ponadto możliwe zastosowanie oceny wielokryterialnej do analizy elastyczności przedstawili (Lu i in., 2005) oraz (Sayers i in., 2003).

Według Stabryły (Stabryła, 2020) elastyczność można ocenić poprzez:

- wielkość efektów działania,
- wskaźnik funkcjonowania system np. trwałość, niezawodność.

Natomiast według Ostert-Pociecha ze współpracownikami jako mierniki elastyczności wskazuje (Osbert-Pociecha i in., 2008):

- Skuteczność oznaczająca ukierunkowanie na osiągnięcie odpowiednich celów
- Sprawność rozumiana jako racjonalne urzeczywistnienie celów.

Przy realizacji procesów budowlanych kompleksowym miernikiem elastyczności mogą być koszty realizacji poszczególnych etapów przedsięwzięcia oraz czas niezbędny na ich realizację.

Strategie przyjęte przy wdrażaniu elastyczności

Biorąc pod uwagę zasadnicze możliwości różnych strategii funkcjonowania przedsiębiorstwa budowlanego T. Witakowski (2000), Kisielnicki (2005):

- strategia agresywna (maxi-maxi),

³ Kiss I, Bachhofer S., Di Ciccio C., Mendling J. 2017. Towards a data-driven framework for measuring process performance, pobrano z Internetu: https://www.researchgate.net/publication/317235693_Towards_a_Data-Driven_Framework_for_Measuring_Process_Performance/figures?lo=1, dnia: 10.09.2024



- strategia konkurencyjna (mini-maxi),
- strategia konserwatywna (maxi-mini),
- strategia defensywna (mini-mini),

W związku z realizacją przedsięwzięć budowlanych zawężonych do procesu betonowania w obniżonej temperaturze w warunkach zmiennego otoczenia odpowiednią będzie strategia konserwatywna umożliwiająca ograniczenia zakłóceń związanych z nagłym i długotrwałym oddziaływaniem obniżonej temperatury. Jest to przypadek, gdy potencjał organizacji ocenić można jako bazujący na mocnych stronach, natomiast otoczenie generuje zagrożenia (Paślawski 2009).

Monitoring otoczenia i procesów w toku

Jak wynika z analizy podstawowych trendów w dziedzinie zarządzania podstawowym elementem jest wykorzystanie monitorowania otoczenia i procesów w toku w celu podejmowania odpowiednich działań w turbulentnym otoczeniu. Monitoring w czasie rzeczywistym jest niezbędnym narzędziem w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu do kontroli procesów w trakcie ich wykonywania oraz do kontroli stanu technicznego eksploatowanych obiektów. (Rao i in., 2022; Turner i in., 2021; Yin i in., 2019; P. Zhang i in., 2019; Zhong i in., 2011, 2018).

W budownictwie polskim prekursorem tego typu podejścia jest Witakowski (P. Witakowski & Pawluś, 2005; Piotr. Witakowski, 2003, 2009, 2011; Piotr. Witakowski & Instytut Techniki Budowlanej., 2010), którego działania od początku skoncentrowane były na budownictwie betonowym. w roku 2004 ukazała się instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej dotycząca systemu kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie⁴. Na przestrzeni dziewięciu lat (lata 2002-2011) z inicjatywy Profesora Piotra Witakowskiego zostało zorganizowanych 13 sympozjów, których tematyka poszerzała się stopniowo w odpowiedzi na dynamiczny rozwój dwóch dziedzin: zarówno zarządzania jakością, jak i teleinformatyki. Jednak zawsze przywiązywano duże znaczenie do zarządzania procesem betonowania jako kluczowego procesu w budownictwie. Na uwagę zasługują liczne praktyczne zastosowania, np. przy

⁴ Instrukcja ITB nr 395/2004 System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie, ITB, Warszawa



budowie mostu Świętokrzyskiego w Warszawie (Piotr. Witakowski, 2003) oraz budowa wirtualnego laboratorium (P. Witakowski & Pawluś, 2005).

Ponadto na uwagę zasługują prace zespołu kierowanego przez Wilde (Mariak i in., 2016; Mariak & Wilde, 2015; Wilde i in., 2017)(Kuryłowicz-Cudowska i in., 2017; Mariak i in., 2016). Szczególnie interesująca jest publikacja dotycząca monitorowania budowy konstrukcji mostowej, w której zastosowanie monitoringu temperatury pozwoliło określić przewidywaną wytrzymałość na ściskanie opartego na równaniu Arrheniusa uzyskano możliwość przyspieszenia robót.

Ponadto z punktu widzenia monitorowania w czasie rzeczywistym interesujący jest referat prezentowany na konferencji ISARC 2009 (Viljama i in., 2009), który dotyczy doświadczeń przy układaniu nawierzchni z betonu asfaltowego. Zaprezentowany prototypowy system monitoruje temperaturę masy asfaltowej przy wykorzystaniu czujników typowych (PT-100) i czujników podczerwieni (IR) oraz urządzeń GPRS i RFID. Podobną tematykę podjęli Jin, Zhand i Zhou oraz Zhao z zespołem (Jin i in., 2020; H. F. Zhang & Zhou, 2013; S. Zhao i in., 2023). Golparvar-Fard z zespołem, Han z zespołem oraz Lee z zespołem (Golparvar-Fard i in., 2009; K. Han i in., 2017; K. K. Han & Golparvar-Fard, 2015; Lee i in., 2009) przedstawili system zapewniający możliwość monitorowania procesu dojrzewania betonu oparty na czujnikach zintegrowanych z transponderami umożliwiającymi bezprzewodową transmisję danych.

Gajewski i Szabat (2005) opisali system symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji na przykładzie masywnych ścian zbiornika oczyszczalni ścieków. Głównym celem systemu było zapewnienie bezawaryjnego betonowania masywnej konstrukcji w warunkach zmiennej temperatury otoczenia. W celu zapobiegania problemom jakościowym do zaizolowania konstrukcji użyto folii bąbelkowej. Wang i Zhu (D. Wang & Zhu, 2011) przedstawili monitorowanie narastania wytrzymałości we wczesnej fazie dojrzewania betonu przez zastosowanie czujników opartych na przetwornikach impedancji.

W trakcie badań własnych związanych z realizacją niniejszej rozprawy doktorskiej prowadzone były prace związane z przebiegiem zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania betonu poprzez zastosowanie czujników opornościowych typu PT100 przewodowych i bezprzewodowych z urządzeniem do zbierania i przekazywania danych poprzez sieć



internetową oraz GSM. Zastosowanie monitoringu temperatur oraz wprowadzenie systemu podejmowania decyzji zapewniających wymaganą jakość pozwoliło na podjęcie odpowiednio wczesnej reakcji oraz uruchomienie elektronagrzewu, co przyczyniło się do zapewnienia odpowiedniej jakości finalnej wykonywanego elementów z betonu barytowego (Poznań-Garbary 2008). W systemie tym przyjęto za kryterium podejmowania decyzji ograniczenie gradientu termicznego w konstrukcji masywnej (grubość ścian i stropu w granicach 1,5-1,8 m).

4.3. Termodynamiczne zasady tworzenia struktury betonu

Ciepło hydratacji

Proces wiązania cementu jest typową reakcją egzotermiczną. Wydzielanie ciepła jest uzależnione od składu mineralnego cementu, jego klasy, dodatków (np. popiołu lub żużla). Znajomość ciepła hydratacji jest istotna przy betonowaniu w obniżonej temperaturze, gdyż dobór odpowiedniego składu mieszanki i technologii jej produkcji, transportu, układania i pielęgnacji (np. stosowanie cementów o wyższej zawartości klinkieru, podgrzewanie kruszyw i wody zarobowej) pozwalają na zapewnienie jakości tego procesu. Mimo, że proces hydratacji – dojrzewania mieszanki betonowej jest reakcją egzotermiczną związaną z wydzielaniem ciepła, to ilość wewnętrznego ciepła może nie być wystarczająca do zapewnienia prawidłowych warunków dojrzewania, a spadki temperatur otoczenia mogą w sposób istotny wyhamować hydratację lub w najgorszym przypadku spowodować zamarznięcie świeżego betonu i w konsekwencji jego uszkodzenie.

Betonowanie w obniżonych temperaturach jest związane z możliwością:

- wychłodzenia,
- nadmiernego wychłodzenia – zamarznięcia
- wystąpienia nieprawidłowego rozkładu temperatur- zbyt duże gradienty temperatury

Mając na uwadze powyższe stwierdzić należy, iż nie tylko zaprojektowanie odpowiedniej mieszanki jest najważniejsze, ale istotne jest zapewnienie stosownej do panujących warunków otoczenia pielęgnacji. Zadaniem pielęgnacji we wczesnym okresie jest nie tylko ochrona przed zamarznięciem ale przede wszystkim stworzenie takich warunków by mogła przebiegać



hydratacja co najmniej do osiągnięcia wytrzymałości mrozowej. Mimo iż hydratacja staje się samoistnym generatorem energii powstającej wewnątrz betonu to może być niewystarczająca. Jeżeli mieszanka betonowa została ułożona i proces hydratacji się rozpocznie to należy rozpocząć pielęgnację – zabezpieczyć dojrzewający element by przebiegała dalej bez zakłóceń. Podstawowe dane dotyczące ciepła hydratacji cementów powszechnego użytku można uzyskać od producentów⁵ oraz znaleźć w publikacjach specjalistycznych Baran i in. (2016).

Temperatura dojrzewania mieszanki betonowej jako główny parametr procesu

W literaturze znaleźć można bardzo dużą liczbą modeli matematycznych dojrzewającego betonu uwzględniających w różny sposób przebieg procesu tego wyjątkowo złożonego procesu termo-hygro-chemo-mechanicznego. Modele termodynamiczne zostały opracowane przez np. Azenha, Di Luzio i Cusatisa, Gawina i Teixeira'ę De Freitas z zespołami (Azenha i in., 2011; Di Luzio & Cusatis, 2013; Gawin i in., 2006, 2013; Teixeira De Freitas i in., 2013), mimo iż się różniły między sobą, to we wszystkich przypadkach wykazano, że jednym z najbardziej istotnych parametrów jest temperatura. Szczególnie dokładnej analizie trzeba poddać przebieg zmian temperatury w czasie dojrzewania – twardnienia mieszanki betonowej. Ponadto zaznaczyć należy, iż wdrożenie systemu monitorowania twardniejącego betonu umożliwi kontrole zmian termicznych a przez to dostarcza ważnych informacji pozwalających wykonawcy na właściwą pielęgnację w celu zapewnienia wysokiej jakości i trwałości wykonywanego elementu (Kuryłowicz-Cudowska i in., 2017). W przeprowadzonych badaniach w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej analizowano gradient termiczny w przekroju dojrzewających elementów betonowych (Karłowski i Paślawski 2008).

Opracowane modele zapewniają dobry wgląd na proces twardnienia betonu, ale z uwagi na swoją kompleksowość nie są odpowiednie do zastosowań inżynierskich. Według Kuryłowicz-Cudowskiej i współpracowników (Kuryłowicz-Cudowska i in., 2017) pomiary temperatury (oraz wydzielanego ciepła) w trakcie dojrzewania są głównym parametrem pomiarowym na

⁵ Co warto wiedzieć o cemencie? Heidelbergmaterials – pobrano z Internetu:
https://www.heidelbergmaterials.pl/sites/default/files/assets/document/a1_-_co_warto_wiedziec_o_cemencie.pdf dnia 10.09.2024



podstawie którego można tworzyć hipotezy co do przebiegu procesu betonowania w postaci modeli symulacyjnych.

W celu przeprowadzenia symulacji należałoby stworzyć równanie termodynamiczne dla młodego betonu lub przeprowadzić szereg badań w różnym zakresie temperatur otoczenia dla konkretnej receptury mieszanki betonowej. Dla wyznaczenia pól temperatury w twardniejącym betonie konieczna jest znajomość parametrów materiałowych. Niestety parametry te w większości nie są stałe w czasie i przestrzeni. Przebieg procesu hydratacji pod względem zmian temperatury zależy nie tylko od parametrów materiałowych, ale również od temperatury otoczenia. W związku z powyższym uznano, iż tworzenie bazy danych przypadków przebiegu zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania mieszanki betonowej wewnątrz elementu, jak również w jego otoczeniu będzie niezbędne do stworzenia modelu symulacyjnego niezbędnego do podejmowania decyzji przy betonowaniu w obniżonej temperaturze, a do symulacji procesów w dojrzewającym betonie użyto dostępnych gotowych pakietów oprogramowania bazujących na MES, np. Hacon⁶.

Termodynamiczne równania polowe opisujące stan młodego betonu można zapisać w postaci (Cervera i in., 2002; Kuryłowicz-Cudowska i in., 2017; Mariak i in., 2016)

$$C\dot{T} + \nabla Q_f = \dot{Q} \quad (4.1)$$

$$c\rho\dot{T} - \lambda\nabla \cdot (\nabla T) = Q_\infty \dot{\xi} \quad (4.2)$$

gdzie:

C – pojemność cieplna betonu [J/(m³·K)],

T – temperatura [K],

Q_f – strumień ciepła (prawo Fouriera) [W/m²],

Q – wewnętrzne źródło ciepła [W/m³],

c – ciepło właściwe betonu [J/(kg·K)],

ρ – gęstość betonu [kg/m³],

λ – przewodność cieplna [W/(m·K)],

Q_∞ – całkowite ciepło hydratacji [kJ/kg],

ξ – stopień hydratacji [-]

⁶ HACON – A program for simulation of hardening concrete, pobrano z Internetu:

<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=HACON+AND+simulation>, dnia 09.11.2024



Wynikiem reakcji wiązania cementu jest przejście zaczynu cementowego od stanu plastycznego do sztywnego, czemu towarzyszy ciągłe wydzielanie ciepła. Proces ten jest szczególnie istotny w pierwszych dniach twardnienia betonu. Niejednorodne i niestacjonarne pole temperatury twardniejącego betonu kształtują się w zależności od rodzaju i ilości cementu, przewodności, pojemności cieplnej komponentów betonu, intensywności wymiany ciepła z otoczeniem, temperatury początkowej mieszanki betonowej oraz temperatury otoczenia. Istotny wpływ mają także wymiary i proporcje geometryczne przedmiotowego elementu oraz sąsiedztwo już wykonanych elementów. W tym celu do szacowania efektów procesu dojrzewania betonu w elemencie wykorzystano program HACON, który został wykorzystany w opisanym przykładzie betonowania płyty betonowej.

4.4. Wpływ otoczenia – oddziaływanie niekorzystnych warunków pogodowych

Istotną cechą budownictwa jest zależność od czynników atmosferycznych. Większość robót stanu surowego wykonywanych jest na otwartej przestrzeni i trwają zarówno wiosną, latem, jesienią oraz zimą. Niekorzystne warunki atmosferyczne takie jak: intensywne opady deszczu, śniegu i gradu, silny wiatr, wysokie temperatury mogą być krótkotrwałe, incydentalne i powodujące w rezultacie nieznaczne przerwy w realizacji prac oraz długotrwałe powodujące znaczące przestoje w prowadzeniu robót budowlanych. Długotrwałe są źródłem ryzyka harmonogramowego i stanowią zagrożenie w dotrzymaniu terminu przyjętego w kontrakcie. Długotrwałe przerwy mogą być wynikiem zaistnienia zjawisk ekstremalnych, które mogą spowodować katastrofalne skutki (np. zniszczenie deskowań, zbrojenia i sprzętu znajdującego się na budowie. Dla robót betonowych zagrożeniem są krótkotrwałe niekorzystne warunki atmosferyczne w postaci opadów, przymrozków mogących powodować uszkodzenia powierzchniowe wykonanych elementów powierzchni betonowych. Długotrwałe spadki temperatur poniżej -15°C z reguły uniemożliwiają prowadzenie robót betonowych, ale nagłe spadki temperatur w poniżej 0°C w ciągu jednej doby mogą być destruktywne dla świeżo wykonanych – dojrzewających elementów betonowych. (Bobrowicz J. & Bajorek G., 2006; Józwiak i in., 1998). Z punktu widzenia niniejszej rozprawy kluczowa jest sytuacja pogodowa, kiedy w momencie układania mieszanki betonowej warunki realizacji są sprzyjające, podczas gdy w najbliższym czasie (z reguły podczas nocy i nad ranem) temperatura spada. Spadki te



mogą być drastyczne (powyżej 10°C na dobę) z uwagi na postępujące szybko zmiany klimatyczne (Halicki 2024).

Sezonowość robót budowlanych

Jedną z cech odróżniających budownictwo od wielu pozostałych branż gospodarki jest sezonowość klimatyczna Goryński (1976) rozumiana nie tylko przyczyna wahań wydajności przy realizacji robót budowlanych. W tradycyjnym ujęciu w warunkach obniżonej temperatury (poniżej +10°C – warunki obniżonej temperatury, następny próg poniżej +5°C – warunki zimowe) należy spełnić dodatkowe wymagania, a w temperaturze ujemnej (np. – 15°C) robót budowlanych nie powinno się w ogóle wykonywać. Taki stan rzeczy ma wpływ nie tylko na gospodarkę, ale również na wiele innych kwestii pośrednio z nią związanych. Sezonowość branży budowlanej ma kolosalne znaczenie dla inwestycji infrastrukturalnych takich jak na przykład budowa dróg. Inwestycje te z założenia można realizować tylko i wyłącznie w okresie od wiosny i jesieni, ale już na pewno nie w okresie zimowym, gdy średnie temperatury są niskie, występują inne niekorzystne warunki pogodowe (opady śniegu i gradu, oblodzenie, itp.), w których prowadzenie robót budowlanych napotyka na liczne utrudnienia, przy czym niepewność i ryzyko są znacznie zwiększone.

W związku z powyższym w inwestycjach budowlanych występują często opóźnienia, które pojawiają się szczególnie wówczas, kiedy pojawiają się ekstremalne warunki pogodowe (gwałtowne znaczne spadki temperatury głównie poniżej 0°C). Często zdarza się tak, że w okresie wiosennym oraz jesiennym zdarzają się dni z ujemną temperaturą, co analizował szczegółowo Osetek i in. (2021), stwierdzając różnice pomiędzy temperaturą maksymalną i minimalną dobową w Katowicach w miesiącu lutym 2018 roku osiągały ponad 17°C (rys. 29 str 69). Naturalnie poza spadkiem temperatury należy także uwzględnić inne niekorzystne zjawiska pogodowe (np. ulewne opady deszczu), które dla wielu inwestycji budowlanych i drogowych mają bardzo negatywny wpływ na ich przebieg. To jak duże znaczenie mają pory roku dla branży budowlanej można zaobserwować, kiedy śledząc przebieg poszczególnych procesów uzależnionych od otoczenia (roboty tynkarskie, roboty betonowe, montaż konstrukcji itp.). Wpływem warunków klimatycznych na wydajność produkcji budowlanej

zajmował się także Paślawski⁷, który opierając się na analizie dobowych zjawisk pogodowych na przestrzeni reprezentacyjnego 30-lecia stwierdził wahania miesięcznych współczynników sezonowości w granicach do 40-50% (w zależności od kryteriów podejmowania decyzji). W okresie zimowym tradycyjnie w harmonogramach uwzględniano przerwę od grudnia do marca w realizacji robót betonowych ze względu na niekorzystne warunki pogodowe (np. harmonogram budowy POZNAN BY-PASS A2), jednak także w przypadku tej właśnie inwestycji podjęto wykonanie robót związanych z obiektami wykonywanymi z betonu cementowego (wiadukty, most, ze względu na opóźnienie inwestycji spowodowane problemami przy przejściu gruntów pod budowę⁸).

Wpływ sezonowości w branży budowlanej widoczny jest również w przypadku mniejszych inwestycji np. w zakresie budownictwa mieszkaniowego jednorodzinne. Z uwagi na odnotowane w ostatnich latach zmiany klimatyczne rośnie presja do podejmowania robót z uwagi na powszechnie obserwowane ograniczenie opadów śniegu itp., jednak właśnie te zmiany klimatu powodują jednocześnie eksterminację zjawisk pogodowych, czego przejawem są właśnie nagłe spadki temperatury otoczenia czy błyskawiczne powodzie (Halicki 2024).

Sezonowość w przedsiębiorstwach budowlanych wiąże się nie tylko z ograniczoną wydajnością produkcji budowlanej, ale generuje także problemy w generowaniu dochodów (zysku niezbędnego do funkcjonowania przedsiębiorstw budowlanych) oraz fluktuacji kadr (co oznaczać może konieczność zwolnienia lub udzielenia urlopu bezpłatnego ze względu na kryzys zamówień – z reguły w okresie zimowym), co omówiono poniżej.

Sezonowość dochodowości przedsiębiorstw budowlanych

Zaprzestanie robót bardzo mocno utrudnia funkcjonowanie firm budowlanych powoduje problemy z utrzymaniem stałej kadry oraz przede wszystkim brak ciągłości uzyskiwanych dochodów. Sezonowość w branży budowlanej organizacyjnie niesie ze sobą ogromną niepewność towarzysząca każdej zimie i oczekiwanie na jej zakończenie. Ryzyko braku ciągłości działalności gospodarczej przedsiębiorstw budowlanych w okresie zimowym wymaga

⁷ Paślawski J. 1984. Badanie i ocena oddziaływań klimatycznych na wydajność produkcji budowlanej. Praca Dyplomowa Magisterska – promotor Prof. Józef Jasiczak, Politechnika Poznańska, Poznań

⁸ Harmonogram budowy 2000, POZNAN BY-PASS A2, Gdańsk



albo zagwarantowania robót niezależnych od pogody (np. roboty wykończeniowe) albo udzielenia urlopu bezpłatnego pracownikom.

Sezonowość na rynku pracowniczym oraz problemy w dziedzinie BHP

Pracownicy w branży budowlanej są wręcz zmuszeni brać urlopy w okresie zimowym, ponieważ w letnim zapotrzebowanie na roboty budowlane jest ekstremalnie wysokie, że często przedsiębiorcy nie chcą udzielać urlopów. Oczywiście pomocne mogą być innowacyjne rozwiązania technologiczne – np. technologia WINTER PLUS umożliwiającą wykonywanie ocieplenia w okresie jesienno-zimowych i zimowo-wiosennym⁹. Należy jednak podkreślić, że warunkiem powodzenia w zastosowaniu tej technologii jest zapewnienie temperatury otoczenia powyżej 0°C w ciągu 8 godzin od momentu aplikacji zapraw klejowych i tynków w tej technologii. Wymaga się także, aby podłoże charakteryzowało się temperaturą powyżej 0°C w momencie nakładania materiałów. Naturalnie zalecić można stosowanie plandek ochronnych na rusztowaniach w celu ochrony przed działaniem niekorzystnych warunków atmosferycznych (niska temperatura, opady śniegu, gradu czy deszczu oraz oddziaływanie wiatru).

Innym przykładem zastosowania innowacyjnych rozwiązań umożliwiających przełamanie barier technologicznych było zastosowanie domieszki FS-1 podczas budowy obiektów autostradowych przy realizacji kontaktu POZNAN BY-PASS A2, co umożliwiło betonowanie w okresie tradycyjnie uznanym za niesprzyjający.

Z punktu widzenia problemów bezpieczeństwa pracy należy zasygnalizować problem zwiększonej wypadkowości na skutek wpływu niekorzystnych warunków atmosferycznych (zwłaszcza obniżonej temperatury i innych zjawisk towarzyszących – np. wiatr) – (Hoła i in., 2022; Szer i in., 2017, 2021). Pomimo różnych rozwiązań innowacyjnych oraz zmian klimatycznych zmierzających w kierunku wzrostu temperatury średniej rocznej związku, co pozornie może oznaczać pozytywne zmiany, to jednak należy uwzględnić także zwiększającą się dynamikę zmian czynników atmosferycznych oraz rosnące problemy w sprawdzalności prognoz pogody, co uzasadnia kluczowy problem podjęty w tej rozprawie doktorskiej.

⁹ WINTER+ Linia produktów do wykonywania ociepleń w okresie jesienno-zimowym, pobrano z Internetu: [Oferta zimowa marki quick-mix \(sievert.pl\)](https://www.quick-mix.com.pl/oferta-zimowa), dnia 10.09.2024



4.5. Możliwości wykorzystania eksploracji danych w systemie doradczym

Zgodnie z rozwojem podejścia do zarządzania procesami/przedsięwzięciami budowlanymi w warunkach niepewności i ryzyka (Perminova i in. 2008, Kerzner 2015, Shahu i in. 2012) należy poza zastosowaniem elastyczności i podejściem proaktywnym zastosować uczenie się z przykładów. Mając na uwadze konieczność wspomagania decyzji menadżerskich na bazie systemu COLCON postulat systematycznego doskonalenia na bazie uczenia się z przykładów spełnia pakiet oprogramowania Rapid Miner (Hofmann i in., 2013), który został zastosowany do kolekcjonowania kolejnych doświadczeń praktycznych przy realizacji robót betonowych w warunkach zagrożenia nagłym spadkiem temperatury otoczenia.

Wybór oprogramowania do analizy danych/Data Mining

Istnieje wiele gotowych narzędzi do eksploracji i analizy danych. Na rynku jest dostępnych wiele narzędzi płatnych i bezpłatnych najczęściej o ograniczonej liczbie zmiennych. Poniżej przedstawione zostały krótkie opisy charakterystyki popularnych narzędzi, które są często wykorzystywane w eksploracji danych i wymienione w artykułach branżowych.

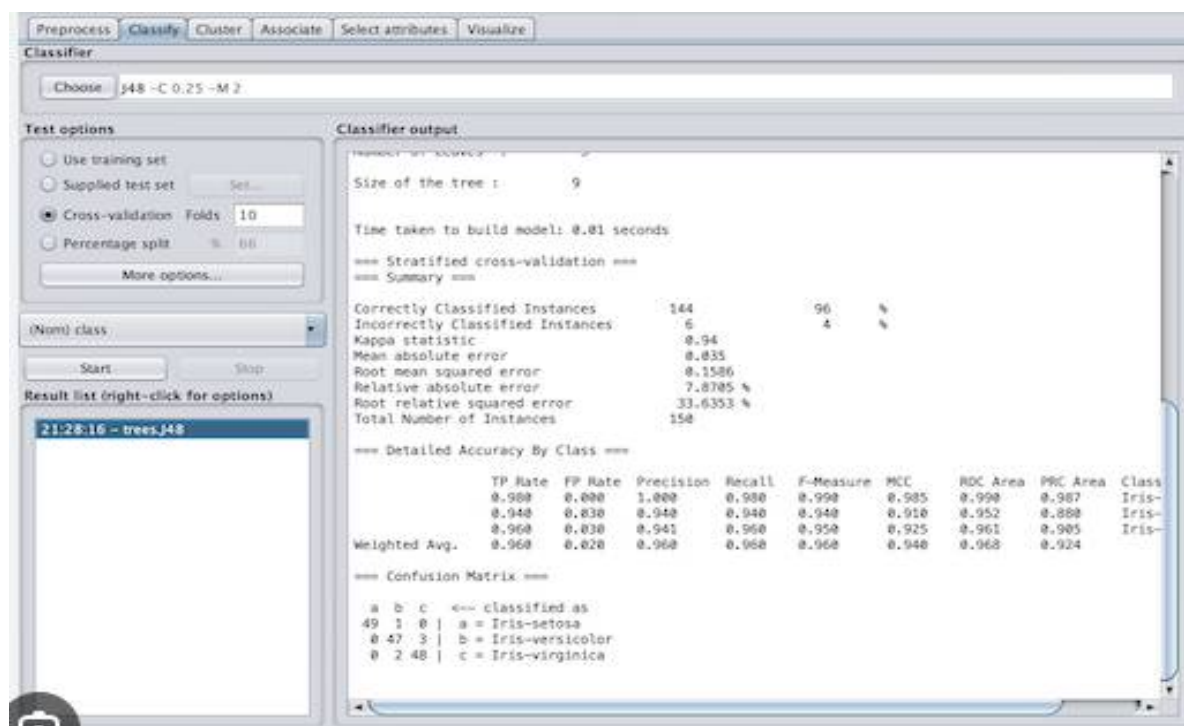
Weka

Weka (ang. Waikato Environment for Knowledge Analysis) to oprogramowanie stworzone przez uniwersytet Waikato udostępniające nie tylko graficzny interfejs użytkownika, ale również umożliwiające wykonywanie komend z linii poleceń oraz użycie we własnej aplikacji w formie biblioteki. Jest to rozwiązanie popularne i nagradzane za swoją użyteczność.

Program Weka przeznaczony jest dla doświadczonych użytkowników. Zapoznanie się z programem zdecydowanie ułatwi bogata baza danych przykładów dostępnych na stronie projektu, czy też dokumentacja. Istnieje również książka o eksploracji danych wykorzystująca w przykładach Wekę, ale nie jest ona dostępna w Internecie. Nie zmienia to jednak faktu, iż obsługa Weki wymaga sporo wiedzy z zakresu data mining oraz z samej konstrukcji tego oprogramowania.

Weka umożliwia pobranie danych z plików, czy też baz danych, wstępną ich obróbkę (np. normalizacja, dyskretyzacja), a następnie wykorzystanie ich do uczenia (np. algorytmy klasyfikacji, analizę skupień itd.). Za tą część odpowiedzialny jest moduł Weki o nazwie

Explorer. Experimenter ułatwia porównywanie efektywność działania różnego rodzaju sposobów nauki. Natomiast Knowledge Flow umożliwia zautomatyzowane przetwarzania danych z wielu źródeł i na różne sposoby poprzez skonstruowanie grafu opisującego przepływ danych.



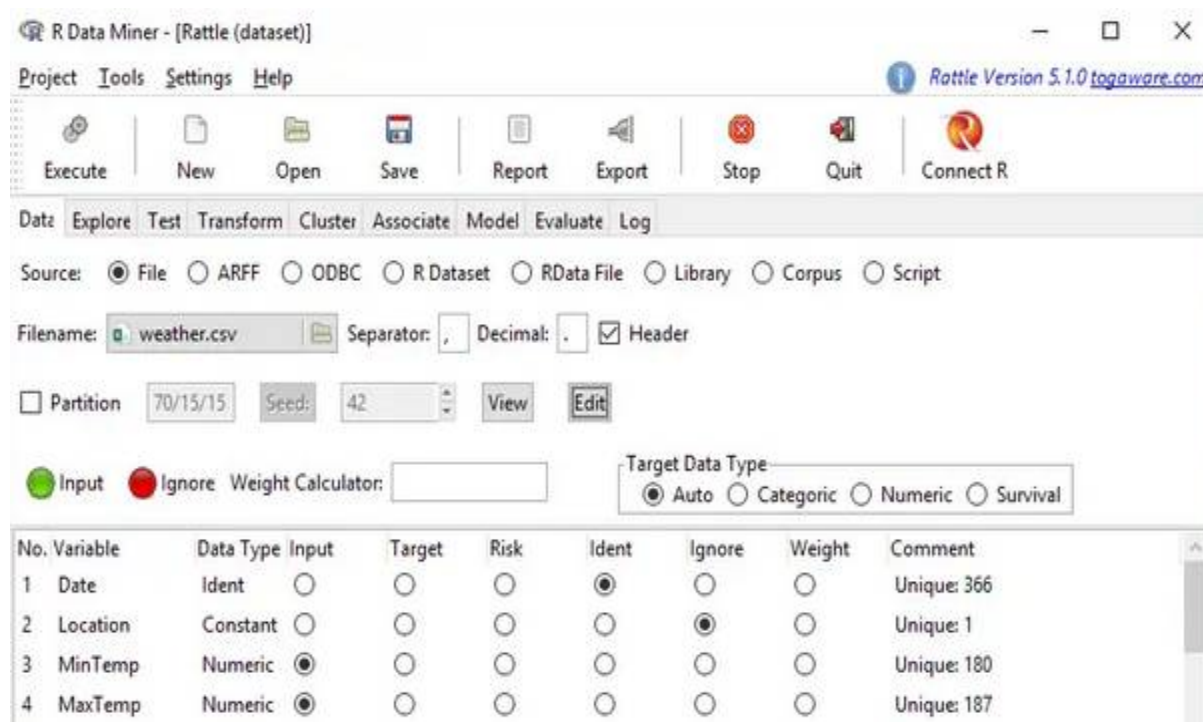
Rysunek 4.5. Widok okna dialogowego programu WEKA

Rattle

Rattle (ang. R Analytic Tool To Learn Easily) to wieloplatformowy program napisany z wykorzystaniem języka i środowiska R oparty o bibliotekę graficzną GTK 2, jest stosunkowo prosty w użyciu i nadaje się dla początkujących użytkowników. Udostępnia następujące techniki z zakresu modelowania:

- asocjacje z użyciem apriori (arules),
- klasyfikację z użyciem drzew decyzyjnych (rpart),
- uogólnione modele liniowe (glm),
- boosting (gbm),
- losowe lasy (randomForest).

Rattle jest wykorzystywany podczas codziennej pracy przez jeden z największych australijskich zespołów zajmujących się eksploracją danych, w Australijskim Urzędzie Skarbowym. W porównaniu do Weki, czy też RapidMinera, wydaje się być naprawdę prosty i stosunkowo ubogi w ilość zaimplementowanych algorytmów i funkcji.



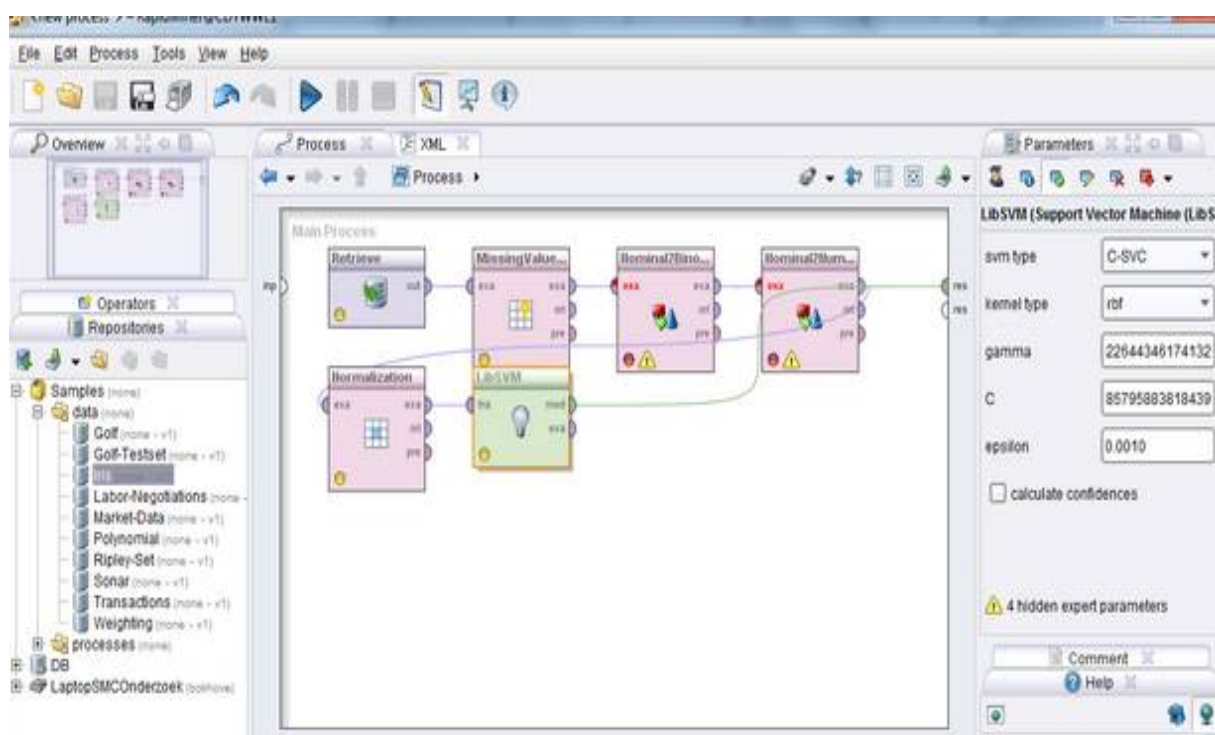
Rysunek 4.6. Widok okna dialogowego programu RATTLE

Zastosowanie oprogramowania Rapid Miner - Community Edition

RapidMiner Community Edition (znany kiedyś jako YALE) wykorzystuje m.in. wspomniane wcześniej oprogramowanie o nazwie Weka (nie jest jednak ono konieczne do poprawnego działania). Udostępnia ponad 500 operatorów (z czego 100 z aplikacji Weka) dla wszystkich głównych procedur maszynowego uczenia, włączając w to obsługę wejścia, wyjścia, przetwarzania danych oraz wizualizację. Podobnie, jak Weka, posiada on GUI oraz umożliwia wykonywanie komend z poziomu linii poleceń, udostępniając jednocześnie środowisko java API. Dodatkowo posiada własny system wtyczek.

RapidMiner zdecydowanie wygrywa z Weką i Rattle pod względem interfejsu użytkownika. Przyjazne ikony, dużo opisów, wszechobecne kreatory i wbudowany tutorial nie pozwalają

użytkownikowi zagubić się w bogactwie opcji. W razie problemów pomocne okazać się może forum projektu na którym odpowiedzi udzielają sami jego twórcy oraz wiki, które jest niestety mocno niekompletne. Sam program dodatkowo udostępnia dwa tryby działania - eksperta i początkującego. Jednakże bez względu na jakość wykonania interfejsu wymaga on przede wszystkim wiedzy na temat samego zagadnienia eksploracji danych. Oczywiście, RapidMiner pozwala na wszystko to, co Weka oraz na jeszcze więcej. Dzięki zastosowaniu XML-a i wygodnego edytora bez problemu można tworzyć łańcuchy i drzewa operatorów, źródeł danych i innych "bloków" składających się na program wykonywany przez RapidMinera.



Rysunek 4.7. Widok okna dialogowego programu RapidMiner

Ogólną charakterystykę oprogramowania do eksploracji danych przedstawili Jović i in. (2014). Z charakterystyki tej wynika, że największą popularnością na rynku cieszą się:

- RapidMiner,
- R,
- WEKA.

Ogólną charakterystykę tych programów zwięźle w tabelicy 4.2 (na podstawie Jović i in. (2014)).

Tabela 4.2. Ogólna charakterystyka oprogramowania służącego do eksploracji danych



Charakterystyka	<u>Rapidminer</u>	R	Weka	<u>Organge</u>	KNIME	<u>Scikit-learn</u>
Producent	<u>RapidMiner</u>	Globalny - <u>worldwide</u>	<u>Univeristy</u> of <u>Waikato</u> ,	University of Lubljana	KNIME.com AG	Wiele podmiotów INRA, Google
Kraj pochodzenia	Niemcy	Globalny	Nowa Zelandia	Słowenia	Szwajcaria	Globalny
Główne zastosowanie	Ogólna eksploracja danych	Obliczenia naukowe i statystyczne	Ogólna eksploracja danych	Ogólna eksploracja danych	Ogólna eksploracja danych	Uczenie maszynowe
Ilość użytkowników	Duża (~200 000)	Bardzo duża (~2000000)	Duża	Średnia	Średnia (~15000)	Średnia

Na podstawie tej informacji zawartych w tabelicy 4.2, analizy porównawczej przeprowadzonej przez Moghimipour & Ebrahimpour (2014) podjęto decyzję w wykorzystaniu w obliczeniach w niniejszej rozprawie programu RapidMiner. Jego zastosowanie do obliczeń opisano szczegółowo w rozdziale 5.

4.6. Przegląd współczesnych metod monitorowania procesu dojrzewania betonu

W Polsce jak i na świecie istnieje wiele urządzeń służących do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu np.(Kiernożycki, 2003) (Czkwianianc 2002), (Godycki-Ćwirko Kiernożycki 2000), (Witakowski 2002), (Witakowski 2003). Na szczególną uwagę zasługuje skomputeryzowany system pomiaru temperatury SPT-GSM-GPS, opracowany i wykorzystywany przez P. Witakowskiego w Zakładzie Betonu ITB. System może działać zarówno w trybie on-line, jak i off-line umożliwiającym prowadzenie pomiarów w sposób ciągły. Moduł pomiarowy składa się z sondy, rejestratora, modemu GSM i odbiornika GPS. Wyniki z wykonanych pomiarów przekazywane są poprzez sieć GSM do komputera jednostki badawczej, odpowiadającej za monitorowanie robót budowlanych. Dzięki temu możliwe jest stałe monitorowanie temperatury, oraz prowadzenie badań na wielu budowach jednocześnie, teoretycznie niezależnie gdzie się one znajdują. Dodatkową zaletą systemu jest możliwość instalacji sondy w dowolnym czasie w praktycznie każdym miejscu konstrukcji i wyjęcia w dowolnym czasie celem użycia w innym miejscu, oraz niezależność od panujących warunków atmosferycznych jak opady deszczu czy śniegu. System sond ma ograniczenia związane z jego



instalacją oraz jest podatny na uszkodzenia natomiast zaletą jest możliwe jego wielokrotne wykorzystywanie.

System ten był wykorzystywany do monitorowania wielu bardzo ważnych konstrukcji mostowych, między innymi przy Moście Świętokrzyskim, Siekierkowskim oraz Tunelu Wisłostrady w Warszawie. Wdrożony przez Zakład Betonu ITB system zdalnego monitorowania konstrukcji, stanowi bardzo ważny czynnik służący zapobieganiu uszkodzeniom konstrukcji podczas betonowania i dojrzewania głównie elementów masywnych.

Czkwianianc i inni, Pawica, Maćkowiak, Saferna (2002) do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu wykorzystują półprzewodnikowe czujniki typ LM35D firmy National Semiconductor. Natomiast Gotycki-Ćwirko, Kiernożycki, (Wojdak 2000) do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu wykorzystują platynowe czujniki rezystancyjne podłączone do zestawu pomiarowego. Technika pomiaru dla obydwu przypadków polega na umieszczeniu czujników wewnątrz elementu, jeszcze przed jego betonowaniem. Po zakończeniu procesu betonowania – w zakresie układania mieszanki betonowej rozpoczynany jest pomiar zmian temperatury. W niektórych krajach np. w Niemczech wg eurokodu wymaga się rejestracji pomiaru temperatury dojrzewającego betonu

Większość obecnie stosowanych w Polsce np. Czkwianianc Pawica, Maćkowiak, Saferna (2002) rozwiązań technicznych dotyczących pomiaru temperatury opiera się na tej samej zasadzie, czyli umieszczeniu jeszcze przed betonowaniem czujnika termicznego lub termopary we wcześniej wybranym miejscu konstrukcji. Pomiar temperatury przeprowadzany jest przy wykorzystaniu zestawu pomiarowego np. UPM 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik, SmartRock oraz innych o podobnej zasadzie działania przy wykorzystaniu połączeń przewodowych lub bezprzewodowych.

Monitoring procesu dojrzewania betonu prowadzą także przedsiębiorstwa zajmujące się dostarczaniem deskowań systemowych (DOKA czy PERI) – np. PERI InSite Construction¹⁰

¹⁰ PERI InSite Construction – System gromadzenia danych, pobrano z Internetu:
<file:///C:/Users/JP/Downloads/peri-insite-construction-system-gromadzenia-danych-dokumentacja-technicznoruchowa.pdf> dnia 15.09.2024

Rozdział 5. System doradczy COLCON

5.1. Idea systemu COLCON

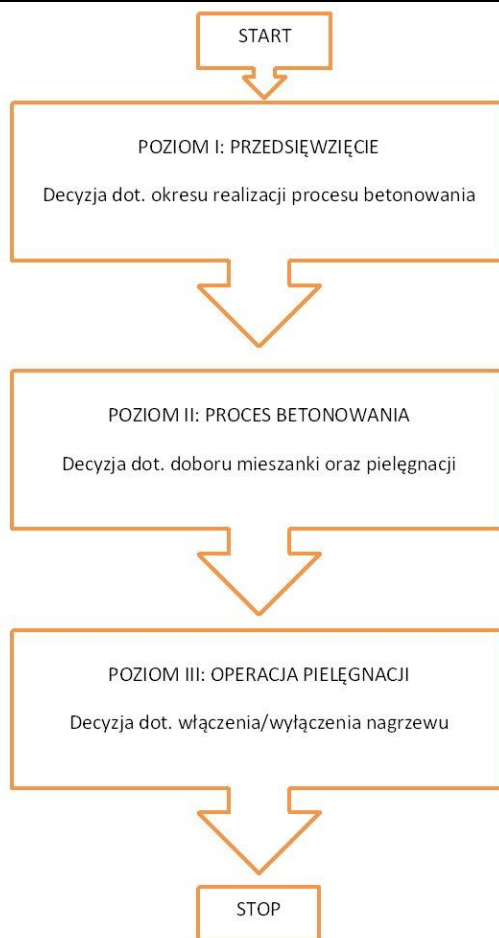
Celem systemu COLCON jest minimalizacja poziomu ryzyka realizacji procesów związanych z układaniem mieszanki betonowej na zewnątrz przy ograniczeniu możliwości zabezpieczenia/ostłonięcia przed wpływem otoczenia - w warunkach zależnych od oddziaływania czynników zewnętrznych takich jak spadek temperatury poniżej 0°C. Należy podkreślić, że system ten dedykowany jest do sytuacji, kiedy w okresie betonowania temperatura otoczenia odpowiada wymaganiom, jednakże jest możliwe nagłe obniżenie temperatury w granicach kilkunastu stopni Celsjusza w najbliższych godzinach (problem typowy w okresie jesienno-zimowym i zimowo-wiosennym przymrozki).

System ideowo opiera się na działaniu na 3 poziomach zarządzania. Decyzje dotyczą kolejno coraz bardziej szczegółowych problemów związanych z realizacją procesu betonowania w opisanych wyżej warunkach. Poniżej przedstawiono charakterystykę tych trzech poziomów zarządzania, na których podejmowane są kolejno decyzje. Następnie przedstawiono etapowanie decyzji – typowe rozwiązanie przy zastosowaniu podejścia elastycznego. Przedstawione poziomy i etapy tworzą jedną wspólną strukturę, jednak istotna różnica polega na wielokrotnym powtarzaniu decyzji na poziomie 3 (dotyczącym zapewnienia jakości procesu na podstawie monitoringu otoczenia i procesów zachodzących w betonie w początkowym okresie dojrzewania).

Proponowany system doradczy COLCON uwzględnia 3 poziomy podejmowania decyzji:

- **POZIOM I:** Przedsięwzięcie – np. budowa stacji paliw z betonową płytą szczelną;
- **POZIOM II:** Proces betonowania – decyzje technologiczne dotyczące doboru receptury mieszanki betonowej i metod pielęgnacji
- **POZIOM III:** Operacja pielęgnacji, zapewniająca prawidłowe dojrzewanie betonu w elemencie wstawionym na oddziaływanie zmiennego otoczenia.

Ideę trzypoziomowego podejścia w programie COLCON ilustruje rys. 5.1.



Rys. 5.1. Idea systemu COLCON – 3 poziomy zarządzania

Elastyczne podejście w systemie COLCON realizowane jest poprzez wieloetapowy proces decyzyjny, który przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Idea wieloetapowego procesu decyzyjnego w systemie COLCON



Zgodnie z rys. 5.2. pierwsza decyzja dotycząca planowania w harmonogramie ogólnym, realizowana jest na **etapie 1**. Dotyczy ona wyboru okresu realizacji procesu betonowania. Kolejna decyzja na **etapie 2** związana jest z doborem składu mieszanki betonowej oraz metod pielęgnacji dojrzewającego betonu. Następnie **w etapie 3** zapada pierwsza i następne decyzje **w etapach (3 + i)** dotyczące uniknięcia zagrożeń podczas dojrzewania betonu. Pętla decyzyjna kończy się na **etapie 3 + n**, przy czym liczba n wynika z ostatniej decyzji, kiedy gwarantowane będzie osiągnięcie poziomu wytrzymałości krytycznej – odporności mrozowej.

Zgodnie z podstawami teoretycznymi zawartymi w rozdziale 4 należy podkreślić, że wykorzystanie elastyczności technologicznej czynnej (adaptacyjność) i biernej (odporność) umożliwia zapewnienie osiągnięcia prawidłowej dynamiki procesu dojrzewania betonu pomimo utrudnień. Praktyczne zastosowanie idei elastyczności podczas realizacji procesów budowlanych umożliwia dostosowanie do zmiennych warunków realizacji procesów budowlanych poprzez stworzenie różnych opcji technologicznych - np. modyfikacje betonu domieszkami/dodatkami. Elastyczność technologiczna będąca podstawą systemu oraz procesu betonowania opiera się na stosowaniu domieszek i dodatków do betonu oraz stosowaniu dodatkowych urządzeń (np. elektronagrzew), co zapewnia odporność na szkodliwe działanie obniżonej temperatury przy założeniu nagłego jej obniżenia.

Monitoring otoczenia i procesów w toku umożliwia potwierdzenie prawidłowości przebiegu procesów oraz podjęcie dodatkowych decyzji (np. włączenie elektronagrzewu) w przypadku istotnego ryzyka zagrożenia powstaniem szkód mrozowych (nagły spadek temperatury elementu).

Monitoring oparty jest na pomiarach temperatury otoczenia i dojrzewającego betonu – temperatura jest zmienną wiodącą i pozwala na szacowanie przyrostów wytrzymałości na ściskanie w przedmiotowym elemencie.

Wpływ niekorzystnych warunków atmosferycznych na procesy budowlane przejawia się w spadającej wydajności procesów budowlanych np. w okresie zimowym. Najprostszym rozwiązaniem w tych warunkach jest wstrzymanie robót. Jednakże wobec presji inwestorów oraz rozwoju technologicznego (np. domieszki nowej generacji oraz dodatki PCM czy mikrosfer polimerowych Osetek i in. (2021)) często wykonawca często podejmuje decyzje o



betonowaniu licząc, że uda mu się zapewnić odpowiednią jakość robót betonowych. System COLCON służy do wsparcia decyzji menadżerskich w okresie zagrożenia nagłym spadkiem temperatury.

Zastosowanie programu RapidMiner miało na celu gromadzenie wiedzy z przykładów oraz wspomaganie decyzji technologicznych w sytuacji zagrożenia jakości robót betonowych ze względu na nagły spadek temperatury otoczenia.

Celem systemu COLCON jest minimalizacja poziomu ryzyka realizacji procesów związanych z układaniem mieszanki betonowej na zewnątrz przy ograniczeniu możliwości zabezpieczenia/osłonięcia przed wpływem otoczenia - w warunkach zależnych od oddziaływania czynników zewnętrznych takich, jak spadek temperatury poniżej 0°C.

Wielopoziomowe podejście przy podejmowaniu decyzji technologicznych na trzech poziomach:

- **Poziom I:** planowanie procesu betonowania przy uwzględnieniu danych klimatycznych,
- **Poziom II:** dobór odpowiedniej modyfikacji betonu w oparciu o stan aktualny otoczenia i prognozę przed betonowaniem (elastyczność bierna – odporność),
- **Poziom III** :- monitorowanie procesu dojrzewania betonu, sterowanie matą grzejącą w deskowaniu na podstawie symulacji procesu dojrzewania betonu w elemencie w oparciu o dane z monitoringu z uwzględnieniem prognozy (ewentualne uruchomienie – w przypadku stwierdzenia ryzyka uszkodzenia betonu w dojrzewającym elemencie/zagrożenia – podjęcie decyzji o uruchomieniu taktyki elastyczności czynnej - nagrzewu)

Wykorzystanie elastyczności technologicznej czynnej (adaptacyjność) i biernej (odporność) umożliwi zapewnienie jakości procesu betonowania pomimo utrudnień.

5.2. Opis poziomu I – wybór okresu realizacji robót betonowych

Podjęcie decyzji w ramach poziomu I ma na celu zaplanowanie robót betonowych w harmonogramie ogólnym. Planując roboty betonowe w warunkach krajowych przyjęto, że:

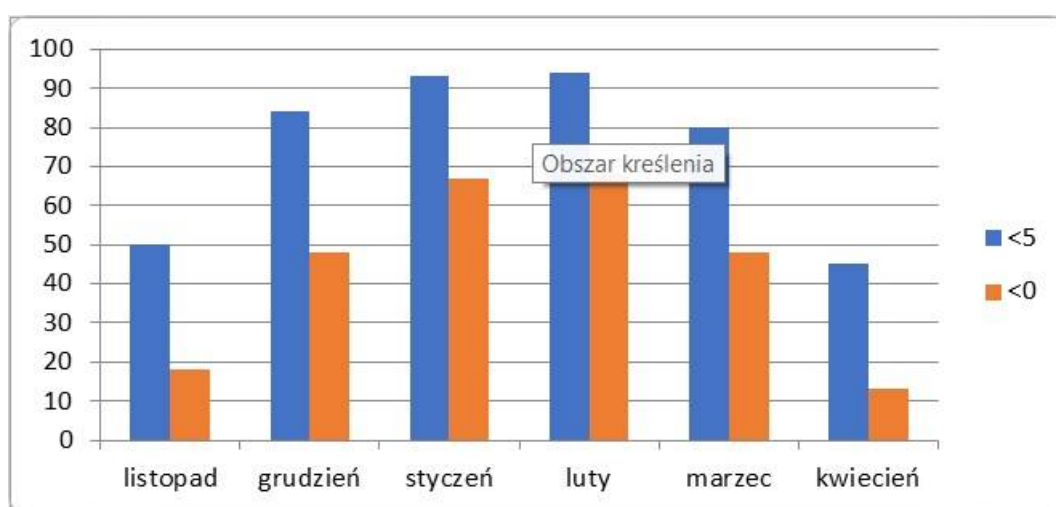
- w okresie od 1 maja do 30 września – roboty betonowe mogą być realizowane bez większych zakłóceń;
- natomiast w okresie od 1 października do 30 kwietnia - możliwe są zakłócenia polegające na nagłym spadku temperatury (zwłaszcza w okresie nocnym – typowe przymrozki) oraz mogą wystąpić liczne przedziały czasowe, w których realizacja nie będzie możliwa oraz dla prawidłowego przebiegu procesu betonowania będą niezbędne modyfikacje mieszanki betonowej oraz użycie dodatkowych modyfikatorów betonu w postaci PCM (lub innych) oraz urządzenia w postaci np. elektronagrzewu lub stosowanie deskowań specjalnych z opcją nagrzewu. Z uwagi na zmiany klimatyczne (ograniczenie okresu zimy meteorologicznej) trudno jest jednoznacznie wskazać w tym okresie newralgiczne okresy roku, w których takie zagrożenie występuje. Analizując pory roku z punktu widzenia okresu wegetacyjnego opracowany przez RomeraKaczorowska (1986) (co przedstawia tablica 5.1) można wskazać dwa takie okresy: przedwiośnie i przedzimie.

Tabl. 5.1. Charakterystyka pór roku [źródło:, (Kaczorowska, 1986) na podstawie Romera]

Pory roku	Temperatura - minimalny próg średniej temperatury dobowej [°C]	Temperatura - maksymalny próg średniej temperatury dobowej [°C]
Zima	Poniżej 0	
Przedwiośnie	0	5
Wiosna	5	15
Lato		Powyżej 15
Jesień	5	15
Przedzimie	0	5
Zima	Poniżej 0	

Zasadniczym celem podejmowania decyzji na tym etapie jest określenie najbardziej sprzyjającego okresu realizacji danego procesu budowlanego, bądź – w przypadku – znajomości czynników niesprzyjających (utrudniających) podjęcie działań ograniczających ich oddziaływanie. W planowaniu robót betonowych w harmonogramie ogólnym można uwzględnić współczynniki sezonowości danych robót budowlanych uwzględniając wpływ warunków atmosferycznych na realizację robót w danym okresie. Typowym okresem do tego typu analiz jest miesiąc (Rucki 1957 , Paślawski 1984¹¹, Ballestros-Perez i in. 2015]

W celu wykazania, jak istotnym elementem jest temperatura przy realizacji robót betonowych w warunkach krajowych przedstawiono zestawienie występowania temperatury poniżej 0°C oraz poniżej +5°C w okresie od listopada do kwietnia (na podstawie danych z lat 1977-2023) – rys. 5.3.



Rysunek 5.3. Średnia liczba dni z temperaturą poniżej 0°C i +5°C – źródło IMGW

¹¹ Paślawski J. 1984. Wpływ warunków klimatycznych na wydajność produkcji budowlanej, Praca dyplomowa magisterska pod kierunkiem Prof. Józefa Jasiczaka, Politechnika Poznańska, Poznań



Na podstawie rys. 5.3. można oszacować, że średnia liczba dni z temperaturą poniżej 0°C wynosi ok. 79 dni w roku, co wskazuje, że problem jest istotny. Opierając się na doświadczeniach z ekspertyz budowlanych można wskazać, że typowym miesiącem generującym problemy jakościowe przy betonowaniu w wyniku nagłego spadku temperatury otoczenia (podczas gdy podczas układania mieszanki betonowej panowały sprzyjające warunki atmosferyczne) jest listopad. Należy podkreślić, że zgodnie z tradycyjnym podejściem w okresie grudzień – luty nie planowano robót betonowych narażonych na oddziaływanie otoczenia.

Rosnący ekstremizm zjawisk pogodowych na tle zmian klimatu

Z uwagi na postępujące zmiany klimatyczne można odnieść wrażenie, że dotychczasowe doświadczenia (charakterystyki klimatyczne powstałe na bazie danych za okres pomiarów prowadzonych przez minimum 100 lat) mają wątpliwą wartość. Jak wynika z badań prowadzonych po kierunku Lee i Romero globalna temperatura powierzchni wzrosła w pierwszych dekadach 21 wieku (2001-2020) o 0,99°C w stosunku do lat 1850-1900. Tendencja wzrostu tej temperatury jest od 1970 roku najwyższa w ciągu co najmniej ostatnich 2000 lat Calvin i in. (2023). Raport przewiduje, że w nadchodzących dziesięcioleciach zmiany klimatyczne będą się nasilać we wszystkich rejonach. Przy globalnym ociepleniu o 1,5°C temperatury powierzchni Ziemi nastąpi nasilenie upałów, ciepłe pory roku ulegną wydłużeniu, a zimne pory roku – skróceniu. Z punktu widzenia warunków analizowanych w niniejszej rozprawie warto podkreślić, że **związek między ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi a zmianami klimatu jest wyraźny** Landau (2024). **W związku z zachodzącymi na aktualnie zmianami klimatycznymi należy liczyć się zatem z rosnącą ilością nagłych zmian temperatury powietrza oraz rosnącą ich amplitudą.** Nadal wykorzystuje się modele bazujące na danych historycznych – można w modelu symulacyjnym uwzględnić zmiany wynikające ze zmian klimatycznych (jak podano np. w granicach kilkunastu procent). W związku z tym analiza średnich temperatur zwłaszcza tych poniżej 0°C oraz okresów w których występują znaczne spadki temperatury jest istotna z punktu widzenia realizacji robót betonowych w warunkach obniżonej temperatury.

Analizując wykres średnich temperatur dobowych w Polsce można wskazać okresy, w których bardzo prawdopodobne jest zastosowanie metody COLCON - np. marzec/kwiecień czy listopad/grudzień. W tym okresie amplitudy dobowe (różnica pomiędzy maksymalną



temperaturą dobową i maksymalną temperaturą dobową mogą osiągać kilkanaście stopni Celsjusza - co potwierdzają badania Obajtko dotyczące przebiegu temperatury minimalnej i maksymalnej dobowej na stacji IMGW w Katowicach w latach 2015-2018)¹². Poniżej przedstawiono zestawienie wyników pomiarów średniej temperatury dobowej w Polsce na podstawie danych z lat 1950-2018, średniej z lat 1981-2010 oraz roku 2019. Wykresy tych danych wraz z odchyleniami 1σ i 2σ przedstawiono na rysunku 5.4.

Analizując przedstawione dane można znaleźć potwierdzenie, że za typowy okres zastosowania metody COLCON można uznać:

- miesiące marzec i kwiecień oraz listopad i grudzień, kiedy zakres występującej temperatury umożliwia układanie mieszanki w warunkach sprzyjających i następujący po jej zakończeniu nagły spadek temperatury otoczenia (w granicach kilkunastu stopni Celsjusza).

Współczynniki sezonowości przy planowaniu w harmonogramie ogólnym

Na podstawie analizy warunków klimatycznych w oparciu o dane z reprezentatywnego okresu można określić współczynniki sezonowości, które uwzględniają wymagania wynikające z realizacji określonych robót w danym okresie (z reguły przyjmuje się miesiąc). Pierwsze prace w tej dziedzinie w Polsce podjął Rucki R (1957). Badania te stanowią istotny krok w określeniu współczynników sezonowości w budownictwie w Polsce, autor jednak nie miał dostępu do szczegółowych danych dotyczących warunków pogodowych – opierał się jedynie na ogólnych danych klimatologicznych. W roku (1975) wskazał na istotny wpływ warunków klimatycznych na procesy zachodzące podczas produkcji, transportu i układania mieszanki betonowej w klimacie gorącym i suchym Jasiczak (1983). W 1984 Paślawski określił współczynniki sezonowości na podstawie szczegółowych analiz warunków atmosferycznych w reprezentatywnym 30-leciu (1951-1980). Współczynniki te obliczano jako średnią wartość dla tego 30 – letniego okresu według wzorów:

- Dla temperatury:

S_t = liczba dni w miesiącu z temperaturą powyżej zadanej/ogólna liczba dni w miesiącu

5.1,

¹² Obajtek W. 2021 – op cit. załącznik C



- Dla opadów:

S_o = liczba dni w miesiącu z opadem poniżej zadanej wysokości/ogólna liczba dni w miesiącu
5.2,

- Dla wiatru:

S_w = liczba dni w miesiącu poniżej zadanej prędkości/ogólna liczba dni w miesiącu
5.3.

Globalny współczynnik sezonowości dla betonowania oblicza się jako iloczyn wymienionych współczynników sezonowości (dla temperatury, opadów i wiatru) – zakładając niezależność zdarzeń związanych z zaistnieniem tych elementów pogodowych, co przedstawia poniższy wzór 5.4:

$$S_b = S_t \times S_o \times S_w, \quad 5.4.$$

gdzie:

S_b - współczynnik sezonowości dla betonowania,

S_t , S_o , S_w – współczynniki sezonowości dla betonowania dotyczące temperatury, opadów i wiatru.

Jak już wspomniano obliczenia dokonywane były na bazie średnich wartości z trzydziestolecia, które obejmowało lata mokre i suche – ten okres przyjęto jako charakteryzujący klimat w danym obszarze Khodri i in. (2017).

Ballesteros-Perez z zespołem (Ballesteros-Perez i in. 2015) opracowali program badań kompleksowych dotyczących wyznaczenia współczynników sezonowości do poszczególnych robót w Chile i innych krajach Europy (późniejsze badania w latach 2016, 2017 i 2018). Ogólnie można stwierdzić, że wydajność pracy przy realizacji procesów budowlanych spada po opuszczeniu przedziału temperatury w granicach 10-20°C (wyraźny spadek wydajności można stwierdzić w temperaturze poniżej 0°C i powyżej 25°C). Oczywiście nie tylko temperatura ma wpływ na efektywność procesów budowlanych. Przykładowo opady deszczu o wysokości powyżej 10 mm na dobę mają negatywny wpływ na wykonywanie robót (Larsson & Rudberg, 2023; Moselhi & Khan, 2010; Noreng, 2005) .

W tabelicy 5.2. zestawiono przykładowe współczynniki sezonowości dla betonowania na podstawie badań Ballesteros-Perez z zespołem w latach 2015, 2016, 2017 i 2018:

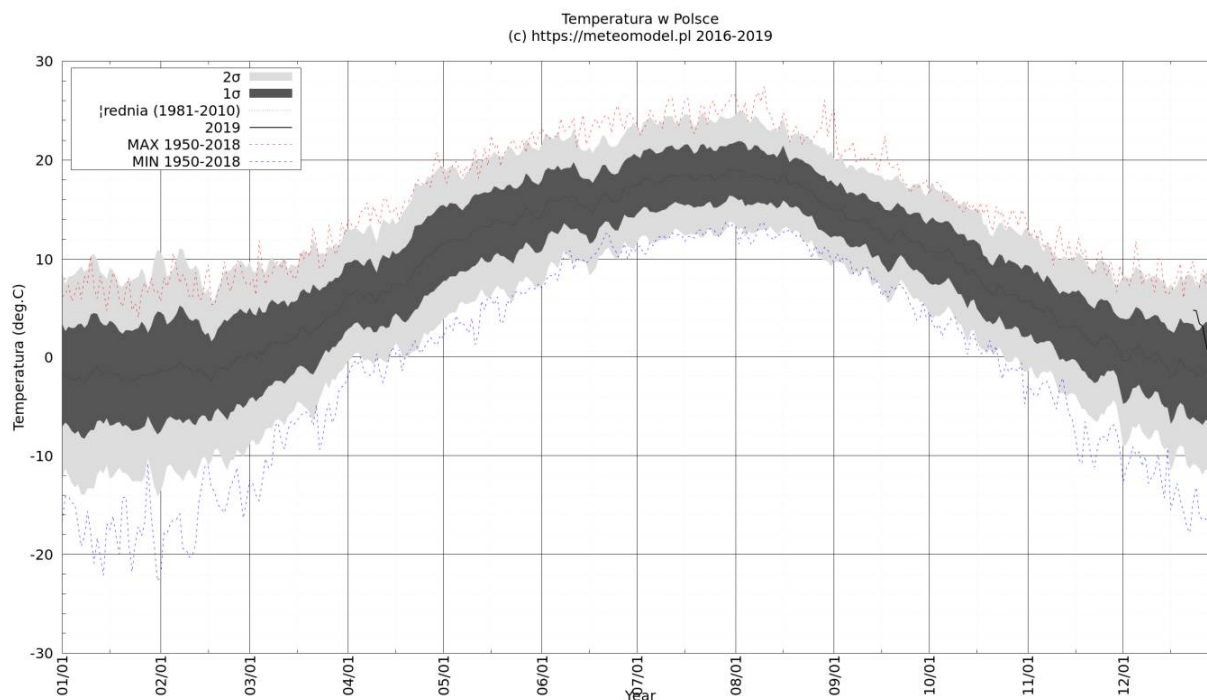
Tabl. 5.2. Współczynniki sezonowości dla betonowania

Styczeń	Luty	Marzec	Kwiecień	Lipiec	Październik	Listopad	Grudzień
0,42	0,51	0,60	0,71	0,89	0,62	0,51	0,46

Jak widać współczynniki te wahają się od 42% do 89%. Naturalnie przy tego typu analizach należy przyjąć pewien zakres zmienności wynikający z charakteru danego okresu analizy oraz oceny sytuacji przez menadżera podejmującego decyzję o planowaniu w danym okresie. W najmniej korzystnym okresie realizacji współczynnik sezonowości przyjmuje wartość poniżej 50% - należy liczyć się z koniecznością przerwania prac lub podjęcia specjalnych procedur działania w tych niekorzystnych warunkach, co niewątpliwie przyczyni się do zwiększenia kosztów oraz wzrostu ryzyka braku jakości (w przypadku zaistnienia ekstremalnych warunków pogodowych – np. spadek temperatury poniżej -15°C .). Przedstawione współczynniki sezonowości powstały na podstawie kombinacji czynników pogodowych (np. temperatura dobową poniżej 0°C , opady – powyżej 10 mm/dobę, wiatr powyżej 15 m/s) – (Ballesteros-Pérez i in., 2015). Pomimo dyskusyjnych wartości (wymagało to przeliczenia jednostek anglosaskich na jednostki układu SI) – jednak korespondują one ze współczynnikami bazującymi na danych krajowymi (np. dla Poznania)¹³, gdzie wartość współczynnika sezonowości dla betonowania w listopadzie wyniosła 0,58). Warto podkreślić, że w przypadku temperatury średniej dobowej jest ona dość dobrze rozpoznany czynnikiem pogody i jej przebieg ma dość stabilny charakter (można przyjąć pewną różnicę temperatury w stosunku miejsca budowy i miejsca pomiarów na stacji meteorologicznej), natomiast wiatr czy opady mają zdecydowanie lokalny charakter.

Menadżer podejmując decyzję na poziomie I musi określić okres realizacji betonowania. Przedstawione współczynniki sezonowości ułatwiają podjęcie decyzji o przyjętym okresie betonowania zgodnie z harmonogramem ogólnym (który z reguły stanowi załącznik do umowy).

¹³ Paślawski J. 1984 op. cit.



Rysunek 5.4. Temperatura maksymalna, średnia i minimalna wraz z odchyleniami [źródło: meteomodel.pl]

Za okres sprzyjający (w sensie braku zagrożenia nagłym spadkiem temperatury otoczenia poniżej 0°C) można uznać okres od maja do października. Wykluczenie okresu zimowego (typowe działania przy tradycyjnym podejściu) wydają się w oparciu o dane z rys. 5.4. trudne. Można zaryzykować twierdzenie, że w styczniu czy lutym istnieje większe prawdopodobieństwo występowania warunków niesprzyjających, jednak analizując zakres wahań trudno wykluczyć definitywnie taką możliwość. Z punktu widzenia klimatologii można wyróżnić cykliczność zmian pogody, która powoduje, że możemy wyróżnić okresy kilkunastoletnie zmian czynników pogodowych wokół ogólnego trendu.

W związku z powyższym bardzo istotnym elementem w tym przypadku jest aktualna prognoza pogody którą należy na bieżąco weryfikować oraz analizować gdyż jej sprawdzalność maleje wraz ze wzrostem długości okresu dla jakiego jest wyliczona, i tak średnio wynosi:

do 24h sprawdzalność ok. 95%,

dla 48h sprawdzalność ok. 75%,

dla 72h sprawdzalność ok. 60%.



W okresie sprzyjającym (od maja do września) głównym zagrożeniem dla robót monolitycznych mogą być długotrwałe i intensywne opady deszczu (incydentalnie zdarzały się opady śniegu) i ewentualne przymrozki w maju.

W okresie od października do kwietnia kiedy to trzeba się liczyć z możliwością wystąpienia obniżonej temperatury największym problemem jest sytuacja kiedy w dniu rozpoczęcia robót monolitycznych warunki były sprzyjające a nagle w ciągu doby dochodzi do znacznego obniżenia temperatury poniżej 0°C przy amplitudzie dobowej kilkunastu stopni Celsjusza.

Podsumowanie – decyzje menadżerskie na poziomie I

Reasumując powyższe rozważania można stwierdzić, że:

1. Przedstawione współczynniki sezonowości dają obraz możliwości zmian warunków pogodowych – listopad, grudzień i styczeń oraz luty są miesiącami z najniższymi współczynnikami sezonowości dla robót betonowych,
2. Korzystnym będzie planowanie robót betonowych w okresie sprzyjającym (należy podkreślić, że w okresie sprzyjającym – od maja do września/października także wartości współczynników sezonowości oscylują wokół wartości 80% - w lipcu wsp. sezonowości wynosi 0,89), jednak należy liczyć się z utrudnieniami wynikającymi z wysokiej temperatury i ulewnych opadów deszczu (często związanych z burzami),
3. W przypadku braku takiej możliwości (decyzje te będą podejmowane na zasadzie kompromisu – np. priorytetem może być wykonanie robót zmiennych i fundamentowych poza okresem niesprzyjających warunków, gdyż konsekwencje mogą być poważne – np. przestój robót trwający ponad 7 dni po intensywnych opadach) należy podjąć odpowiednie działania w celu zmniejszenia ryzyka (przyjęcie odpowiednich procedur: zastosowanie modyfikacji mieszanki betonowej, podgrzewanie mieszanki betonowej w wytwórni, zastosowanie deskowań z opcją podgrzewu itp.),
4. Należy zwrócić szczególną uwagę na planowanie betonowania w okresie przedwiośnia i przedzimia, kiedy temperatura w dzień jest sprzyjająca, a w nocy powstaje ryzyko nagłego obniżenia temperatury. Na podstawie obserwacji problemów z zapewnieniem jakości podczas robót betonowych należy wskazać miesiąc listopad, w którym odnotowano *gross* negatywnych przypadków. Z perspektywy wieloletnich



doświadczeń na budowach można stwierdzić, że okres od października do kwietnia jest okresem zwiększonego ryzyka, kiedy optymistyczny (a nawet najbardziej prawdopodobny) może nie zaistnieć, a konsekwencje mogą być bardzo poważne

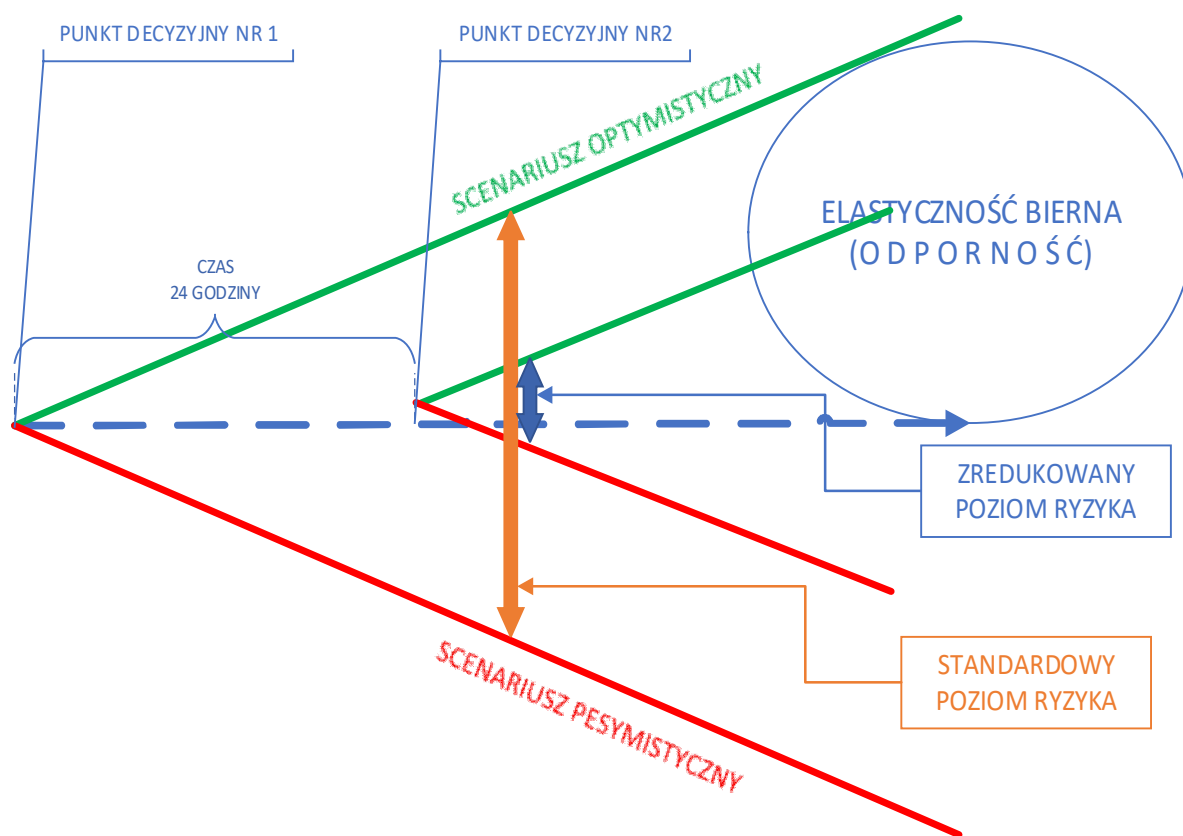
5. System COLCON został stworzony do wsparcia menadżerów na budowie w tym okresie. Przytoczone rozważania, wyniki badań i wskazane zmiany współczynników sezonowości dają obraz kompleksowy – tworząc podstawę do decyzji menadżera na budowie.

Obecnie dysponujemy innowacyjnymi rozwiązaniami ułatwiającymi zapewnienie jakości robót betonowych realizowanych w warunkach podwyższonej niepewności i ryzyka. Ponadto stwierdzić należy, iż istotnym elementem dla realizacji robót w obniżonej temperaturze jest bieżąca aktualizacja prognozy pogody oraz monitoring temperatury wewnątrz twardniejącej mieszanki betonowej i jej otoczenia – te decyzje zapadają na poziomie operacyjnym – poziom II.

5.3. Opis poziomu II – dobór mieszanki i metod pielęgnacji

Przygotowanie do realizacji procesu betonowania bezpośrednio przed planowaną datą wykonania oparte jest na podstawie aktualnego stanu pogody i prognozy pogody krótkoterminowej. W rezultacie menadżer podejmuje decyzję dot. doboru odpowiedniej modyfikacji mieszanki betonowej oraz metodzie pielęgnacji betonu.

Na poziomie II podejmowana jest kluczowa decyzja dotycząca przewidzianej do betonowania mieszanki oraz metod pielęgnacji na podstawie tablic decyzyjnych w celu doboru składu mieszanki betonowej modyfikacji mieszanki betonowej w zależności od temperatury otoczenia aktualnej oraz prognozowanej w dniu wykonania procesu betonowania na okres najbliższych 24/48 h. Prawidłowy dobór opcji technologicznej przy betonowaniu w tym okresie zapewni osiągnięcie wytrzymałości krytycznej - odporności mrozowej dojrzewającego betonu (5 MPa) dla scenariusza optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego (elastyczność bierna – ODPORNOŚĆ). Tok myślenia związany z zastosowaniem elastyczności biernej na poziomie II ilustruje rys. 5.5.



Rysunek 5.5 Idea redukcji ryzyka technologicznego przy betonowaniu dzięki zastosowaniu elastyczności biernej

Idea redukcji ryzyka dzięki zastosowaniu elastyczności biernej (odporności) opiera się na założeniu, że przy podejmowaniu decyzji na tym poziomie dobrano recepturę mieszanki betonowej bazując na znajomości aktualnej sytuacji pogodowej i prognozie na relatywnie krótki okres (24-48 h), co daje podstawy do jest sprawdzalności na relatywnie wysokim poziomie¹⁴. Z założenia okres prognozy (24 -48 h) wystarczyć powinien do osiągnięcia wytrzymałości krytycznej – odporności mrozowej w przedmiotowym elemencie betonowym.

Na podstawie aktualnego stanu pogody i prognozy krótkoterminowej (24h) menadżer działa w oparciu o tablicę decyzyjną opartą o naukę z przykładów. Przykładową tablicę zastosowaną na tym etapie przedstawia Tablica 5.3.

Tablica 5.3. Przykładowa tablica decyzyjna – wybór składu mieszanki oraz metody pielęgnacji

		Temperatura prognozowana 24 h														
		FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV		
TEMP. NOWY [°C]	FLEXIBLE OPTION ACTIV	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD RESULT	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM
		(5+10) [°C]			(0+4,9) [°C]			(-5+-0,1) [°C]			(-10+-5,1) [°C]			(-15+-10,1) [°C]		
(5+10) [°C]	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES
(0+4,9) [°C]	NO	NO	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO
(-5+-0,1) [°C]	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
(-10+-5,1) [°C]	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
(-15+-10,1) [°C]	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

¹⁴ IMGW 2023. Wiarygodność numerycznych modeli pogody, pobrano z Internetu: [Wiarygodność numerycznych modeli pogody | Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy \(imgw.pl\)](https://imgw.pl) dnia 11.09.2024



W powyższej tablicy kierunku pionowym opisano przedziały temperatury otoczenia stwierdzone aktualnie na budowie (tytuł pierwszej kolumny TEMP. NOW), a w kierunku poziomym przedstawiono przedziały temperatury prognozowanej w odpowiednich przedziałach (nagłówek: Temperatura prognozowana 24 h). Jeżeli chodzi o zastosowanie elastyczności to na osi pionowej opisano opcje elastyczności aktywnej (NO – brak opcji, FC – zastosowanie okrycia folią izolacyjną, HT - elektronagrzew, HF – podgrzewane deskowanie), na osi poziomej przedstawiono opcje elastyczności pasywnej (CM-MOD – mieszanka betonowa modyfikowana klasycznymi domieszkami – także np. FS-1¹⁵, CM – PCM – oznacza mieszankę betonową z dodatkiem Phase Change Materials – np. Micronal BASF¹⁶, CM-MOD+PCM – mieszanka betonowa zmodyfikowana domieszkami oraz (jednocześnie) z dodatkiem PCM BASF Micronal).

Działania na poziomie II dotyczą zaistnienia scenariusza optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego. Zastosowanie dodatku- modyfikacji PCM (Phase Change Material) poszerza zakres działania na poziomie II (odporność).

Baza danych w postaci tablicy decyzyjnej (tablica 5.3) powstała dzięki zbieraniu danych i nauce z przykładów w programie Rapid Miner – ogólna idea wykorzystania programu Rapid Miner została podana w punkcie 4.5, a szczegółowy opis działania i tok obliczeń przedstawiono poniżej.

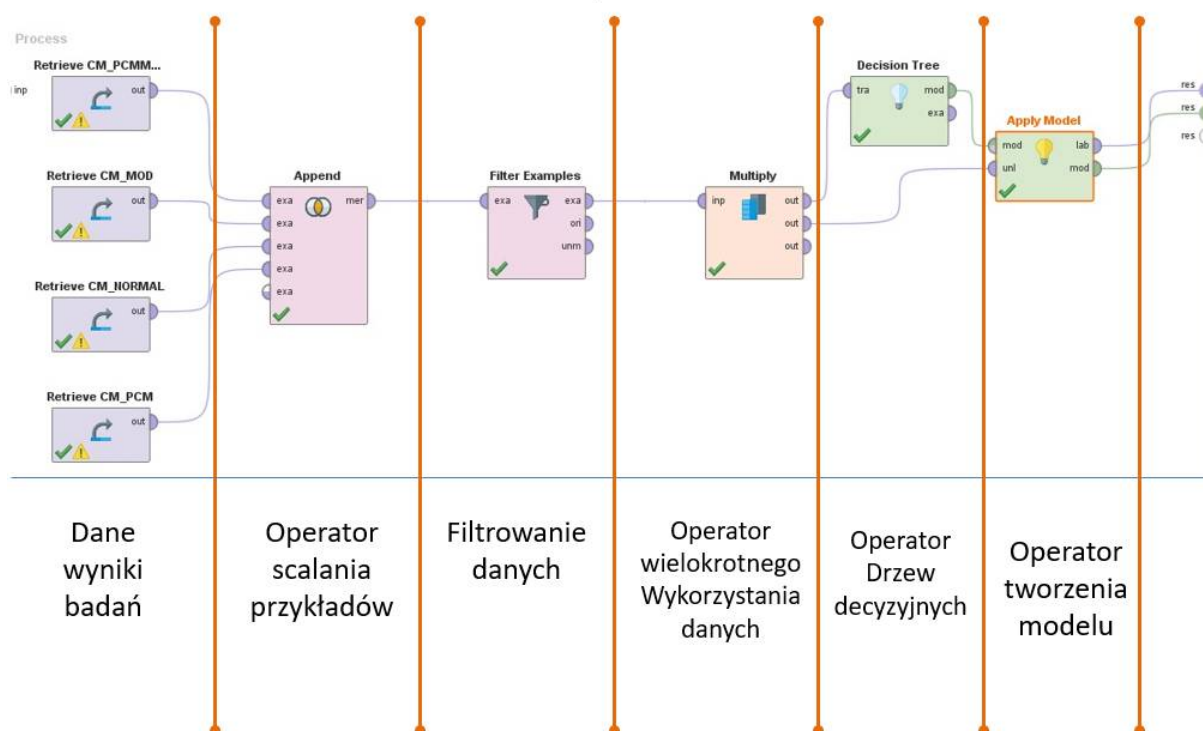
Szczegółowe omówienie wybranego do analizy danych oprogramowania RapidMiner

RapidMiner jest środowiskiem do analizy danych oraz procesu eksploracji wyników. Możliwości wizualizacyjne oprogramowania obejmują m.in. generowanie histogramów, wykresów i macierzy rozrzutu, drzew decyzyjnych itp.

¹⁵ Sika FS-1 PL – domieszka do betonu przyspieszająca wiązanie. Działanie podstawowe – znaczne skrócenie osiągnięcia wczesnej wytrzymałości krytycznej – odporności mrozowej na poziomie 5 MPa w obniżonej temperaturze. Działanie uboczne FS-1: uplastycznienie i poprawa urabialności mieszanki betonowej, obniżenie temperatury zamarzania wody w mieszance betonowej/zacznym cementowym

¹⁶ Micronal BASF – innowacyjny materiał zmiennofazowy, który zapewnia utrzymanie odpowiedniej temperatury (np. powyżej 0°C) na zasadzie przemiany fazowej, BASF otrzymał nagrodę za to rozwiązanie innowacyjne – info: <https://www.basf.com/pl/pl/media/news-releases/2015/12/2015-12-10>

Machine Learning - RapidMiner okno procesu



Rysunek 5.6. Schemat działania programu Rapid Miner

Dane wyniki badań

Program RapidMiner może czytać dane z baz danych MS SQL, Access, python, oraz z plików *.txt, *.xml i Programu MS Excel-*.xls. Dane mogą pochodzić z jednej bazy lub kilku baz oraz jednego lub wielu plików.

Operator scalania przykładów- wyników badań

Zastosowanie tego operatora umożliwi nam na potrzeby programy scalić wybrany zakres danych z bazy danych oraz plików.

Filtrowanie danych

Powyższy operator pozwala na wybór odpowiedniego zakresu danych do analizy – poszczególne przypadki, zastosowane mieszanki domieszki lub dodatki oraz inne np. zabezpieczenia mieszanki betonowej stosowanie elektronagrzewu czy podgrzewanych deskowań.



Operator wielokrotnego wykorzystania danych

Pozwala to na losowanie danych ze zwracaniem lub losowanie z powtórzeniami – rodzaj wielokrotnego losowania, w którym powtarzane jest takie samo pojedyncze losowanie z tego samego zbioru możliwych wyników

Operator drzew decyzyjnych

Podstawowy algorytm wykorzystywany w systemie COLCON do optymalizacji danych i tworzenia modelu i stopnia

Jako algorytm drugiego stopnia wykorzystywany był Random Forest (lasy losowe), który po analizie predykcji okazał się bardziej skutecznym modelem niż drzewa decyzyjne.

Ostatnim algorytmem użytym w systemie COLCON alternatywa dla Random Forest jest Gradient Boosted Trees (drzewa wzmocnione gradientem), który uzyskuje lepsze dopasowanie modelu niż dwa poprzedni. Gradient Boosted Trees to kolejna metoda uczenia się zespołowego, która łączy wiele drzew decyzyjnych. Jednak w przeciwieństwie do Random Forest, buduje drzewa sekwencyjnie, przy czym każde drzewo próbuje poprawić błędy poprzedniego drzewa. Technika ta poprawia dokładność modelu pozwala tworzyć dokładniejsze prognozy analizowanych zdarzeń, co czyni go algorytmem do zastosowań w świecie rzeczywistym.

Operator tworzenia modelu

Element programu umożliwiający prezentację otrzymanych wyników w postaci drzewa decyzyjnego w przypadku algorytmu Decision Tree oraz wielu drzew decyzyjnych w przypadku zastosowania Random Forest i Gradient Boosted Trees ale za to z lepszym klasyfikatorem.

Pozyskiwanie danych w czasie rzeczywistym

Zbieranie danych wyników badań laboratoryjnych a przede wszystkim terenowych w poszukiwaniu reguł decyzyjnych wspomagających podejmowanie decyzji przy betonowaniu w obniżonych temperaturach jest skomplikowane. Wymaga to instalacji znacznej ilości traconych czujników w celu pozyskania rozkładu temperatur oraz weryfikacji przebiegu zmian temperatur w strukturze wykonywanego elementu z mieszanki betonowej oraz wpływu zmian temperatury otoczenia. Proces ten jest pracochłonny, kosztowny, ale przede wszystkim jest niezbędny do przekraczania granic związanych w wykonywaniem elementów betonowych w warunkach obniżonej temperatury. Ilość rejestrowanych przypadków monitorowania zmian temperatury we wczesnym procesie dojrzewania



mieszanki betonowej jest niewielka. Wynika to ze znacznych kosztów oraz niewielkiej popularności tych pomiarów będących następstwem przekonań o braku potrzeby ich wykonywania w środowisku inżynierów.

Analiza danych

Przeprowadzona pierwotna analiza danych oparta na zebranych ok 30 przypadkach pozwoliła na wyodrębnienie prostych czytelnych reguł decyzyjnych z zastosowaniem drzew decyzyjnych.

Kolejna szczegółowa analiza większej liczby przypadków ok 80 również z zastosowaniem drzew decyzyjnych ujawniła następujące wady:

- Przeuczenie się drzew decyzyjnych
- Większa ilość przypadków spowodowała iż otrzymane drzewa decyzyjne mają bardziej złożoną i mniej czytelną - skomplikowaną strukturę o znacznej głębokości ilości odgałęzień.

Do rozwiązania powyższych problemów skuteczniejsze okazało się zastosowanie algorytmów uczenia zespołowego, które łączy ze sobą wiele drzew decyzyjnych w celu poprawy dokładności modelu.

Przy zastosowaniu algorytmu Random Forest otrzymujemy inną strukturę wyników.

Po pierwsze otrzymujemy nie jedno proste czytelne lub skomplikowane w strukturze drzewo ale wiele klasyfikatorów (drzew decyzyjnych) o prostej strukturze co nie prowadzi do problemu przeuczenia się.

Po drugie każde otrzymane – zbudowane drzewo decyzyjne jest wygenerowane z losowo wybranego zbioru ze zwracaniem co zapobiega tworzeniu bardzo skomplikowanych w strukturze drzew i każdy podział jest wybierany jako najlepszy z podzbioru zmiennych.

Podsumowując główne różnice w porównaniu do drzew decyzyjnych to nie otrzymujemy jednego drzewa ale wiele drzew które tworzą lepszy klasyfikator, który pozwala na weryfikację prognozowanych parametrów realizacji procesu betonowania wraz z określeniem ich skuteczności.

Kluczowym w zastosowaniu tego algorytmu była ilość analizowanych przypadków mimo iż w bazie danych mamy ok 80 przypadków to losowanie ze zwracaniem i analizę losowo podzielonych danych przy wykonaniu 1000 prób losowych okazała się najbardziej skuteczna dalsze zwiększanie przypadków nie spowodowało polepszenia skuteczności klasyfikatora w macierzy predykcji.

Podsumowując zastosowanie stwierdzić należy, iż algorytm ten ogranicza nadmierne dopasowanie i poprawia uogólnienie modelu.



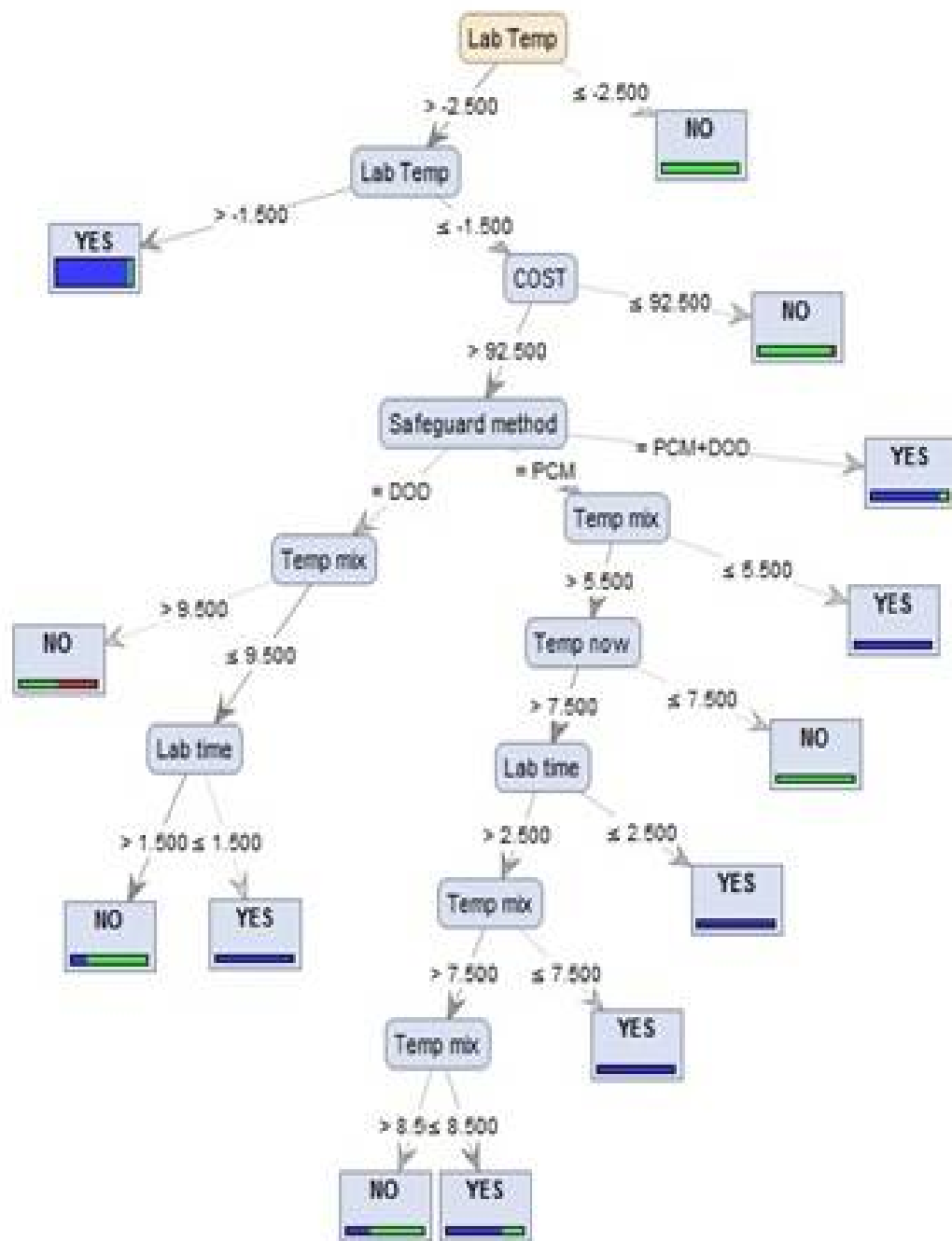
Jedną z głównych zalet Random Forest jest jego zdolność do obsługi danych wielowymiarowych z dużą liczbą funkcji. Może również obsługiwać brakujące dane i wartości odstające, co czyni go solidnym algorytmem do zastosowań w świecie rzeczywistym. Dodatkowo algorytm Random Forest udostępnia oceny ważności cech, które można wykorzystać do zidentyfikowania najważniejszych cech w analizowanej bazie danych.

Poszukiwanie alternatyw

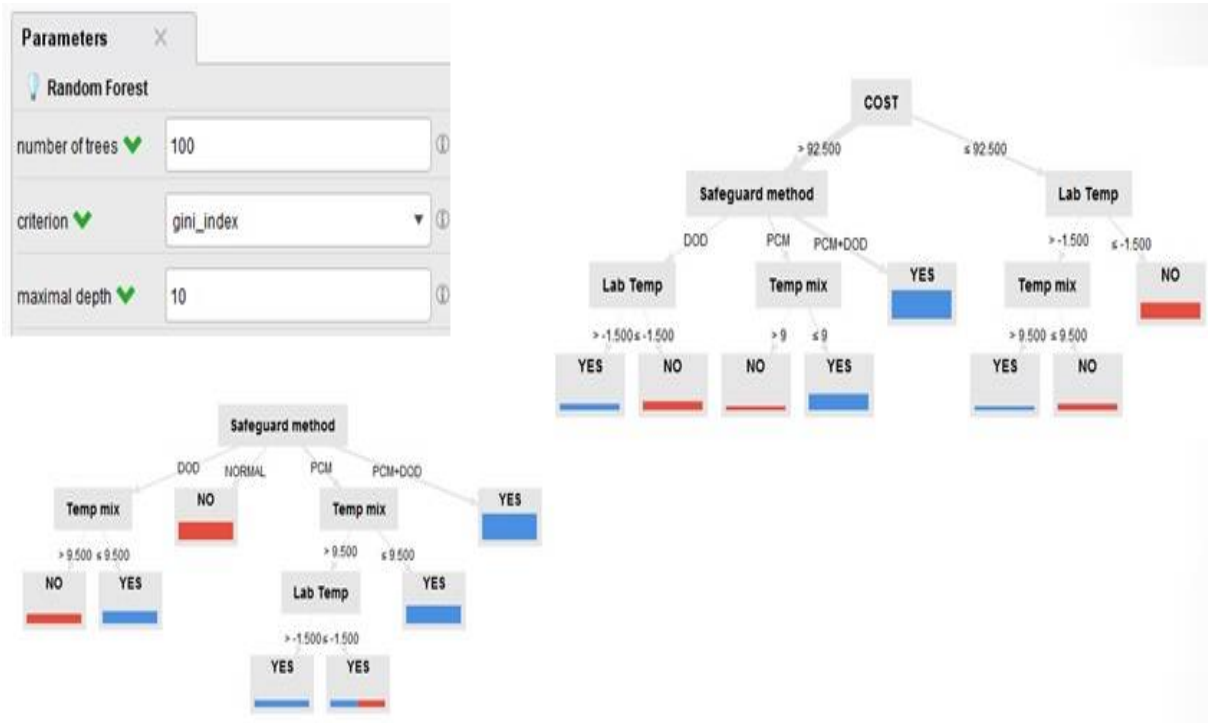
W poszukiwaniu skuteczniejszego klasyfikatora wykorzystano inny algorytm uczenia zespołowego - Gradient Boosted Trees. Drzewa wzmocnione gradientem to kolejna metoda uczenia się zespołowego, która łączy wiele drzew decyzyjnych, jednak w przeciwieństwie do Random Forest, buduje drzewa w sposób sekwencyjny – każde kolejne drzewo próbuje poprawić błędy poprzedniego. Algorytm ten może być dokładniejszy niż Random Forest, ponieważ w trybie uczenia tworzymy kolejne drzewa w zakresie wzajemnego poprawiania błędów, umożliwia to wychwytywanie złożonych wzorców w analizowanej bazie danych. Natomiast jeżeli jednak dane są zaszumione, wzmocnione drzewa mogą generować błędne reguły przez modelowanie szumu. Jedną z głównych zalet drzew wzmocnionych gradientem jest jego zdolność do obsługi niezrównoważonych zbiorów danych i tworzenia dokładnych prognoz rzadkich zdarzeń. Może również obsługiwać brakujące dane i wartości odstające, co czyni go solidnym algorytmem do zastosowań analizy danych w czasie rzeczywistym. Dodatkowo Gradient Boosted Trees udostępnia oceny ważności cech, które można wykorzystać do identyfikacji najważniejszych cech w danych. Jednak drzewa wzmocnione gradientem mają również pewne ograniczenia. W przypadku dużych zbiorów danych może to być kosztowne obliczeniowo i powolne. Jest również bardziej podatny na przeuczenie niż Random Forest, szczególnie jeśli liczba drzew jest zbyt duża.

Podsumowując stwierdzić należy, że istnieją dwie główne różnice pomiędzy Gradient Boosted Trees a Random Forest. Po pierwsze w Gradient Boosted Trees ćwiczmy sekwencyjnie, jedno drzewo na raz, każde w celu skorygowania błędów poprzednich, a w Random Forest drzewa w konstruujemy niezależnie równolegle, ale nie sekwencyjnie ze zwiększeniem gradientu.

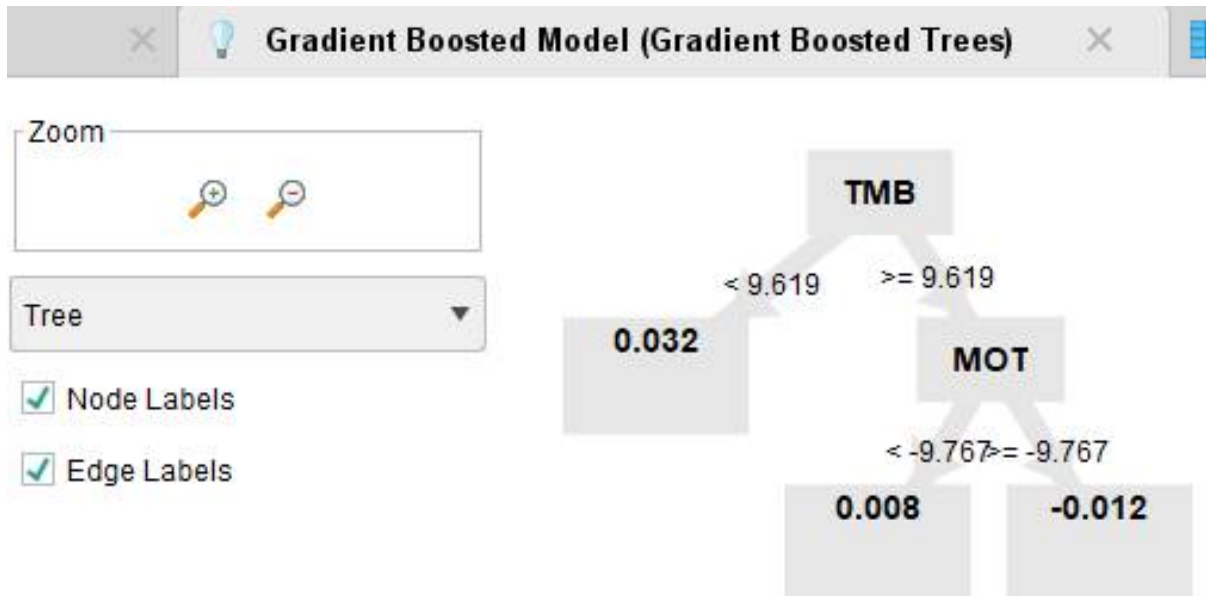
Inną zasadniczą różnicą jest sposób w jaki są generowane decyzje. W Random Forest drzewa są tworzone niezależnie i mogą określić swoje wyniki w dowolnej kolejności i w kolejnym etapie agregujemy indywidualne prognozy w zbiorczą: klasę większości w problemach klasyfikacyjnych lub wartość średnią w regresji. Natomiast w Gradient Boosted Trees tworzone drzewa wzmocniające gradient działają w ustalonej kolejności i tej kolejności nie można zmienić. I z tego powodu tworzony klasyfikator dopuszcza jedynie ocenę sekwencyjną.



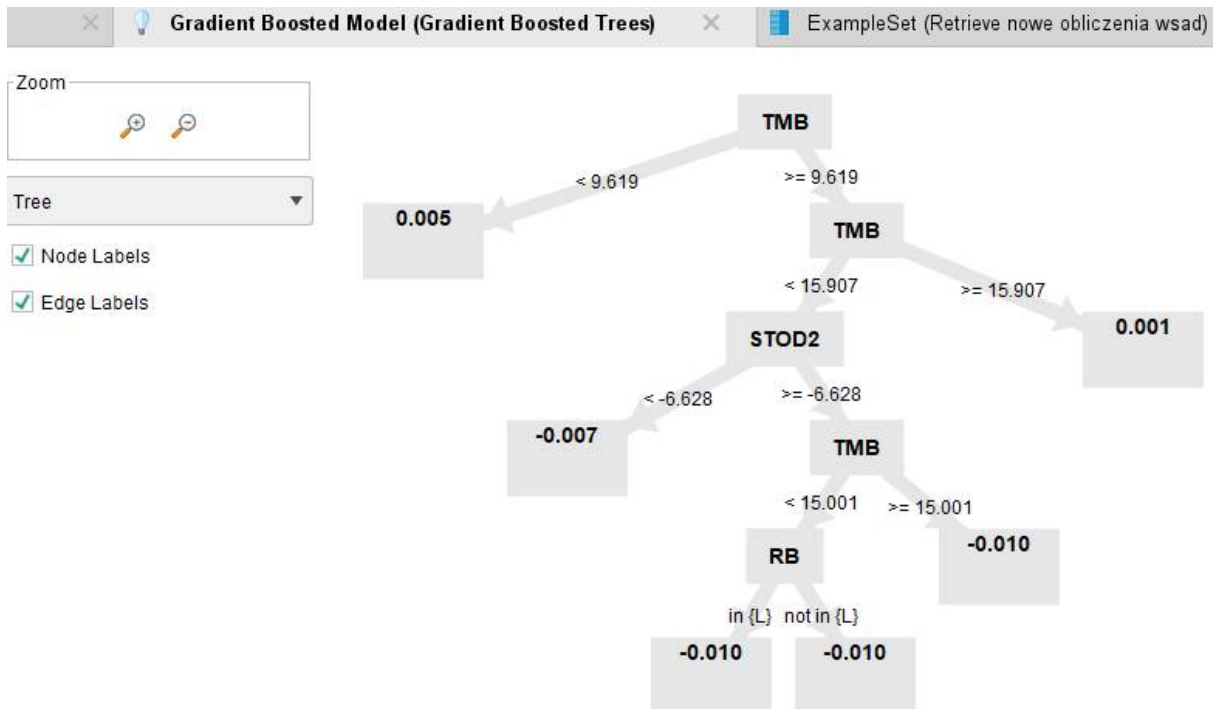
Rysunek 5.6. Drzewo decyzyjne wynikami skuteczności uzyskanego klasyfikatora 78-81% dla metod stosowania optymalizacji reguł z zastosowaniem drzew decyzyjnych.



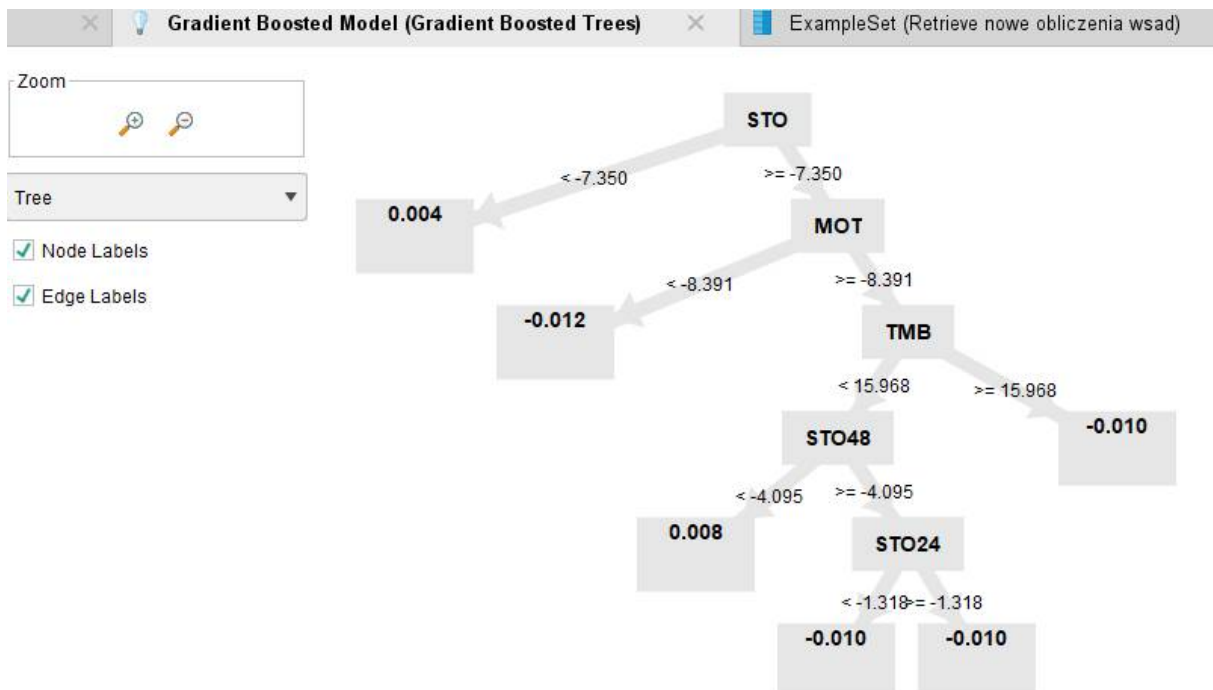
Rysunek 5.7. Wybrane przykładowe jedno z wielu drzewo decyzyjne z wynikami skuteczności 82-85% klasyfikatora dla metody Random Forest.



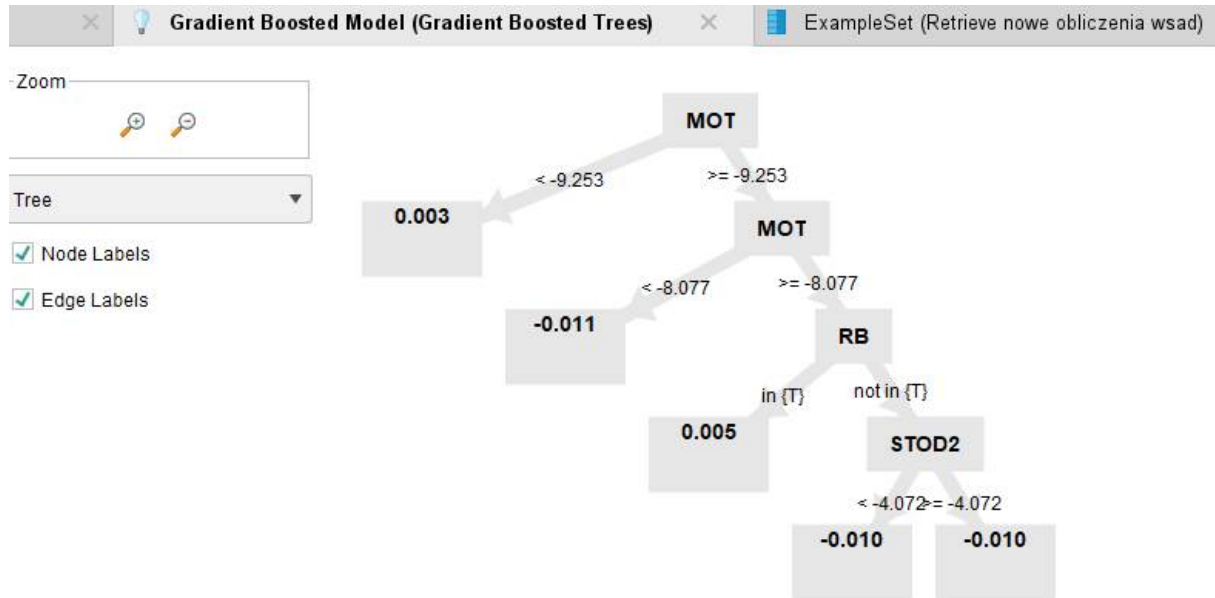
Rysunek 5.8. Wybrane przykładowe jedno z wielu drzewo decyzyjne z wynikami skuteczności 87-92% klasyfikatora dla metody Gradient Boosted Trees drzewo nr 1



Rysunek 5.9. Wybrane przykładowe jedno z wielu drzewo decyzyjne z wynikami skuteczności 87-92% klasyfikatora dla metody Gradient Boosted Trees drzewo nr 250



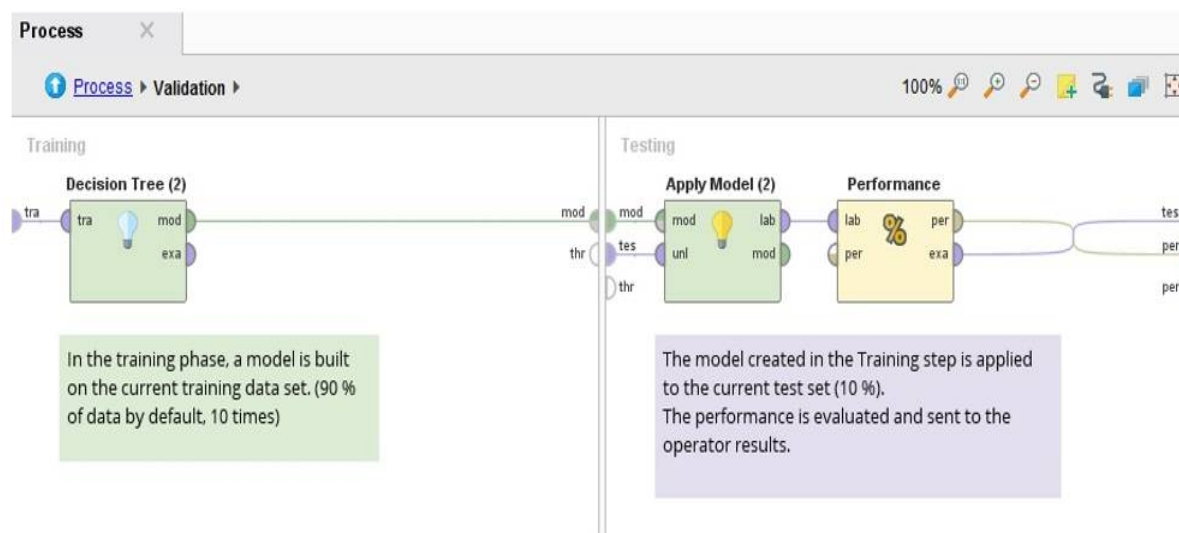
Rysunek 5.10. Wybrane przykładowe jedno z wielu drzewo decyzyjne z wynikami skuteczności 87-92% klasyfikatora dla metody Gradient Boosted Trees drzewo nr 350



Rysunek 5.11. Wybrane przykładowe jedno z wielu drzewo decyzyjne z wynikami skuteczności 87-92% klasyfikatora dla metody Gradient Boosted Trees drzewo nr 500

Machine Learning - RapidMiner

okno procesu



Rys. 5.12. Przykładowe okno procesu w Rapidminer

Schemat działania programu RapidMiner weryfikacja modelu trenowanie i testowanie – uczenie się z przykładów.

Baza treningowa 80% przypadków

Baza testowa 20% przypadków

Uczenie się z przykładów systematycznie zwiększa skuteczność co potwierdziło się w trakcie wykonanych analiz.

Baza danych składająca się z 30 przypadków miała skuteczność ok 74-78%.

W trakcie dalszych prac po zebraniu ok 80 przypadków skuteczność wzrosła do ok 78-81% z wykorzystanie algorytmu drzew decyzyjnych. W kolejnych etapach związanych z budowaniem systemu ColCon wykorzystano inne algorytmy i osiągnięto znaczną poprawę w skuteczności:

- algorytm Random Forest skuteczność na poziomie ok 82-85%.
- algorytm Gradient Boosted Trees skuteczność na poziomie ok 86-89%.



Macierz predykcji, znana również jako macierz pomyłek (confusion matrix), to narzędzie analityczne używane do oceny wydajności modeli klasyfikacyjnych. Jest to kwadratowa tabela, która pozwala zobaczyć, jak dobrze model radzi sobie z przewidywaniem poszczególnych klas w zbiorze danych.

Struktura Macierzy Pomyłek

Macierz pomyłek przedstawia zestawienie rzeczywistych klas i przewidywanych klas przez model:

Macierz Predykcji	Klasa Prawdziwa: Pozytywna	Klasa Prawdziwa: Negatywna
Klasa Przewidywana: Pozytywna	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Klasa Przewidywana: Negatywna	False Negative (FN)	True Negative (TN)

Wiersze macierzy odpowiadają przewidywanym przez model klasom, natomiast kolumny – rzeczywistym klasom.

- **True Positive (TP):** Liczba próbek poprawnie sklasyfikowanych jako pozytywne.
- **True Negative (TN):** Liczba próbek poprawnie sklasyfikowanych jako negatywne.
- **False Positive (FP):** Liczba próbek błędnie sklasyfikowanych jako pozytywne (model przewidział pozytywną klasę, ale w rzeczywistości była negatywna).
- **False Negative (FN):** Liczba próbek błędnie sklasyfikowanych jako negatywne (model przewidział negatywną klasę, ale w rzeczywistości była pozytywna).

Miary Wydajności

Na podstawie wartości z macierzy pomyłek można obliczyć kilka kluczowych miar wydajności modelu:

1. **Dokładność (Accuracy):** Dokładność to stosunek liczby poprawnych przewidywań (zarówno TP, jak i TN) do całkowitej liczby próbek.
2. **Precyzja (Precision):** Precyzja to stosunek liczby poprawnych przewidywań pozytywnych do liczby wszystkich przewidywań pozytywnych.



3. **Czułość (Sensitivity) lub Odzyskanie (Recall):** Czułość (lub odzyskanie) to stosunek liczby poprawnych przewidywań pozytywnych do liczby wszystkich rzeczywistych przypadków pozytywnych.

Czułość mierzy, jak dobrze model wykrywa prawdziwe pozytywne przypadki.

4. **Specyficzność (Specificity):** Specyficzność to stosunek liczby poprawnych przewidywań negatywnych do liczby wszystkich rzeczywistych przypadków negatywnych.

Specyficzność mierzy, jak dobrze model unika błędnego klasyfikowania negatywnych przypadków jako pozytywne.

5. **F1-Score:** F1-Score jest miarą łączącą precyzję i czułość w jedną wartość, i jest szczególnie przydatny, gdy klasy są niezbalansowane.

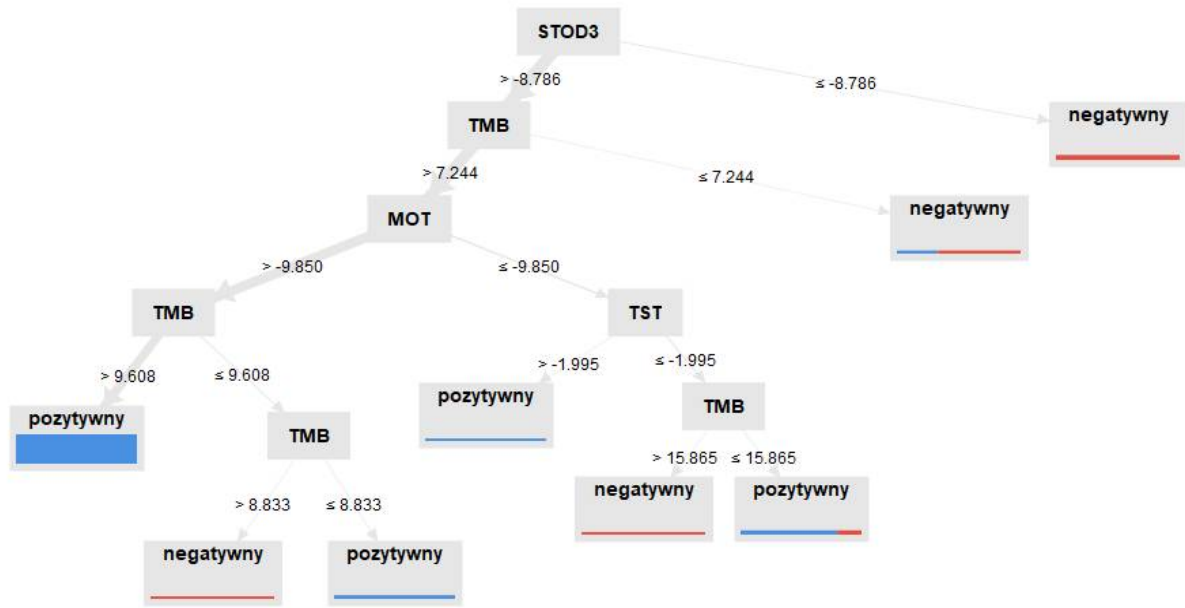
Zastosowanie Macierzy Pomyłek w RapidMiner

W RapidMiner macierz pomyłek jest generowana automatycznie po przeprowadzeniu klasyfikacji. Użytkownicy mogą zobaczyć, jak model poradził sobie z każdą klasą, i na tej podstawie dostosować model, zmieniając parametry lub wybierając inne algorytmy. Dzięki wizualizacji macierzy pomyłek w RapidMiner, użytkownicy mogą łatwo zidentyfikować, które klasy są najtrudniejsze do przewidzenia i skupić się na poprawie wydajności modelu w tych obszarach.

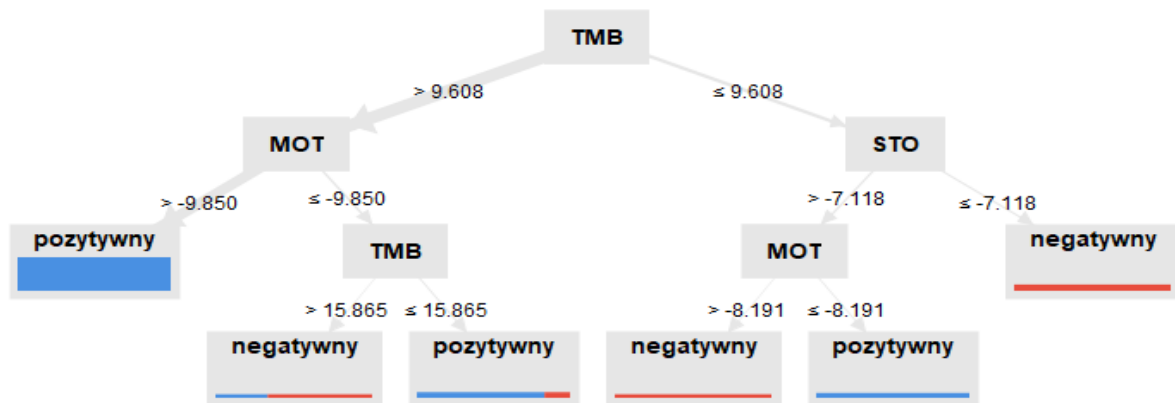
Podsumowanie

Macierz pomyłek jest niezwykle ważnym narzędziem w ocenie modeli klasyfikacyjnych, ponieważ dostarcza pełniejszego obrazu wydajności modelu niż sama dokładność. RapidMiner ułatwia analizę macierzy pomyłek, oferując jednocześnie zaawansowane funkcje do tworzenia, testowania i optymalizacji modeli takich jak drzewa decyzyjne i lasy losowe. Użytkownik może dzięki temu zidentyfikować mocne i słabe strony swojego modelu, co pozwala na iteracyjne doskonalenie i osiągnięcie lepszych wyników.

Przykłady drzew decyzyjnych z zastosowaniem algorytmu Drzew decyzyjnych.



Rys. 5.13. Przykładowe drzewo decyzyjne z programu Rapidminer



Rys. 5.14. Przykładowe drzewo decyzyjne z programu Rapidminer

Oznaczenia

TST – temperatura startowa mieszanki betonowej

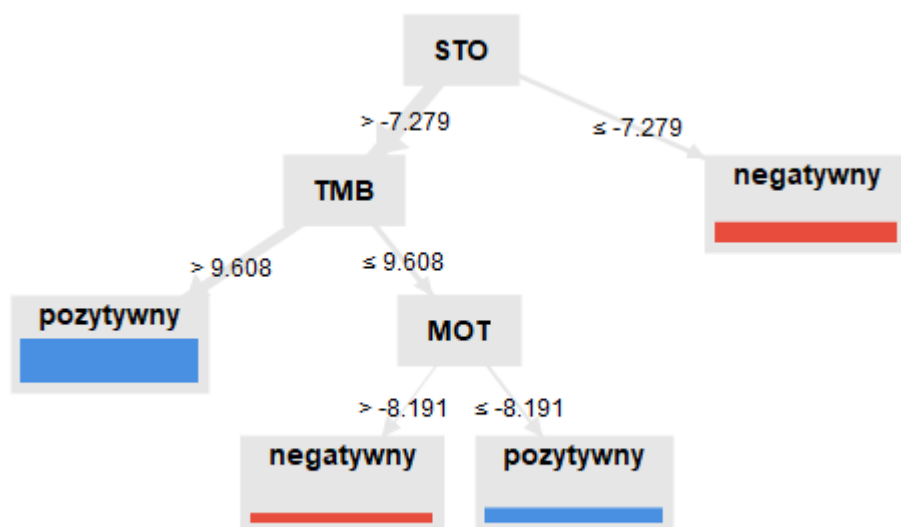
TMB- temperatura mieszanki w trakcie układania

MOT – maksymalne obniżenie temperatury w okresie 72 godzin

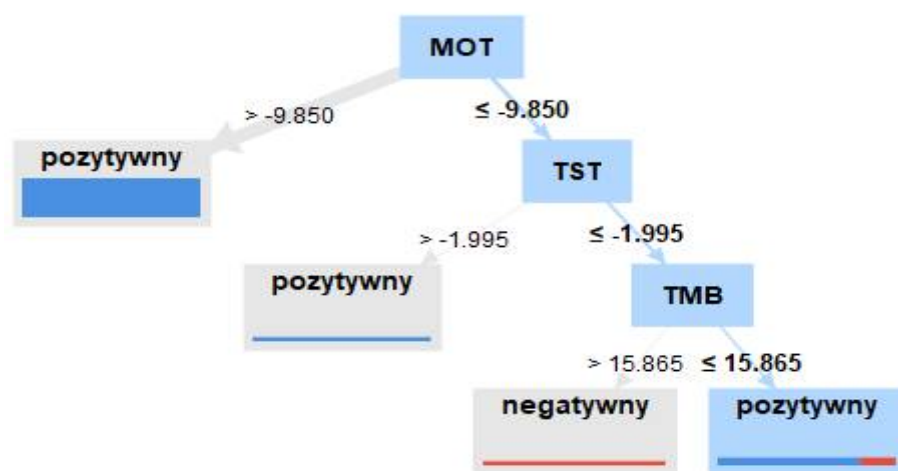
STO – średnia temperatura otoczenia

STOD3- średnia temperatura otoczenia w 3 dobie

Przykłady drzew decyzyjnych z zastosowaniem algorytmu Random Forest.



Rys. 5.15. Przykładowe drzewo decyzyjne z programu Rapidiner



Rys. 5.16. Przykładowe drzewo decyzyjne z programu Rapidiner

Oznaczenia

TST – temperatura startowa mieszanki betonowej

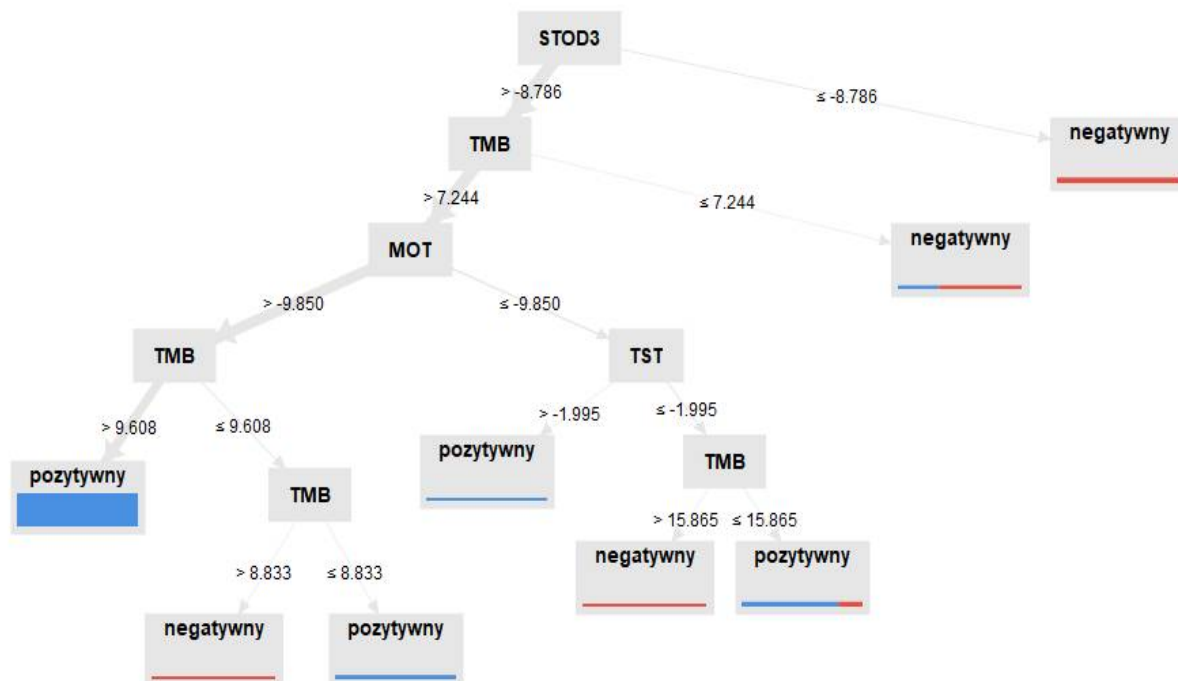
TMB- temperatura mieszanki w trakcie układania

MOT – maksymalne obniżenie temperatury w okresie 72 godzin

STO – średnia temperatura otoczenia

STOD3- średnia temperatura otoczenia w 3 dobie

Przykład drzewa decyzyjnego z zastosowaniem algorytmu Drzew decyzyjnych.



Rys. 5.17. Przykładowe drzewo decyzyjne z programu Rapidiner

Oznaczenia

Wartości liczbowe przedstawiają temperaturę w [°C]

TST – temperatura startowa mieszanki betonowej

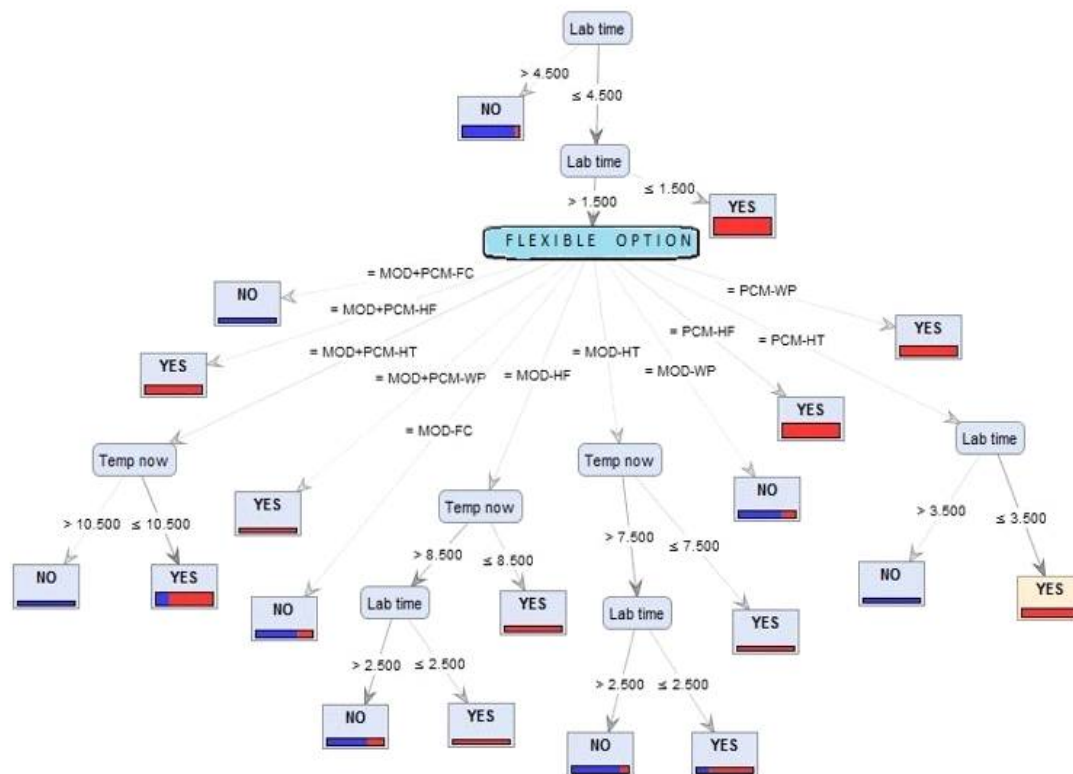
TMB- temperatura mieszanki w trakcie układania

MOT – maksymalne obniżenie temperatury w okresie 72 godzin

STO – średnia temperatura otoczenia

STOD3- średnia temperatura otoczenia w 3 dobie.

Przykładowe drzewo decyzyjne porównanie skuteczności modyfikacji mieszanek betonowych w badaniach laboratoryjnych.



Rys. 5.18. Przykładowe drzewo decyzyjne z programu Rapidiner

Oznaczenia

Temp Now – temperatura w czasie podejmowania decyzji betonowania w obniżonej temperaturze

Temp 24h – temperatura 24 godziny przed planowanym układaniem mieszanki betonowej

Temp mix – temperatura mieszanki betonowej

Lab time – czas obniżenia temperatury poniżej 0°C

Lab temp – średnia wartość obniżenia temperatury [°C] w czasie Lab time

MOD mieszanka betonowa modyfikowana

PCM-mieszanka betonowa modyfikowana PCM

HF – podgrzewane deskowania

HT – powierzchniowe ogrzewanie mieszanki betonowej

FC – zabezpieczenie górnej powierzchni folią

NO – mieszanka betonowa bez modyfikacji

Przykład tablicy decyzyjnej, która powstała na podstawie optymalizacji drzew decyzyjnych.

Tablica 5.4. Przykładowa tablica decyzyjna – o wspomagania decyzji z pomocą programu RapidMiner

		Temperatura prognozowania 24/48 h [oC]														
		FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV		
TEMP. NOW [°C]	FLEXIBLE OPTION ACTIV	CM-MOD	CM-P-CM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-P-CM	CM-MOD+PCM	CM-MOD RESULT	CM-P-CM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-P-CM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-P-CM	CM-MOD+PCM
		(5±10) [°C]			(0±4,9) [°C]			(-5±-0,1) [°C]			(-10±-5,1) [°C]			(-15±-10,1) [°C]		
(5±10) [oC]	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES
(0±4,9) [oC]	NO	NO	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO
(-5±-0,1) [oC]	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
(-10±-5,1) [oC]	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
(-15±-10,1) [oC]	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Powyższa tablica została opracowana dla przypadku betonowania płyt betonowych na gruncie, np. płyty szczelnej na stacji paliwowej – przypadek omawiany w rozdziale 1



Podsumowanie – decyzje menadżerskie na poziomie II

Przedstawione informacje dotyczące podejmowania decyzji na poziomie II podsumować można następująco:

1. Zadanie menadżera polega na doborze mieszanki betonowej i metody pielęgnacji betonu dojrzewającego w przedmiotowym elemencie na podstawie obserwacji aktualnej sytuacji pogodowej (wiodącym czynnikiem pogodowym jest temperatura) oraz prognozy pogody na najbliższy okres (24/48),
2. W czasie obowiązywania przyjętej prognozy pogody założono, że beton w przedmiotowym elemencie osiągnie wytrzymałość krytyczną (przyjęto 5 MPa) – osiągnie mrozoodporność,
3. W systemie założono, że przyjęte rozwiązania sprawdzą się w przypadku zaistnienia scenariusza najbardziej prawdopodobnego i optymistycznego.

Mimo, iż obecny na tym poziomie (poziom II) stan wiedzy wydaje się być wystarczający do osiągnięcia sukcesu – zgodności planu i realizacji, należy pamiętać by w dynamicznie zmiennym otoczeniu na bieżąco - w czasie rzeczywistym monitorować zgodność założonych - prognozowanych warunków atmosferycznym z rzeczywistymi odczytami temperatury we wczesnej fazie dojrzewania mieszanki betonowej w obniżonej temperaturze. Można założyć, że scenariusz najbardziej prawdopodobny sprawdzi się – zaistnieje, a działanie systemu COLCON na poziomie III, to potwierdzi. Jednak należy się liczyć (wprawdzie z niewielkim prawdopodobieństwem, założmy 10-15%, że zaistnieje scenariusz negatywny). Na taki scenariusz należy być przygotowanym, zwłaszcza, gdy współczynniki sezonowości wynoszą ok. 50% (miesiąc listopad).

Bieżącemu monitorowaniu sytuacji wspartemu prognozą i symulacją narastania wytrzymałości betonu w przedmiotowym elemencie służą działania na poziomie III, które opisano poniżej.



5.4. Opis poziomu III – zapewnienie jakości robót betonowych

Celem systemu COLNCON na poziomie III jest zapewnienie jakości robót betonowych także w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego. Wymaga to monitorowania temperatury w dojrzewającym elemencie i otoczeniu oraz uwzględniania prognozy pogody. Na tej podstawie można przeprowadzić symulację procesu z pewnym wyprzedzeniem (np. trzech cykli podejmowania decyzji na tym poziomie), aby bezwładność systemu nagrzewu nie spowodowała opóźnień efektu włączenia nagrzewu.

Wskazany okres funkcjonowania systemu COLCON na poziomie III obejmuje etapy od 3 do 3+n.

Krytycznym okresem dla zapewnienia jakości dojrzewania betonu w elemencie w deskowaniu jest przede wszystkim minimalna temperatura podczas pierwszej doby (pierwsze obniżenie w wyniku spadku temperatury – z reguły - w nocy, jednak nie można wykluczyć, że kolejna doba może przynieść dalsze obniżenie temperatury otoczenia. W związku z tym cykliczne podejmowanie decyzji na poziomie III obejmować może okres do 72 h.

W przypadku stwierdzenia znaczącego ryzyka związanego z nagłym spadkiem temperatury, który może grozić uszkodzeniem struktury dojrzewającego betonu (ze względu na zbyt niską wytrzymałość betonu w dojrzewającym elemencie) - należy uruchomić jedną z zaplanowanych opcji elastyczności czynnej (czyli adaptacyjności) przez użycie: elektro nagrzewu lub podgrzewanych deskowań.

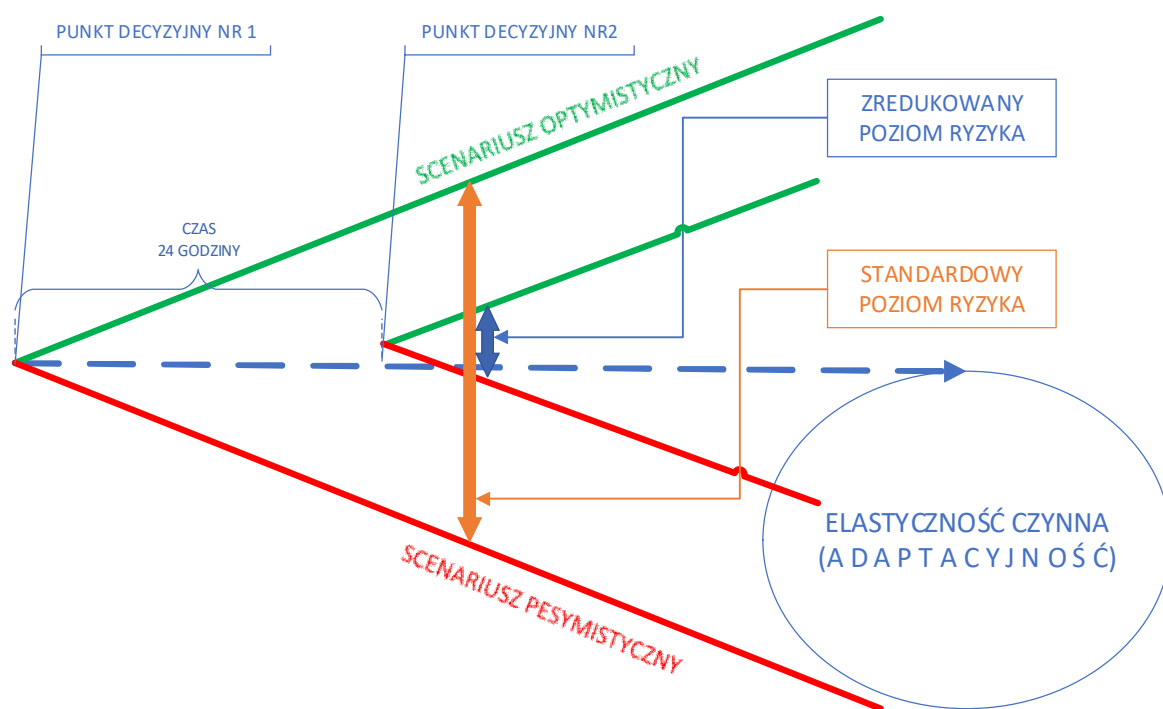
W związku z powyższym należy cyklicznie (zakłada się krok czasowy 15 minut) podejmować decyzje dotyczące uruchomienia specjalnych opcji elastyczności czynnej (elektronagrzew lub mata grzejna w podgrzewanym deskowaniu) , by w przypadku ryzyka uszkodzenia przedmiotowego elementu - doprowadzić zakończenia procesu betonowania z sukcesem.

W trakcie testowania systemu przy realizacji procesu betonowania zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i na budowie testowano różne sposoby dodatkowego zabezpieczenia mieszanki betonowej.

W przypadku zaistnienia ryzyka scenariusza pesymistycznego przewidziano specjalne działania w ramach zastosowania elastyczności:

- czynnej (adaptacyjności): podgrzewane deskowanie, uruchomienie elektronagrzewu,
- elastyczności pasywnej (odporności)- modyfikacji domieszkami +dodatek PCM.

Ogólną ideę działania systemu COLCON na poziomie III przedstawia rys.5.20.



Rysunek 5.19. Schemat systemu COLCON na poziomie 3

Na rysunku 5.19. przedstawiono ideę działania systemu COLCON na poziomie 3, która dotyczy sytuacji działania w warunkach scenariusza pesymistycznego – temperatura otoczenia spada (poniżej wartości podawanych w prognozie).

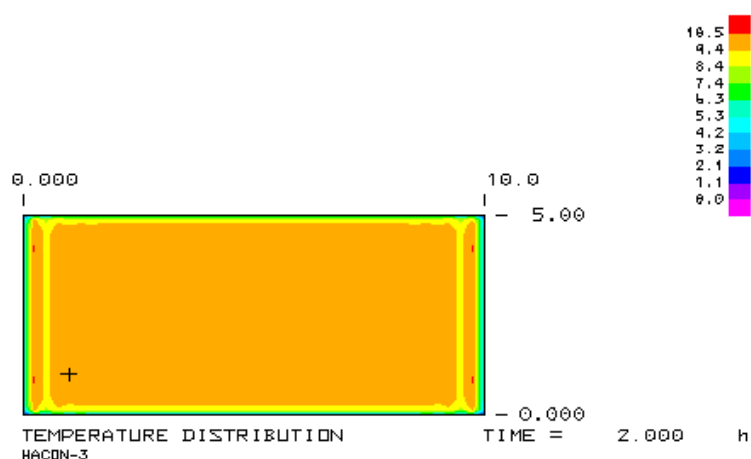
Należy podkreślić, że w takich warunkach elastyczność bierna (bazująca na odpowiednio dobranej recepturze z uwzględnieniem zastosowania domieszek i dodatku PCM (Phase Change Materials - materiałów zmiennofazowych)) nie będzie w stanie zapewnić jakości przebiegu tego procesu.

Niezbędne będzie w takich warunkach uruchomienie podgrzewanego deskowania. Ze względu na bezwładność tego rozwiązania (mata grzewcza znajduje się po drugiej stronie poszycia ze sklejki) wymagane jest uruchomienie tej opcji z wyprzedzeniem. W systemie COLCON założono 3 cykle wyprzedzenia (krok czasowy wynosi 15 minut) – ogrzewanie deskowania jest

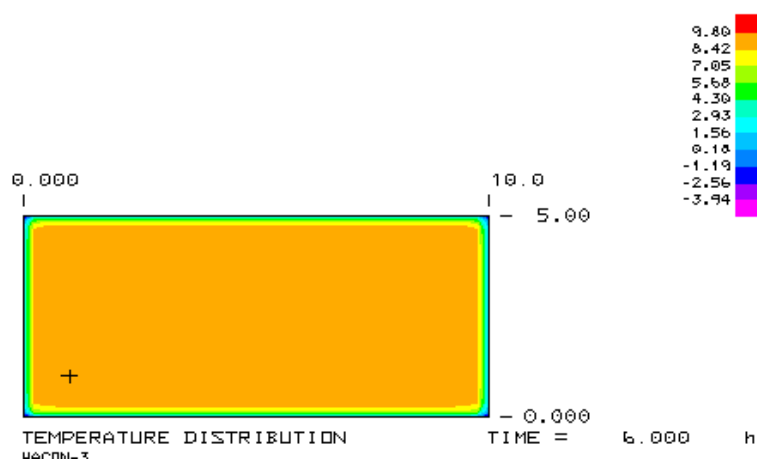
uruchamiane z 45-minutowym wyprzedzeniem w stosunku do przewidywanego momentu spadku temperatury. Ze względu na charakterystykę grzewczą elementu (50-150W/m²) ogrzewanie deskowania włącza się i wyłącza cyklicznie w celu zapewnienia zadanej temperatury deskowania (założono +5°C).

Do symulowania procesu przebiegu zmian temperatury z zmiennym otoczeniu na poziomie III systemu wykorzystano program Hacon 3.1.. HACON to program elementów skończonych do symulacji rozwoju temperatury i naprężeń w twardniejącym betonie. Dane do przeprowadzenia symulacji zostały opracowane na podstawie badań laboratoryjnych związanych z narastaniem wytrzymałości analizowanych mieszanek betonowych w zakresie temperatur otoczenia -10 ÷ 30°C

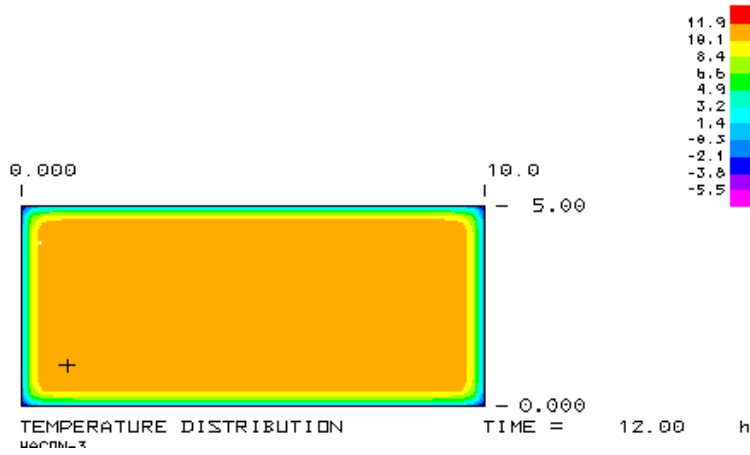
Obraz graficznego rozkładu temperatur 0-48h – Symulacja w programie Hacon



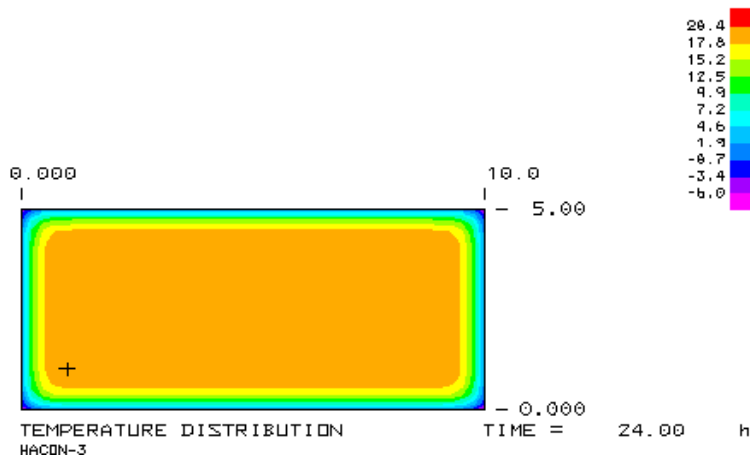
Rysunek 5.20. Obraz symulacji rozkładu zmian temperatury w elemencie po upływie 2godzin



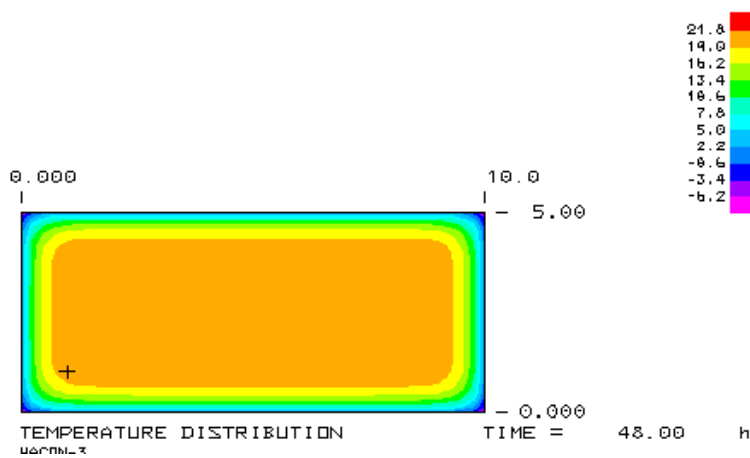
Rysunek 5.21. Obraz symulacji rozkładu zmian temperatury w elemencie po upływie 6godzin



Rysunek 5.22. Obraz symulacji rozkładu zmian temperatury w elemencie po upływie 12godzin



Rysunek 5.23. Obraz symulacji rozkładu zmian temperatury w elemencie po upływie 24godzin



Rysunek 5.24. Obraz symulacji rozkładu zmian temperatury w elemencie po upływie 48godzin



Podsumowanie działania systemu COLCON na poziomie III

Działania w systemie COLCON na poziomie III dotyczą zaistnienia scenariusza pesymistycznego wykraczającego poza możliwości zastosowania odporności biernej (receptura zakładająca relatywnie szybki przyrost wytrzymałości dzięki modyfikacji domieszkami oraz dodatkowi PCM), co przedstawiono na rysunku powyżej.

Działania na tym poziomie opierają się na podjęciu specjalnych działań gwarantujących osiągnięcie zakładanych rezultatów w przypadku zagrożenia uszkodzenia struktury dojrzewającego betonu ze względu na nagłe obniżenie temperatury otoczenia poniżej wartości prognozowanej.

Ciągły monitoring temperatury wewnątrz elementu betonowego oraz otoczenia umożliwia przewidywanie zagrożeń uszkodzenia struktury betonu (w oparciu o model MES oraz wiarygodną prognozę pogody, która jest regularnie aktualizowana z krokiem (np. 1 h). Istotnym jest oparcie się na wiarygodniejszej prognozie. Poza prognozami dostępnymi w Internecie można zlecić osłonę meteorologiczną w IMGW.

Zaistnienie warunków znacznie poniżej prognozowanych pierwotnie (na poziomie II) i oczekiwanych oznacza to istotne pogorszenie warunków dojrzewania i zagrożenie trwałego uszkodzenia struktury dojrzewającego elementu. Odpowiedzią na taki stan jest zastosowania elastyczności czynnej – adaptacyjności w postaci uruchomienia podgrzewanego deskowania systemowego.

Podsumowanie działania w systemie COLCON

Podstawa opracowania algorytmu postępowania oraz weryfikacji optymalizacji modelu – przyjętego rozwiązania wieloetapowego podejmowania decyzji w otoczeniu dynamicznie zmiennym.

Etapowanie podejmowania decyzji w systemie COLCON umożliwia:

- 1) na poziomie I - identyfikację współczynnika sezonowości w danym okresie (jeżeli jest bliski 1, to można założyć wysokie prawdopodobieństwo zaistnienia scenariusza najbardziej prawdopodobnego lub optymistycznego, ale przy współczynniku sezonowości bliskim 0,5 należy się liczyć z realnym ryzykiem uszkodzenia struktury dojrzewającego betonu w



przedmiotowym elemencie betonowym i poniesienia strat. Straty te mogą wynikać z konieczności napraw uszkodzeń lub wyburzenia i ponownego wykonania. Z doświadczenia szacować można 3 lub 4 krotne zwiększenia kosztów związanych z rozbiórką i ponownym wykonaniem elementu (nie wspominając o kosztach kar umownych itd.). Uzasadnia to zastosowanie specjalnych procedur - podejścia elastycznego wykorzystującego zarówno odporność (elastyczność bierną), jak i adaptacyjność (elastyczność czynną);

2) na poziomie II – przyjęcie w oparciu o warunki aktualne (zakładamy układanie mieszanki betonowej w tych warunkach) i warunki prognozowane w najbliższych 24/48 h – zakładamy dojrzewanie betonu w elemencie do czasu uzyskania wytrzymałości krytycznej (odporności mrozowej) – należy wybrać recepturę mieszanki betonowej zapewniającą osiągnięcie zakładanych efektów dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego i optymistycznego oraz opcje adaptacyjności (w odniesieniu do działań na poziomie III)

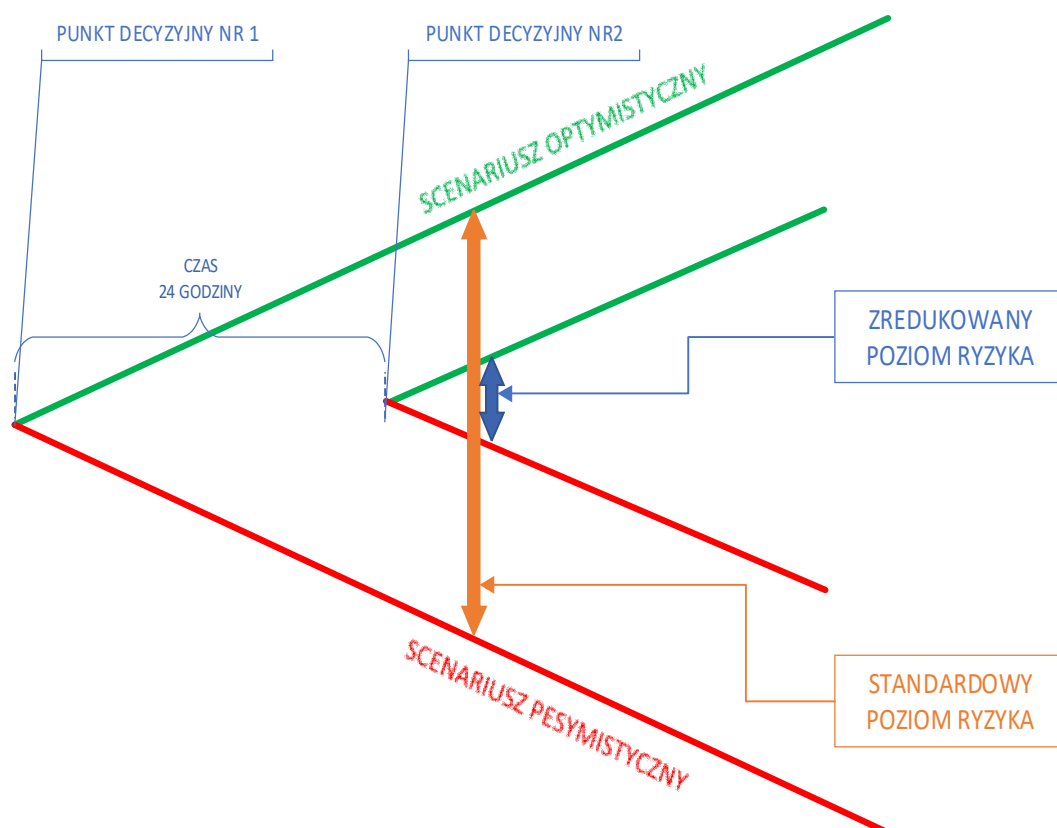
3) możliwość korekty decyzji - zastosowanie elastyczności czynnej - adaptacyjności - w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego zastosowanie podgrzewanego deskowania lub nagrzewu elementu itp.

Należy podkreślić, że opisywana sytuacja decyzyjna dotyczy nie warunków zimowych, ale ma zastosowanie w okresie przejściowym, kiedy we dnie warunki są sprzyjające, a w nocy - groźnym zjawiskiem są spadki temperatury otoczenia, a ze względu na nagły charakter zjawiska, typowe domieszki nie zapewnią oczekiwanych efektów - zapewnienia jakości betonu w konstrukcji.

[Wieloetapowe podejmowanie decyzji](#)

Wykorzystanie teorii wieloetapowych procesów decyzyjnych wraz z analizą drzew decyzyjnych oraz algorytmu Random Forest pozwala na odpowiednie zaplanowanie oraz wykonanie procesu betonowania mając za zadanie zapewnienie jakości tego procesu przy nagłym spadku temperatury otoczenia. Prawdopodobieństwo zaistnienia poszczególnych stanów oszacowano przede wszystkim na podstawie wyników badań laboratoryjnych i terenowych. Zebranie danych – informacji o stanach natury oraz przebiegu zmian temperatury w dojrzewającej mieszance betonowej w postaci reguł decyzyjnych (drzew decyzyjnych) oraz algorytmu Random Rorest pozwala na podejmowanie racjonalnych decyzji. Wieloetapowe podejmowanie decyzji umożliwia ograniczenie ryzyka przy wykonaniu procesu betonowania

w dynamicznie zmiennym otoczeniu. Zapewnienie prawidłowego przebiegu procesu betonowania opiera się o monitoring online, symulację procesów z uwzględnieniem sytuacji aktualnej oraz prognozy pogody oraz korekty decyzji w trakcie realizacji. Ideę wykorzystania elastyczności czynnej i biernej w systemie COLCON przedstawiono na rysunku 5.25.



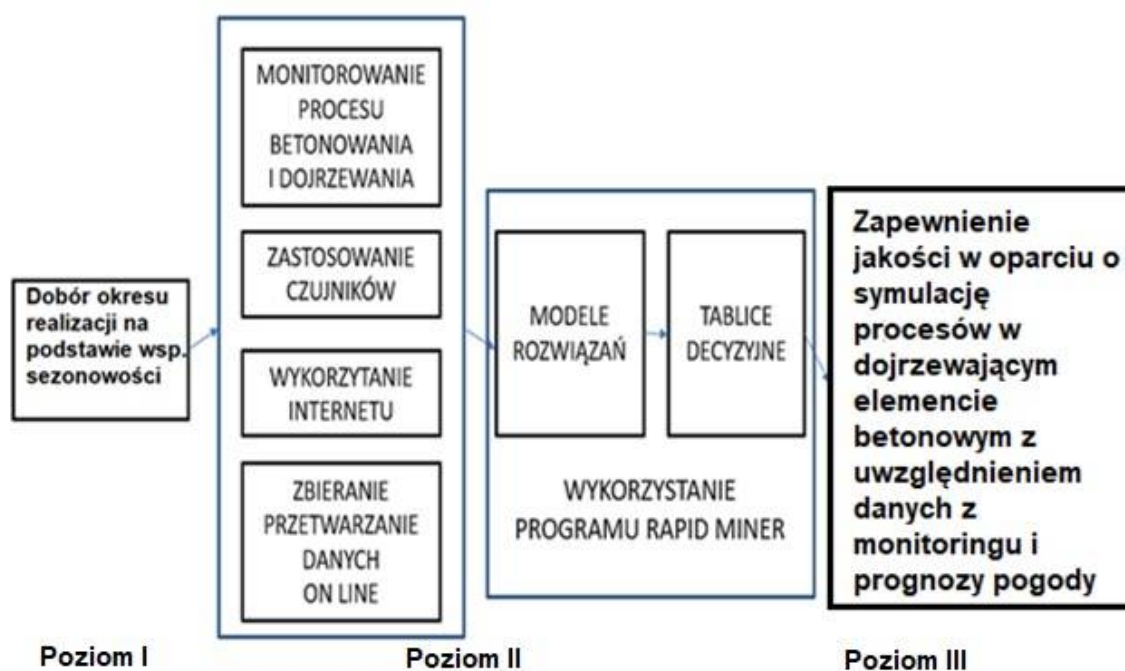
Rysunek 5.25. Idea zastosowania elastyczności w metodzie COLCON

Na rys. 5.2. przedstawiono ideę wieloetapowego podejmowania decyzji w systemie COLCON (na poziomie III decyzji decyzje to podejmowane są cyklicznie. Przy uwzględnieniu kroku czasowego 15 minut i czasu oddziaływania na poziomie III – decyzji takich będzie 288, co zilustrowano omawiając przykład w rozdziale 6.

Rozdział 6. Praktyczne zastosowanie systemu COLCON

6.1. Wprowadzenie

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie możliwości zastosowania systemu COLCON w praktyce budowlanej. Podstawowe działania w systemie COLCON zaprezentowano ogólnie na rys. 6.1. Na wstępie przedstawiono rozwiązania sprzętowe związane z poziomami II i III podejmowania decyzji w systemie COLCON. Następnie omówiono poszczególne rozwiązania dotyczące rejestratorów, czujników (także w wersji bezprzewodowej), kamerę termowizyjną oraz stację pogodową. Na zakończenie tej części przedstawiono wizję rozwoju systemu w przyszłości. Na zakończenie przedstawiono przykłady zastosowań systemu COLCON w praktyce budowlanej.



Rysunek 6.1. Schemat systemu COLCON z uwzględnieniem podstawowych działań

W celu przeprowadzenia analizy wpływu zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzwania betonu przeprowadzono szereg badań własnych mających na celu określenie istotnych parametrów w zakresie pomiaru zmian temperatury. Jednym z głównych a przede wszystkim istotnym czynników okazało się rozmieszczenie czujników w strukturze badanego elementu oraz przy



jego powierzchni co umożliwiło określenie bezpośredniego wpływ oddziaływania środowiska oraz dało możliwość zweryfikowania wpływu gradientu temperatury.

W trakcie wykonywania wielu prac laboratoryjnych i terenowych umieszczano czujniki w różnych miejscach wewnątrz elementu i przy jego powierzchni oraz dodatkowo w różnych odległościach zależnych od wymiarów elementów.

Ponadto badania prowadzono w 3 typach komór chłodniczo klimatycznych poprzez wykonanie badań wstępnych oraz planowanych, dzięki czemu udało się uwzględnić pracę komory i jej wpływ na odzwierciedlenie rzeczywistych warunków klimatycznych.

Badania te wykazały, iż istotnym elementem w trakcie badań laboratoryjnych jest zależność wymiarów objętości - wielkości poszczególnych elementów tak by układ klimatyzacji komory mógł pracować w zakresie zadanych parametrów a odległości między elementami nie zaburzały rzeczywisty wyników przebiegu zmian temperatury. Po analizie badań okazało się iż objętość analizowanych elementów nie może przekraczać 30-50% objętości komory, gdyż przekroczenie tych wielkości powodowało zaburzenia w pracy agregatu komory klimatycznej i skutkowało zmianą ustalonego przebiegu ustalonego cyklu krzywej dobowej temperatury.

Badania terenowe w kilku przypadkach prowadzono z wykorzystaniem lokalnej stacji pogodowej Davis. Takie rozwiązanie dało możliwość rejestracji i analizy lokalnych warunków pogodowych w obrębie lokalizacji placu budowy i przede wszystkim pozwoliło porównać z prognozą pogody dla najbliższej lokalizacji w danym serwisie pogodowym. Po analizie zebranych danych okazało się iż otrzymane wyniki różniły się w zakresie 2-5°C (czy do tego ma być tabela w załączniku)

6.2. Opis sprzętu pomiarowego wykorzystywanego w systemie COLCON

Pomiary temperatury wewnętrznej i otoczenia wykonano przy użyciu rezystorowych czujników temperatury typu PT100 oraz PT1000 (bezprowadowych lub przewodowych) umieszczonych bezpośrednio w wewnętrznej przestrzeni elementu betonowego przy jego powierzchni oraz otoczenia za pomocą zestawu pomiarowego składającego się z rejestratora oraz dodatkowo modułu -modemu GSM lub bezpośredniego połączenia z komputerem lub z modemem za pomocą sieci Ethernet.



W celu właściwego rozmieszczenia czujników w badanym elemencie, oraz dla zabezpieczenia ich przed uszkodzeniem w trakcie betonowania sprawdzano położenie czujników, czy zostały odpowiednio rozmieszczone na całej wysokości przekroju po 3 czujniki rezystorowe w każdej osi pomiarowej.

Dodatkowo temperaturę zewnętrzną (powietrza i powierzchni elementu) mierzono termometrem elektronicznym ręcznym lub kamerą termowizyjną.

Temperaturę powierzchni zewnętrznej badanego elementu mierzono bezpośrednio przy powierzchni oraz na powierzchni elementu. Różnica w próbnym pomiarze temperatury między czujnikami rezystorowym a termometrem i kamerą termowizyjną wynosiła ok $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Natomiast odchyłka w pomiarze temperatury między czujnikami dochodziła do $\pm 1^{\circ}\text{C}$, co uznano za wystarczającą dokładność przeprowadzonych badań.

Podstawowym urządzeniem służącym monitorowania oraz zbierania danych w czasie rzeczywistym jest rejestrator danych oraz czujniki pomiaru temperatury. Poszczególne typy rejestratorów danych różnią się funkcjonalnością, ilością obsługiwanych czujników pomiarowych oraz metodą komunikacji – przesyłania danych. Poniżej omówiono zastosowany sprzęt pomiarowy.

Systemy przewodowe - rejestratory

Rejestrator elektroniczny Metronic MPI-G-16 współpracujący z modemem Osbridge

MPI-G jest szesnastokanałowym miernikiem sygnałów analogowych z elektroniczną rejestracją wyników na kartach MMC. Przyrząd przeznaczony jest do pomiaru procesów wolnozmiennych, w szczególności temperatur, a także innych wielkości fizycznych (wilgotność, ciśnienie, przepływ, itp.) przetworzonych na standardowy sygnał prądowy 0/4-20mA.



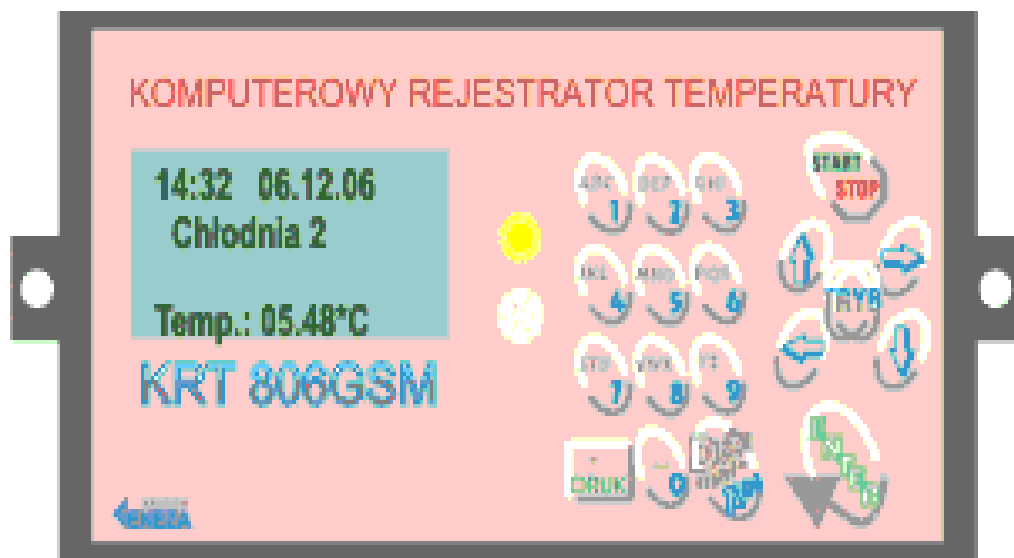
Rysunek 6.2. Rejestrator przewodowy MPI-G 16 kanałowy



Rysunek 6.3. Modem GSM Osbridge 3GN

Rejestrator elektroniczny KRT-806 GSM współpracujący z modemem Wavecom

Komputerowy 8 kanałowy rejestrator temperatury KRT-806 GSM jest przeznaczony do precyzyjnego pomiaru i rejestracji temperatury. Urządzenie pozwala na pomiar i rejestrację temperatury w zakresie od -90°C aż do $+300^{\circ}\text{C}$.



Rysunek 6.4. Rejestrator Geneza KRT-806 GSM 8 kanałowy przewodowy



Rysunek 6.5. Modem Gsm Wavecom

Systemy przewodowe – czujniki

Czujniki Pt100 i Pt1000

Czujnik Pt100 i Pt1000 to termometr rezystancyjny wykonany z platyny o odpowiedniej dla danego typu czujnika wartości oporu i charakteryzuje się rezystancją elektryczną, która zwiększa się wraz z temperaturą i dlatego określana jest jako PTC (dodatni współczynnik temperatury). Punkt pomiaru temperatury, chroniony osłoną termometryczną, najczęściej w postaci metalowej odpornej na uszkodzenia zewnętrzne.

Wartości oporów dla stosowanych czujników temperatury

- [Pt100](#) – opornik platynowy o wartości pomiarowej 100 Ω w 0 °C
- [Pt1000](#) – opornik platynowy o wartości pomiarowej 1000 Ω w 0 °C

Czujniki wykonane są najczęściej w wersji dwuprzewodowej, natomiast jeżeli konieczne jest wydłużenie standardowego przewodu lub mamy czujniki z przewodami o różnej długości dla zwiększenia dokładności pomiarów należy wykonać połączenia między czujnikiem a rejestratorem jako trójprzewodowe.



Rysunek 6.6. Czujniki przewodowe Pt100

Systemy bezprzewodowe - rejestratory

Rejestrator MonnitLink™

Rejestrator danych - odbiornik MonnitLink™ Ethernet umożliwia komunikację 50 bezprzewodowych czujników Monnit w obrębie kilku metrów. Rejestrator sieciowy MonnitLink™ wystarczy podłączyć Internetu poprzez kabel sieciowy z ruterem lub modemem GSM, aby połączyło się z serwerem producenta. Urządzenie buforuje do 16 000 informacji z czujników w swojej pamięci na wypadek przerwania połączenia internetowego. Gdy połączenie z internetem zostanie przywrócone dane z czujników zostaną automatycznie wysłane do serwera iMonnit lub lokalnego PC



Rysunek 6.7. Rejestrator Monnit link zbierający dane z czujników bezprzewodowych

Rejestrator iNode LAN/ iNode Care GSM

Rejestrator- bramka komunikacyjna do transferowania danych – odczytów temperatury za pomocą komunikacji – protokołu Bluetooth Low Energy z czujników iNode Beacon w odległości ok. kilku maksymalnie 15 m.

Urządzenia iNode oparte jest na układzie **ESP32** i programowane w języku **micro Python**. MCU GSM nie posiada określonej funkcjonalności, może on np. okresowo przysyłać dane w formacie binarnym z czujników Bluetooth na wskazany serwer HTTP. Moduł może być dowolnie zaprogramowany w języku microPython opartego na Python 3.4. Skrypty wgrywa się do urządzenia poprzez aplikację iNodePy współpracującą z urządzeniami Windows, Android

oraz Linux, w środowisku przeglądarki Chrome lub Edge. Wyposażony został w ponad 2 MB pamięci RAM, ok. 4,7 MB pamięci wewnętrznej oraz takie interfejsy komunikacji bezprzewodowej jak **Bluetooth 4.1**, **WiFi** oraz **GSM**. Urządzenie zostało wyposażone także w sprzętowy watchdog. W urządzeniu można znaleźć slot na karty nano SIM oraz dwa złącza antenowe dla Bluetooth oraz GSM. Moduł zasilany jest poprzez port microUSB (**5 V / 1 A**). W zestawie znajdują się również dwie anteny SMA.

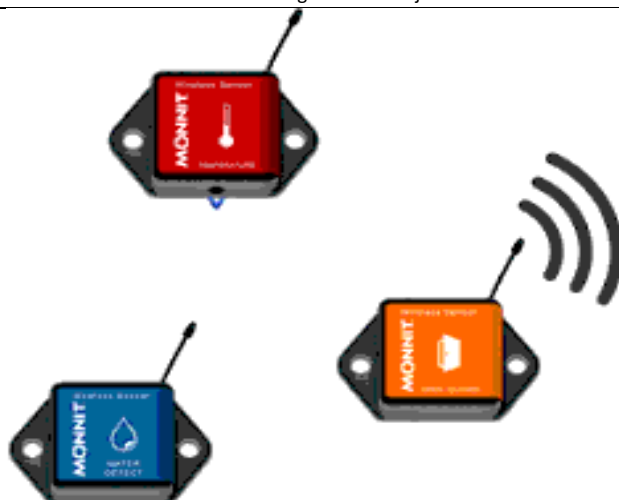


Rysunek 6.8. Bramka enernet systemu inode

Systemy bezprzewodowe – czujniki

Czujniki Inode

Czujniki bezprzewodowe zakres temperatur pracy i odczytu pracy: od -10 do 55 °C, zasilanie bateryjne 2032 wystarcza 22 dni przy odczytach co 10min i 266dni przy odczytach co 22 godziny.



Rysunek 6.9. Czujniki bezprzewodowe systemu Monnit

Czujniki iNode beacon

Czujniki iNode beacon przesyłają dane w standardzie BT4,0 zakres temperatur pracy i odczytu pracy: od -30 do 65 °C odległość ok 15m, czas działania na jednej baterii to ok 12 miesięcy.

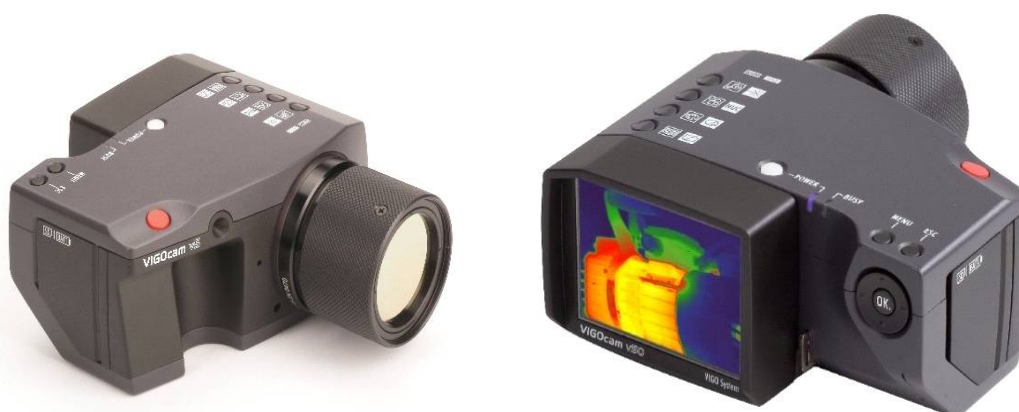
Dodatkowo czujniki wyposażone są w pamięć wewnętrzną utrzymywaną przez zasilanie bateryjne.



Rysunek 6.10. iNode beacon – czujnik temperatury

Kamera termowizyjna

Kamera termowizyjna służy do wykrywania i pomiaru energii podczerwieni obiektów. Kamera przetwarza dane termograficzne w obraz elektroniczny w oparciu o różnice temperatur, na którym przedstawiona jest pozorna temperatura powierzchni kontrolowanego obiektu w postaci obrazu termograficznego.



Rysunek 6.11 Kamera termowizyjna VIGO do badania powierzchniowego dojrzewającej mieszanki betonowej

Stacja meteorologiczna

Stacja meteorologiczna Davis Vantage Pro2 to profesjonalna, bezprzewodowa stacja pogodowa renomowanej amerykańskiej firmy Davis Instruments, wyposażona w czujniki temperatury, wilgotności, ciśnienia, opadu oraz kierunku i prędkości wiatru.



Rysunek 6.12 Lokalna stacja pogodowa

Możliwości rozbudowy systemu w przyszłości

W przyszłości planowane jest zwiększenie zakresu monitorowanych parametrów dojrzewającej mieszanki betonowej przez pomiar dodatkowych parametrów fizycznych. W czasie dojrzewania mieszanki betonowej należy docelowo przewidzieć pomiar i analizę innych



zmiennych parametrów fizycznych takich jak np. wilgotność nasłonecznienie oraz skurcz. W związku z powyższym systemy pomiarowy należałoby doposażyć w kolejne czujniki.

Zbieranie dodatkowych informacji umożliwi szerszą analizę parametrów oraz czynników wpływających na dojrzewanie mieszanki betonowej w zmiennym otoczeniu i przy obniżonej temperaturze.

Znajomości dodatkowych parametrów pozwoli doprecyzować warunki dojrzewania mieszanki betonowej dzięki czemu będziemy system doradczy będzie bardziej skuteczny co pozwoli zmniejszenie ryzyka związanego z realizacją procesów betonowych.

6.3. Przykład zastosowań systemu COLCON

Działanie systemu COLCON zilustrowano dwoma przykładami: betonowania konstrukcji masywnej (przypadek A) oraz wykonanie elementów ściennych w podgrzewanym deskowaniu (przypadek B).

PRZYPADEK A. Betonowanie konstrukcji masywnej z barytobetonu

Jednym z pierwszych zastosowań systemu COLCON było zapewnienie jakości konstrukcji masywnej. System został wykorzystany do nadzorowania zarządzania jakością procesu betonowania płyty stropowej budynku Zakładu Radioterapii w Poznaniu przy ulicy Garbary. Badana płyta wykonana była z barytobetonu, wymiary stropu 12 x 27m i grubość 1,9 m. Ze względu na dużą objętość wbudowywanego betonu całość podzielono na 2 części o wymiarze 12 x 13,5m. Proces betonowania jednego bloku trwał ok. 20 godzin, temperatura mieszanki betonowej wynosiła ok. 9-16°C (Karłowski & Paślawski, 2008), a temperatura otoczenia zmieniała się w zakresie od -6 do +2°C w zależności od pory dnia. Przebieg zmian temperatury w czasie oraz maksymalny gradient temperatury (max Grad A) przedstawiono na wykresie nr 6.15., temperatura maksymalna w wysokości 54°C została osiągnięta po ok. 100 godzinach od rozpoczęcia procesu betonowania. Producent betonu zastrzegł poufność zastosowanej receptury betonu barytowego.

Podczas betonowania konstrukcji z barytobetonu istotne były następujące kryteria:



- możliwość prawidłowego ułożenia mieszanki betonowej (przede wszystkim kolejność układania dostaw podgrzewanej mieszanki betonowej, a poza tym prawidłowe zagęszczenie betonu, itp.),
- konieczność ograniczenia ryzyka zarysowania elementu (przede wszystkim w początkowej fazie dojrzewania betonu, np. kilkadziesiąt godzin po formowaniu),
- zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie w relatywnie krótkim okresie czasu (np. ze względu na okres zimowy (styczeń 2008) czas realizacji następnych robót),
- zapewnienie odpowiednich cech betonu poza wytrzymałością (np. wodoprzepuszczalność, nasiąkliwość, mrozoodporność itp.),
- ograniczenie kosztów realizacji procesu betonowania i procesów towarzyszących (produkcja podgrzewanej mieszanki betonowej, jej dostawa i transport na miejsce wbudowania).

Kluczowym kryterium było ograniczenie ryzyka zarysowania elementu – inwestycja dotyczyła urządzania działającego na przy wykorzystaniu izotopów promieniotwórczych. W celu zapewnienia jakości w tej kwestii kierowano się maksymalnym dopuszczalnym gradientem termicznym w konstrukcji.

Celem określenia poprawności przebiegu procesu dojrzewania betonu w badanej konstrukcji masywnej zweryfikowano otrzymany gradient pionowy i poziomy w poszczególnych punktach z gradientem krytycznym (określanym w granicach ok. $1,0^{\circ}\text{C}/1\text{cm}$). w omawianym przykładzie osiągnięto następujące maksymalne gradienty:

Wewnątrz konstrukcji:

- pionowy między czujnikiem S1 a S2 na długości 0,7m Grad A = $10,56^{\circ}\text{C}$ po 76 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = $0,7\text{m} \cdot 100^{\circ}\text{C} = 70^{\circ}\text{C}$) \Rightarrow Grad A < Grad C
- poziomy między czujnikiem S3 a B3 na długości 6,3m Grad A = $34,28^{\circ}\text{C}$ po 102 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = $6,3\text{m} \cdot 100^{\circ}\text{C} = 63^{\circ}\text{C}$) \Rightarrow Grad A < Grad C na granicy betonu i otoczenia zewnętrznego,

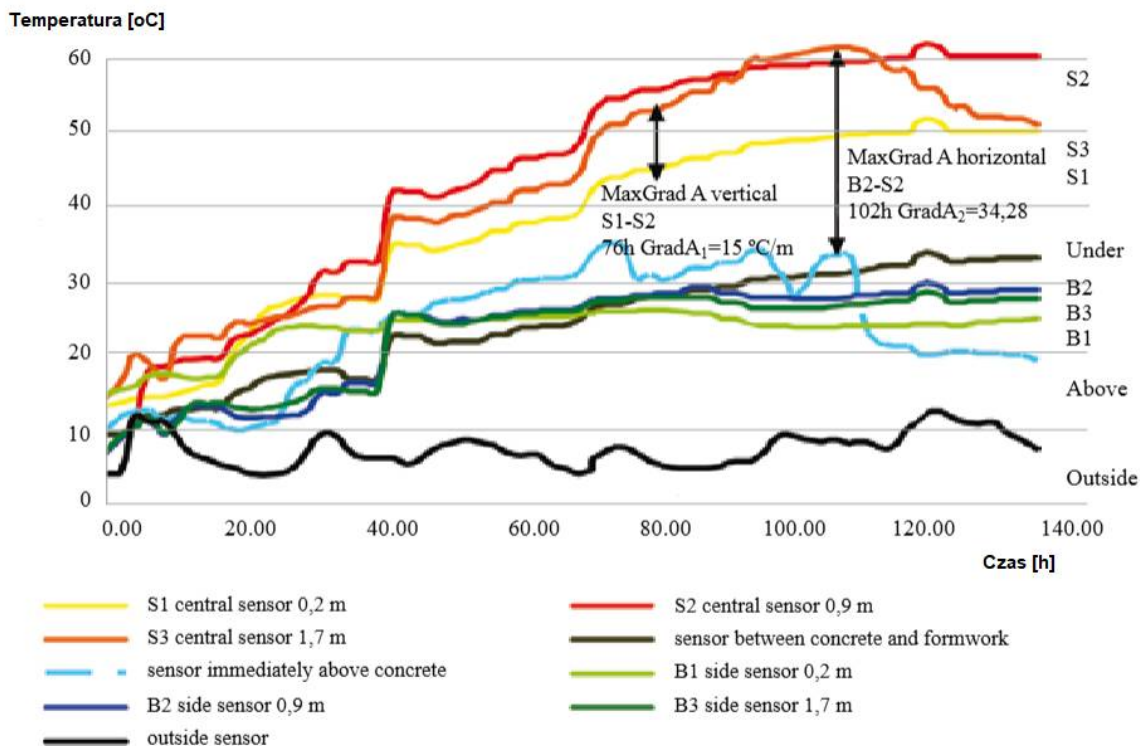


- pionowy między czujnikiem S3 a NAD na długości 0,35m Grad A = 37,36 °C po 108 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = $0,35\text{m} \cdot 100\text{ }^\circ\text{C} = 70\text{ }^\circ\text{C}$) => Grad A > Grad C
po stwierdzeniu przekroczenia Grad C rozpoczęto proces dogrzewania górnej powierzchni płyty betonowej dzięki czemu po ok. 9 godz. Grad A zmniejszył się poniżej wartości alarmowej (redukcja różnicy temperatury z 37,36 °C na 32,50 °C)
- poziomy między czujnikiem B2 a ZEW na długości 0,35m Grad A = 23,80 °C po 82 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = $0,35\text{m} \cdot 100\text{ }^\circ\text{C} = 35\text{ }^\circ\text{C}$) => Grad A < Grad C.

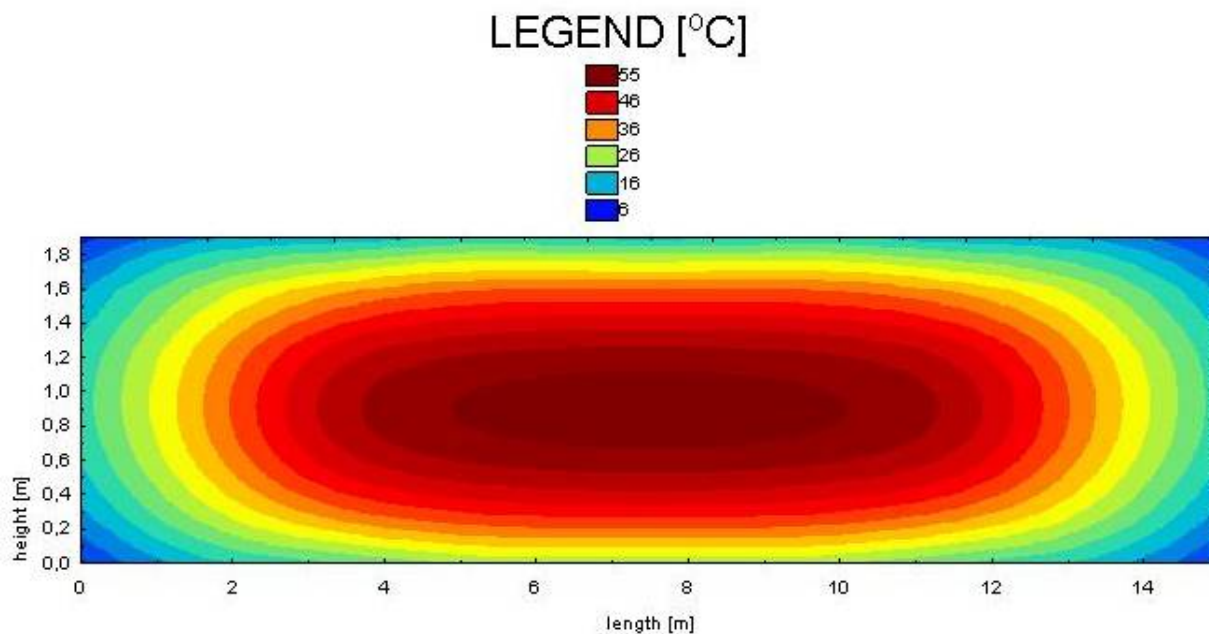
W jednym przypadku (czujnik S3) stwierdzono nieznaczne przekroczenie wartości alarmowej – dzięki podjęciu odpowiednich działań w żadnym przypadku nie przekroczone maksymalnego dopuszczalnego gradientu termicznego.

Na rys 6.14. przedstawiono wykres pól temperatury w przekroju pionowym a na rys 6.15. w przekroju poziomym, oba wykresy sporządzone zostały dla temperatury maksymalnej +54 °C, która została osiągnięta po ok. 100 godzinach od rozpoczęcia procesu betonowania.

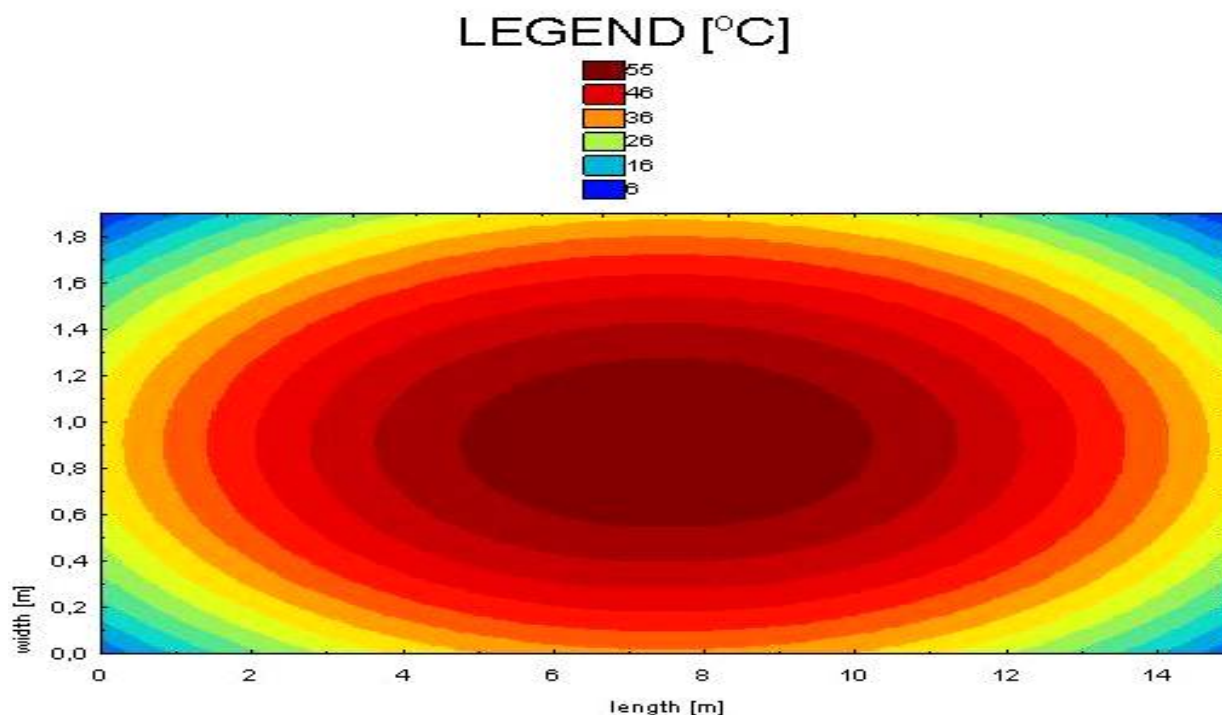
Dzięki zastosowaniu tego systemu do monitorowania procesu betonowania konstrukcji masywnej budynku Zakładu Radioterapii na czas podjęto odpowiednie kroki w celu zabezpieczenia betonu przed nadmiernym wpływem naprężeń termicznych przez zastosowanie mat izolacyjnych zapewniających ograniczenie wymiany ciepła betonowanego elementu masywnego z otoczeniem oraz ogrzewanie zewnętrznej powierzchni bloku betonowego (poprzez istniejące szachty instalacyjne). W recepturze zastosowano cement CEMIII, aby ograniczyć wydzielanie ciepła podczas dojrzewania betonu w konstrukcji monolitycznej.



Rys. 6.13. Wykres przebiegu zmian temperatury w elemencie masywnym barybetonu



Rysunek 6.14. Wykres rozkładu temperatur przekrój pionowy elementu z barybetonu



Rysunek 6.15. Wykres rozkładu przekrój poziomy elementu z barybetonu

Maksymalny gradient termiczny w przedstawionych na rys. 6.15 przekroju wynosił $0,15^{\circ}\text{C}/\text{m}$, a więc bez problemu odpowiadał postawionym wymaganiom.

Istotnym osiągnięciem w zastosowanym w tym przypadku systemie był dostęp on-line do wyników pomiarów oraz powiadomienia SMS na urządzenia mobilne w przypadku przekroczenia poziomu alarmowego gradientów termicznych w badanym elemencie.

PRZYPADEK B. Wykonanie elementów ściennych w podgrzewanym deskowaniu

Celem badania było określenie efektów zastosowania materiałów zmiennofazowych (ang. Phase Change Materials - PCM) do modyfikacji betonów cementowych w początkowej fazie dojrzewania oraz wykorzystanie możliwości zapobiegania destrukcji mrozowej w początkowym okresie dojrzewania betonu dzięki zastosowaniu deskowania z opcją nagrzewu elektrycznego (zamontowano matę grzejącą o wydajności $50\text{-}150\text{W}/\text{m}^2$).

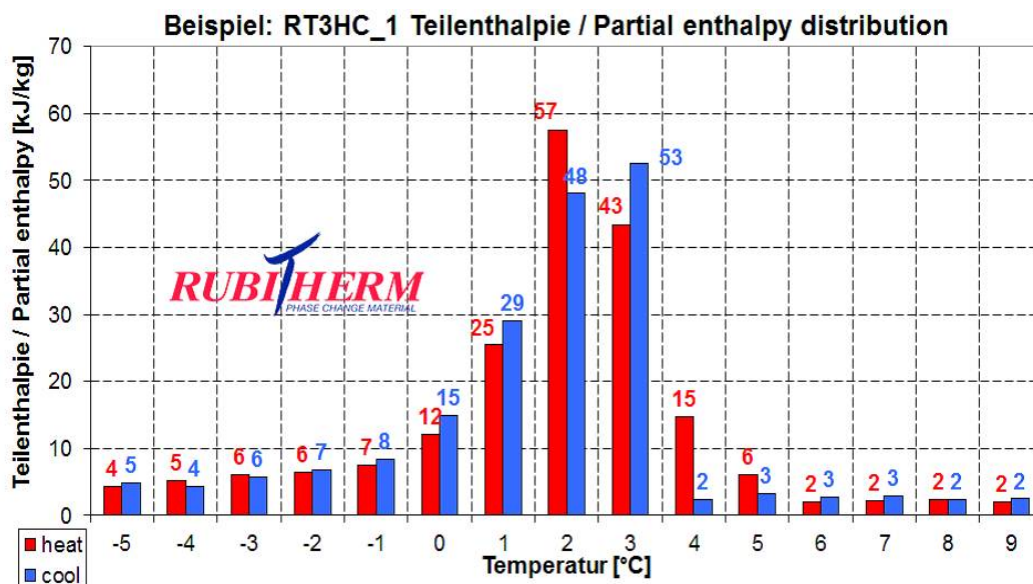
Materiały zmiennofazowe charakteryzują się relatywnie wysokim ciepłem przemiany fazowej i dzięki temu dają możliwość ograniczenia negatywnego wpływu niskiej lub/i wysokiej temperatury oddziałującej na beton w początkowej fazie jego dojrzewania.

Zastosowano beton zgodny z recepturą C35/45 W8 – recepturę przedstawiono w tablicy 6.1.

Tablica 6.1.Receptura betonu C35/45 W8

Składnik	Pochodzenie	Gęstość [kg/dm ³]	Ilość kg na 1m ³ zagęszczonego betonu
Cement CEM II A-V 42,5 N	Warta	3,1	400
Popiół lotny	BOT	2,2	
Piasek 0-2	Dąbrowa	2,65	700
Żwir 2-8	Dąbrowa	2,65	600
Żwir 2-8	Dąbrowa	2,65	500
Opóźniacz Retarder FL	Dąbrowa		
Plastyfikator Plastiment BV 1M	SIKA		2,00
Uplynniciak Sikament FM 6	SIKA		4,00

Jako materiały modyfikujące badane mieszanki zastosowano materiał RUBITHERM RT3. Materiał ten charakteryzuje się wysokim ciepłem przemiany fazowej przy temperaturze 3 °C dla RT3 – rys. 6.18.



Rysunek 6.16. Rozkład entalpii w temperaturze od -5 do +9 °C dla materiału RT3

Badania przeprowadzono w komorze klimatycznej w trzech wariantach:

- element ścienny nr 1 o grubości 20 cm z betonu zgodnie z recepturą w komorze klimatycznej symulującej warunki dojrzewania przy występującym krótkotrwałym spadku temperatury w cyklu dobowym
- element ścienny nr 2 o grubości 20 cm z betonu zgodnie z recepturą modyfikowany dodatkiem PCM w komorze klimatycznej symulującej warunki dojrzewania przy występującym krótkotrwałym spadku temperatury w cyklu dobowym
- element ścienny nr 3 o grubości 20 cm w ogrzewanej matami grzejnymi formie z betonu zgodnie z recepturą w komorze klimatycznej symulującej warunki dojrzewania przy występującym krótkotrwałym spadku temperatury w cyklu dobowym.

Zastosowany cykl dobowy zmian temperatury opisany w Tablicy 6.2. Zastosowano beton C35/45 zgodnie z tablicą 6.1.

Tablica 6.2. Dobowy cykl zmian temperatury w komorze klimatycznej

czas [h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	1
temperatura w komorze [°C]	5	4,1	3	1,5	0	-1,5	-2,7	-3,5	-4,2	-4,6	-4,9	-5	-4,9	-4,6	-4,2	-3,8	-3,3	-2,8	-2,1	-1,3	0	1,5	3	5

Dla elementu nr 1 i 2 czujniki umieszczono w elementach ściennych o grubości 20 cm na czterech poziomach: na dole, w środku wysokości i przy powierzchni górnej płaszczyzny ściany oraz ponad powierzchnią ściany - umieszczono czujniki umożliwiające monitorowanie temperatury w komorze ponad powierzchnia badanego elementu ściennego.

Dla elementu nr 3 - ogrzewane matami elektrycznymi boki formy czujniki umieszczono w elemencie ściennym o grubości 20 cm w środku elementu w pionie na czterech poziomach: na dole, w środku wysokości i przy powierzchni górnej płaszczyzny ściany oraz ponad umieszczono czujnik umożliwiające monitorowanie temperatury w komorze ponad powierzchnia badanego elementu ściennego, a poza tym dodatkowo po dwa czujniki na każdej stronie ściany z ogrzewanymi bokami.

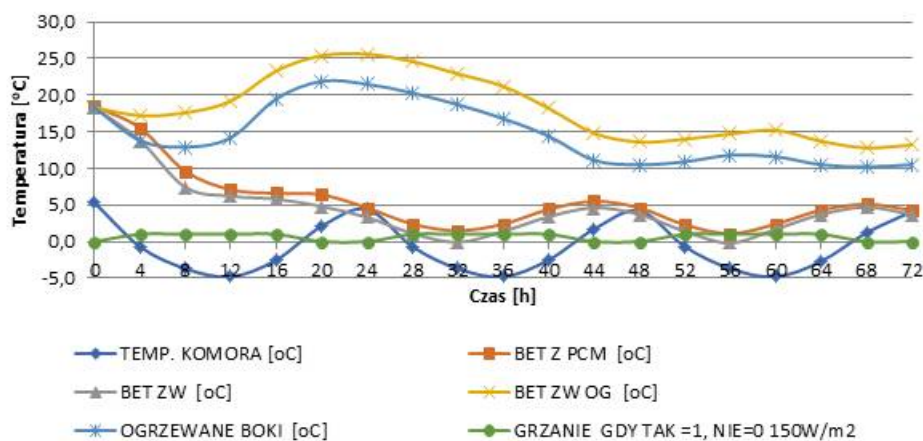
W Tabelicy 6.3. zestawiono wyniki badań trzech elementów ściennych poddanych badaniu w komorze klimatycznej wg dobowego cyklu zmian temperatury przedstawionego w Tabelicy 6.2.

Tablica 6.3. Przebieg zmian temperatury w komorze klimatycznej i badanych elementach ściennych

CZAS [h]	TEMP. KOMORA [°C]	BET Z PCM [°C]	BET ZW [°C]	BET ZW OG [°C]	OGRZEWANE BOKI [°C]	GRZANIE GDY TAK =1, NIE=0 150W/m ²
0	5,3	18,5	18,3	18,3	18,3	0,0
4	-0,7	15,5	13,8	17,2	13,8	1,0
8	-3,7	9,6	7,4	17,6	12,9	1,0
12	-4,8	7,1	6,2	19,2	14,2	1,0
16	-2,5	6,6	5,8	23,3	19,5	1,0
20	2,1	6,4	4,8	25,4	21,9	0,0
24	4,4	4,6	3,3	25,6	21,5	0,0
28	-0,7	2,4	1,1	24,6	20,3	1,0
32	-3,7	1,5	-0,1	22,9	18,7	1,0
36	-4,8	2,4	1,4	21,2	16,8	1,0
40	-2,5	4,4	3,4	18,2	14,4	1,0
44	1,7	5,5	4,6	14,8	11,1	0,0
48	4,2	4,6	3,7	13,6	10,5	0,0
52	-0,7	2,3	1,4	14,0	10,9	1,0
56	-3,7	1,1	-0,2	14,7	11,8	1,0
60	-4,8	2,4	1,7	15,2	11,6	1,0
64	-2,7	4,3	3,7	13,7	10,5	1,0
68	1,2	5,1	4,7	12,8	10,2	0,0
72	4,1	4,3	3,7	13,2	10,5	0,0

LEGENDA: BET Z PCM – element 2 (receptura z dodatkiem PCM), BET ZW – element 1 (receptura typowa), BET ZW OG – element 3 (receptura typowa + podgrzewane deskowanie)

Badanie w komorze klimatycznej



Rys. 6.17. Przebieg badania elementu ściennego w podgrzewanym deskowaniu

Powyższy wykres (rys. 6.19) przedstawia przebieg temperatury w poszczególnych punktach badanych elementów ściennych Nr 1, Nr 2 i Nr 3.

Podsumowanie

Zaprezentowane przykłady zastosowania obejmują dwa podstawowe możliwości zastosowania elastyczności przy realizacji konstrukcji betonowych w warunkach obniżonej temperatury: elastyczność bierną (odporność) i elastyczność czynną (adaptacyjność).

W przykładzie dotyczącym konstrukcji masywnej podstawowym problemem było wykorzystanie odporności. Jediną opcją umożliwiającą elastyczność czynną było uruchomienie nawiewu w szachcie wentylacyjnej przychodzącej przez betonowany element. Zastosowano nawiew ciepłym powietrzem. Jednak kluczowy omawianym wypadku był monitoring procesu w czasie rzeczywistym. Obiekt był wykonywany na przełomie roku (grudzień-styczeń), kiedy temperatura otoczenia w nocy spadała poniżej -5°C , a w dzień osiągała wartości dodatnie. Znaczna grubość elementu z jednej strony, a z drugiej – okres zimowy narzucający konieczność podgrzewania mieszanki w wytwórni – tworzyły założoną sytuację, która dzięki monitoringowi i obserwacji procesu 24 h na dobę zakończyła się sukcesem. Przykład A stanowi przykład zastosowania elastyczności biernej. Zastosowane domieszki, rodzaj cementu (CEMIII) oraz sposób betonowania konstrukcji masywnej, która podczas betonowania była osłonięta przed stratami ciepła (niska temperatura i wiatr) dawały podstawę do zastosowanie podejścia z elastycznością bierną. Zapewnia ona prawidłowy przebieg procesu pomimo pewnych (w ograniczonym zakresie, oczywiście) zmian w otoczeniu.

Przypadek B dotyczył zastosowania obu rodzajów elastyczności:

- elastyczności biernej w postaci zastosowania dodatku PCM, który zapewnia utrzymanie dodatniej temperatury mieszanki betonowej (dzięki dużej entalpii dodatku RT3, którego charakterystykę przedstawiono na rys. 6.18),
- elastyczności czynnej w postaci opcji nagrzewu deskowania matą grzejną o mocy $150\text{W}/\text{m}^2$, która została umieszczona w deskowaniu systemowym.

Idea prezentowanych badań zakładała, że przy odpowiedniej temperaturze wyjściowej (w prezentowanym przypadku wynosiła ona $+18^{\circ}\text{C}$, jednak przeprowadzono także badania, gdy



wynosiła ona +5°C) materiał zmiennofazowy może zabezpieczyć dojrzewający beton przed uszkodzeniem.

W przypadku niższej temperatury początkowej mieszanki (np. +5°C) możliwy spadek temperatury po 12 h może już być krytyczny zarówno dla receptury z PCM (Element 2), jak i dla typowej receptury mieszanki betonowej. Jeżeli spadek temperatury (zaprogramowany w komorze klimatycznej zgodnie z tabl. 6.3.) groził obniżeniem temperatury dojrzewającego w elemencie betonu załączał się system grzania deskowania. Oczywiście można ograniczyć nagrzew o sytuacji, kiedy jest on niezbędny ze względu na zagrożenie uszkodzeniem struktury młodego betonu (takie rozwiązanie bazuje na systemie symulacji procesów w betonie, np. system HACON).

Przeprowadzone badania wykazały przydatność materiałów zmiennofazowych jako dodatku do betonów cementowych dojrzewających w niekorzystnych warunkach.

Potwierdziły się oczekiwane efekty zastosowania materiałów zmiennofazowych jako modyfikatora betonu cementowego służącego do ograniczenia ryzyka przemarzania betonu dojrzewającego w warunkach nagłego obniżenia temperatury otoczenia (typowe przymrozki występujące na przełomie jesieni i zimy oraz zimy i wiosny), jednak badania wykazały, że korzystne jest w tym wypadku uzyskanie odpowiedniej temperatury wyjściowej mieszanki betonowej w zakresie ok. 18°C.

Ponadto zastosowanie ogrzewanych deskowań systemowych wykazało, że takie rozwiązanie może skutecznie zabezpieczyć beton przed przemarzaniem.

Dodatkowo badanie wykazało, że należy jeszcze odpowiednio wyregulować krzywą sterownika nagrzewu (dostosowanie sterowania do opcji oszczędzania energii elektrycznej na budowie).

W dalszych badaniach przewiduje się badania różnych elementów wykonanych z betonu towarowego na budowie z zastosowaniem systemowe deskowania np. firmy PERI z zastosowaniem opcji podgrzewania.

Rozdział 7. Wnioski

Podsumowując niniejsza rozprawę można wyciągnąć następujące wnioski ogólne, szczegółowe oraz wytyczyć kierunki dalszych badań.

7.1. Wnioski ogólne

Zastosowanie zaprezentowanego systemu COLCON pozwala na potwierdzenie postawionych na wstępie tej rozprawy:

1. Zastosowanie elastycznego, proaktywnego podejścia umożliwia osiągnięcie wymaganych efektów realizowanego w zmiennym otoczeniu procesu betonowania,
2. Monitoring procesu dojrzewania betonu i otoczenia w czasie rzeczywistym pozwala podejmować właściwe decyzje przy uwzględnieniu możliwości korekty wcześniej podjętej decyzji (wieloetapowe podejmowanie decyzji),
3. Wykorzystanie do budowy tablicy decyzyjnej programu RapidMiner pozwala na systematyczny rozwój systemu dzięki uczeniu się z przykładów.

Ponadto podsumowując w formie wniosków ogólnych należy stwierdzić, że:

- Proponowany system doradczy służy do uwzględnienia wpływu czynników ryzyka technologicznego w celu efektywnego zarządzania procesami budowlanymi na przykładzie betonowania w obniżonej temperaturze, a w szczególności sytuacji zagrożenia nagłym spadkiem temperatury otoczenia;
- Wieloetapowe podejmowanie decyzji (właściwe dla podejścia elastycznego), analiza otoczenia i procesów w toku wraz z prognozą pozwala na sukcesywne zwiększanie ilości informacji oraz przewidywanie stanu zagrożenia (i – po uruchomieniu właściwych procedur - jego uniknięcie);
- Wprowadzenie różnych opcji technologicznych umożliwia implementację elastyczności zarówno w formie aktywnej (np. elektronagrzew, podgrzewane deskowanie) , jak i pasywnej (domieszki, dodatki, odpowiedni rodzaj cementu);
- Przedstawione przykłady wskazują na różne możliwości zastosowania elastyczności dla różnych rodzajów przedsięwzięć;



- Za generalnie dominującą tendencję należy uznać dążenie do zastosowania pasywnej elastyczności (np. modyfikacja domieszkami betonu cementowego), jednak może być ona niewystarczająca ze względu na turbulentnie zmienne otoczenie – typowa strategia: elastyczność pasywna dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego i optymistycznego i elastyczności – alternatywa dla scenariusza pesymistycznego .

7.2.Wnioski szczegółowe

Wnioski szczegółowe dotyczą przede wszystkim przykładów zastosowania systemu COLCON (w rozprawie zawarto jedynie dwa przykłady).

Znaczne zróżnicowanie charakteru przedsięwzięć budowlanych wymaga dostosowania podejścia do przyjętej metody zarządzania w danym przypadku (np. betonowanie w deskowaniu ślizgowym (silos na cukier) – dominująca czynna elastyczność – ze względu na konieczność dostosowania aktualnie użytej receptury mieszanki betonowej do warunków (deskowanie musi być ciągle przesuwane, a wytrzymałość betonu musi umożliwiać obciążenie wykonanej już konstrukcji) , betonowanie konstrukcji w warunkach obniżonej temperatury (płyta postojowa/szczelna na stacji paliwowej) – elastyczność czynna i bierna (w (w przypadku scenariusza optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego – skład mieszanki z uwzględnieniem domieszek i dodatków, a w przypadku scenariusza pesymistycznego – nagrzew betonu pod osłonami lub elektronagrzew), betonowanie konstrukcji masywnej -stropu i ścian z betonu barytowego – dominacja elastyczności biernej - odporności.

1. Należy przeanalizować przedmiotowy system i dobrać odpowiednie opcje elastyczności czynnej i biernej kierując się zarówno skutecznością, jak i kosztami opcji.
2. Uczenie się z przykładów usprawnia zarządzanie procesami budowlanymi na bazie dotychczasowych doświadczeń bazujące na analizie ilości informacji w poszczególnych gałęziach drzewa decyzyjnego.



3. Proaktywne podejście umożliwia działanie wyprzedzające przewidywane zagrożenia, co ogranicza ryzyko uszkodzenia elementów i dalsze konsekwencje (rozbiórka i ponowne wykonanie).
4. W systemie doradczym na pierwszym poziomie zarządzania szczegółowej analizie poddano wpływ czynników klimatycznych na przebieg przedmiotowego procesu technologicznego, co umożliwia wyznaczanie nie tylko najbardziej sprzyjającego okresu realizacji, ale także określenie współczynników wpływu na dany proces w różnych okresach (miesiącach). Pozwala także na określenie granic pesymistycznego scenariusza (np. minimum absolutne temperatury w analogicznym okresie na podstawie reprezentatywnego 30-letniego obserwacji).
5. Na poziomie drugim sprawdziło się podejście oparte na systematycznym doskonaleniu tablicy decyzyjnej – program RapidMiner z algorytmem See5 gwarantuje wykorzystanie napływających informacji dotyczących wszystkich przypadków wraz z ich klasyfikacją.
6. Na poziomie trzecim zastosowanie zarządzania w czasie rzeczywistym daje możliwość korygowania wcześniej podjętej decyzji i uruchomienie opcji elastyczności czynnej przygotowanej (przewidzianej do uruchomienia) w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego (zagrożenie dużym ryzykiem – rozbiórka i ponowne wykonanie).

7.3. Kierunki dalszych badań

Oczywiście w przypadku tak pasjonującego tematu można wskazać kierunki dalszych badań, do których zaliczyć należy:

- Wykorzystanie przedmiotowego systemu doradczego w technologii robót betonowych, które często można zakwalifikować jako procesy krytyczne w wielu przedsięwzięciach, można poszerzyć o inne ważne procesy także zależne od warunków pogodowych, których przebieg ma istotny wpływ na powodzenie realizowanego przedsięwzięcia – np. roboty ziemne;
- Interesującym zagadnieniem wydaje się znalezienie najkorzystniejszego parytetu elastyczności aktywnej i biernej (np. modyfikacja mieszanki betonowej/nagrzew).



Z punktu widzenia kosztów i utrudnień realizacyjnych stosowanie domieszek i dodatków (aktualnie cena dodatków PCM jest relatywnie wysoka). Inną opcją są na przykład mikrosfery polimerowe;

- Z punktu widzenia kryteriów podejmowania decyzji można starać się uwzględnić nie tylko kryteria technologiczne (możliwość zapewnienia realizacji w niesprzyjających warunkach), ale także kryteria ekonomiczne czy ideę budownictwa zrównoważonego związanego ze zmniejszeniem emisji CO₂.



Bibliografia

- Alzaza, A., Ohenoja, K., Langås, I., Arntsen, B., Poikelispää, M., & Illikainen, M. (2022). Low-temperature (−10 °C) curing of Portland cement paste – Synergetic effects of chloride-free antifreeze admixture, C–S–H seeds, and room-temperature pre-curing. *Cement and Concrete Composites*, 125, 104319. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104319>
- Azenha, M., Sousa, C., Faria, R., & Neves, A. (2011). Thermo–hygro–mechanical modelling of self-induced stresses during the service life of RC structures. *Engineering Structures*, 33(12), 3442–3453. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2011.07.008>
- Ballesteros-Pérez, P., Del Campo-Hitschfeld, M. L., González-Naranjo, M. A., & González-Cruz, M. C. (2015). Climate and construction delays: Case study in Chile. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22(6), 596–621. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2015-0024>
- Baran, T., Glinicki, M. A., & Józwiak-Niedźwiedzka, D. (2016). Właściwości cementów specjalnych przeznaczonych do betonu w konstrukcjach osłonowych elektrowni jądrowych. *Cement Wapno Beton, R. 21/83, nr 4*.
- Barna, L. A., Seman, P. M., & Korhonen, C. J. (2011). Energy-Efficient Approach to Cold-Weather Concreting. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1544–1551. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000262)
- Barna, L., Jones, K., Vuyovich, C., & Shoop, S. (2019). A Comparison of Frost Depth Estimates from Ground Observations and Modelling Using Measured Values and Reanalysis Data for Vehicle Mobility. *Cold Regions Engineering 2019 - Proceedings of the 18th International Conference on Cold Regions Engineering and the 8th Canadian Permafrost Conference*, 1–7. <https://doi.org/10.1061/9780784482599.001>
- Bobrowicz J., & Bajorek G. (2006). Problemy prowadzenia robót betonowych w warunkach zimowych. *Dni betonu. Tradycja i nowoczesność: Konferencja, 9-11 października 2006*.
- Boehm, B. (2004). *Balancing Agility and Discipline: A Guide for the Perplexed* (s. 1–1). https://doi.org/10.1007/978-3-540-24675-6_1
- Bonacci, O., Željковиć, I., Trogrlić, R. Š., & Milković, J. (2013). Differences between true mean daily, monthly and annual air temperatures and air temperatures calculated with three equations: A case study from three Croatian stations. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(1–2), 271–279. <https://doi.org/10.1007/S00704-012-0830-8>
- Burgeno, J. N., & Joslyn, S. L. (2020). The impact of weather forecast inconsistency on user trust. *Weather, Climate, and Society*, 12(4), 679–694. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0074.1>
- Business Intelligence - Jerzy Surma (Książka) - Księgarnia PWN*. (b.d.). Pobrano 7 listopad 2023, z <https://ksiegarnia.pwn.pl/Business-Intelligence,68705328,p.html>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*



on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

Cervera, M., Faria, R., Oliver, J., & Prato, T. (2002). Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena. *Computers and Structures*, 80(18–19), 1511–1521.

[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00104-9)

Chatterji, S. (2003). Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cem Concr Compos*, 25(7), 759–765. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00099-9)

Choi, H., Zhang, W., & Hama, Y. (2017). Method for determining early-age frost damage of concrete by using air-permeability index and influence of early-age frost damage on concrete durability. *Construction and Building Materials*, 153, 630–639. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.140>

Chomiak-Orsa, I., & Mrozek, B. (2017a). Analiza wielkich zbiorów danych w mediach społecznościowych - perspektywa przedsiębiorcy. *Przegląd Organizacji*, nr 8, 48–55. <https://doi.org/10.33141/PO.2017.08.08>

Chomiak-Orsa, I., & Mrozek, B. (2017b). Główne perspektywy wykorzystania Big Data w mediach społecznościowych. *Informatyka Ekonomiczna / Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu*, nr 3 (45), 44–54. <https://doi.org/10.15611/IE.2017.3.04>

Chomiak-Orsa, I., & Wójcik, F. (2017). Detecting business-relevant attributes in rule-based classification. *INFORMATYKA EKONOMICZNA*, 46, 55–65. <https://doi.org/10.15611/IE.2017.4.05>

Cohen, W. W. (1993). Efficient Pruning Methods for Separate-and-Conquer Rule Learning Systems. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 115–123. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-377-6.50023-2>

Cohen, W. W. (1995). Fast Effective Rule Induction. *Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning, ICML 1995*, 115–123. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-377-6.50023-2>

Di Luzio, G., & Cusatis, G. (2013). Solidification–microprestress–microplane (SMM) theory for concrete at early age: Theory, validation and application. *International Journal of Solids and Structures*, 50(6), 957–975. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2012.11.022>

Elkady, H. M., Yasien, A. M., Elfeky, M. S., & Serag, M. E. (2019). Assessment of mechanical strength of nano silica concrete (NSC) subjected to elevated temperatures. *Journal of Structural Fire Engineering*, 10(1), 90–109. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2017-0041/FULL/XML>

Fagerlund, G. (1971). Degré critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction. *Matériaux et Constructions*, 4(No. 23), 271–285. <https://doi.org/10.1007/bf02479169>

Fagerlund, G. (1977). The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Matériaux et Constructions*, 10(4), 231–253. <https://doi.org/10.1007/BF02478694/METRICS>

García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda-Pérez, P. (2021). Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings 2021*, Vol. 11, Page 254, 11(6), 254. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11060254>



- Gawin, D., Koniorczyk, M., & Pesavento, F. (2013). Modelling of hydro-thermo-chemo-mechanical phenomena in building materials. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61(1), 51–63. <https://doi.org/10.2478/BPASTS-2013-0004>
- Gawin, D., Pesavento, F., & Schrefler, B. A. (2006). Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part I: hydration and hygro-thermal phenomena. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67(3), 299–331. <https://doi.org/10.1002/NME.1615>
- Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., Arboleda, C. A., & Lee, S. (2009). Visualization of Construction Progress Monitoring with 4D Simulation Model Overlaid on Time-Lapsed Photographs. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(6), 391–404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2009\)23:6\(391\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:6(391))
- Goryński, J. (1976). *Ekonomika Budownictwa*. PWE.
- Han, K., Degol, J., & Golparvar-Fard, M. (2017). Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 04017110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428)
- Han, K. K., & Golparvar-Fard, M. (2015). Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs. *Automation in Construction*, 53, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.007>
- Hofmann, M., Hofmann, R. K., & Klinkenberg, •. (2013). *RapidMineR RapidMineR Data Mining Use Cases and Business Analytics Applications Edited by*. www.RapidMiner.com.
- Hoła, B., Topolski, M., Szer, I., Szer, J., & Blazik-Borowa, E. (2022). Prediction model of seasonality in the construction industry based on the accidentality phenomenon. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/S43452-021-00348-7/TABLES/9>
- Instrukcja ITB 2020 WYKONYWANIE ROBÓT BUDOWLANYCH W OKRESIE OBNIŻONEJ TEMPERATURY 2020
Warszawa 2020
- Instrukcja ITB nr 395/2004 System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie, ITB, Warszawa
- Jackowska, B. (2015). Analiza kohortowa czasu istnienia mikroprzedsiębiorstw w Gdańsku. *Zarządzanie i Finanse Journal of Management and Finance*, 13(42), 439–453.
- Jasiczak, J. (1983). *Realizacja monolitycznych robót betonowych w warunkach budów zagranicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*.
- Jin, R., Zhang, H., Liu, D., & Yan, X. (2020). IoT-based detecting, locating and alarming of unauthorized intrusion on construction sites. *Automation in Construction*, 118, 103278. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103278>
- Jović, A., Brkić, K., & Bogunović, N. (2014). An overview of free software tools for general data mining. *2014 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2014 - Proceedings*, 1112–1117. <https://doi.org/10.1109/MIPRO.2014.6859735>
- Jóźwiak, H., Beton, W., Warunkach, W., Temperatur, O., Zastosowaniem, Z., & Chemicznym, D. (1998). Wykonywanie betonu w warunkach obniżonych temperatur z zastosowaniem domieszek chemicznych. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej, R. 27, nr 1(1)*, 16–26.



- Jóźwiak-Niedźwiedzka, D. (2006). Zapobieganie łuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego Cz. I - Stan wiedzy. *Drogi i Mosty*, nr 2, 37–54.
- Jóźwiak, Ireneusz; Kliszczewicz, Ryszard; Zybura, A. (2006). *Zasady projektowania konstrukcji żelbetowych na podstawie*. Wydawnictwo Arkady.
- Kaczorowska, Z. (1986). *Pogoda i klimat*. Wyd. 2 popr. Warszawa : Wydaw. Szkolne i Pedagogiczne, cop. 1986. - Centralna Biblioteka Geografii i Ochrony Środowiska. <https://www.cbgios.pan.pl/dublety/?8536,pogoda-i-klimat-zofia-kaczorowska.-wyd.-2-popr.-warszawa-wydaw.-szkolne-i-pedagogiczne-cop.-1986>.
- Kerzner, H. (2015a). Project Management 2.0: Leveraging Tools, Distributed Collaboration, and Metrics for Project Success. *Project Management 2.0: Leveraging Tools, Distributed Collaboration, and Metrics for Project Success*, 1–316. <https://doi.org/10.1002/9781119020042>
- Kerzner, H. (2015b). Project Management 2.0: Leveraging Tools, Distributed Collaboration, and Metrics for Project Success. W *Project Management 2.0: Leveraging Tools, Distributed Collaboration, and Metrics for Project Success*. <https://doi.org/10.1002/9781119020042>
- Khodri, M., Swingedouw, D., Mignot, J., Sicre, M. A., Garnier, E., Masson-Delmotte, V., Ribes, A., & Terray, L. (2017). Le climat du dernier millenaire. *Przegląd Geofizyczny*, 62(1–2), 55–82. <https://doi.org/10.4267/2042/56360>
- Kiernożycki, W. (2003). *Betonowe konstrukcje masywne*.
- Kisielnicki, J. (2005). *Zarządzanie organizacją*, Wyższa Szkoła Handlu i Prawa w Warszawie :: Ekonomiczna Księgarnia Internetowa EKI. <https://eki.pl/index.php?br1=20000&page=185&detailed=WSH036&>
- Kotwa, A. (2011). Wpływ ujemnej temperatury na właściwości młodego betonu. *Rozprawa doktorska*.
- Krupski, Rafał. (2005). *Zarządzanie przedsiębiorstwem w turbulentnym otoczeniu : praca zbiorowa*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Krylov, B. A., & Raton London New York, B. (2020). *Cold Weather Concreting*. <https://doi.org/10.1201/9781003068921>
- Kundzewicz, Z. W., Narodowy, K., Międzynarodowym Programem Zmiany Globalne Geosfery Biosfery, W., & Międzynarodowymi Programami Hydrologicznymi Zakład Badań Środowiska Rolniczego Leśnego PAN, W. (2007). *Sesja Zgromadzenia Ogólnego PAN Warszawa*. 109.
- Kuryłowicz-Cudowska, A., Chróścielewski, J., & Wilde, K. (2017). *Symulacje przepływu ciepła przez płytę betonową*. 1049–1058.
- Landau, M. (2024). *The link between extreme weather and climate change has never been more clear*. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/scientists-accurately-pinpoint-climate-contribution-extreme-weather>
- Larsson, R., & Rudberg, M. (2023). Effects of weather conditions on concrete work task productivity – a questionnaire survey. *Construction Innovation*, 23(2), 306–321. <https://doi.org/10.1108/CI-02-2021-0012/FULL/HTML>
-



- Lee, U. K., Kim, J. H., Cho, H., & Kang, K. I. (2009). Development of a mobile safety monitoring system for construction sites. *Automation in Construction*, 18(3), 258–264.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.08.002>
- Leśniak, A., Górka, M., & Skrzypczak, I. (2021). Barriers to BIM Implementation in Architecture, Construction, and Engineering Projects—The Polish Study. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2090, 14(8), 2090.
<https://doi.org/10.3390/EN14082090>
- Levitt, M. (1977). Methods of carrying out and reporting freeze/thaw tests on concrete. *Materials and Structures*, 10(No. 58), 209–215.
- Levitt, R. E. (2011). Towards project management 2.0. *Engineering Project Organization Journal*, 1(3), 197–210.
<https://doi.org/10.1080/21573727.2011.609558>
- Li, Y., Nie, L., & Wang, B. (2014). A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete. *Automation in Construction*, 37, 203–210.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.005>
- Li, Z., Wang, K., Zhou, C., & Wang, L. (2016). Modelling the true monthly mean temperature from continuous measurements over global land. *International Journal of Climatology*, 36(4), 2103–2110.
<https://doi.org/10.1002/JOC.4445>
- Liu, Y., Sun, F., Yu, K., & Yang, Y. (2020). Experimental and numerical research on development of synthetic heat storage form incorporating phase change materials to protect concrete in cold weather. *Renewable Energy*, 149, 1424–1433. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.142>
- Løhre, E., Sobkow, A., Hohle, S. M., & Teigen, K. H. (2019). Framing experts' (dis)agreements about uncertain environmental events. *Journal of Behavioral Decision Making*, 32(5), 564–578.
<https://doi.org/10.1002/BDM.2132>
- Longo, F., Padovano, A., & Umbrello, S. (2020). Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: A human-centric perspective for the design of the factory of the future. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12), 1–25. <https://doi.org/10.3390/APP10124182>
- Lu, M., Dong, Z. Y., & Saha, T. K. (2005). Transmission expansion planning flexibility. *2005 International Power Engineering Conference*, 893-898 Vol. 2. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.207035>
- Łagoda, G., & Gajda, T. (2021). Change of Mechanical Properties of Repair Mortars after Frost Resistance Rests. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/MA14123199>
- M. Fukuyama. (2018). Book Review: Society 5.0: A people-centric super-smart society. *Populasi*, 29(1), 108–109.
- Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., B, P., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100257. <https://doi.org/10.1016/J.JII.2021.100257>
- Mariak, A., Chróścielewski, J., Sabik, A., Meronk, B., & Wilde, K. (2016). MONITORING OF CONCRETE CURING IN EXTRADOSED BRIDGE SUPPORTED BY NUMERICAL SIMULATION. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 254–262. <https://doi.org/10.12913/22998624/66186>
-



- Mariak, A., & Wilde, K. (2015). Wyznaczanie wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg amerykańskiej normy ASTM C1074-11. *Materiały Budowlane, nr 4(4)*, 68–71.
<https://doi.org/10.15199/33.2015.04.19>
- Mazur, B., & Kotwa, A. (2019). Influence of Low Temperature on Concrete Properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471(3)*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032026>
- Mitchell, T. (1997). *Machine Learning (McGraw-Hill International Editions Computer Science Series): Tom M. Mitchell: 9780071154673*. 414.
- Moghimpour, & Ebrahimpour. (2014). Comparing Decision Tree Method Over Three Data Mining Software. *International Journal of Statistics and Probability, 3(3)*. <https://doi.org/10.5539/IJSP.V3N3P147>
- Moon, D., Chung, S., Kwon, S., Seo, J., & Shin, J. (2019). Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. *Automation in Construction, 98*, 322–331. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.07.020>
- Morzy T. (2013). *Eksploracja danych*. Wydawnictwo Naukowe PWN. <https://ksiegarnia.pwn.pl/Eksploracja-danych,68733470,p.html>
- Moselhi, O., & Khan, Z. (2010). Analysis of labour productivity of formwork operations in building construction. *Construction Innovation, 10(3)*, 286–303. <https://doi.org/10.1108/14714171011060088>
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 4371, 11(16)*, 4371. <https://doi.org/10.3390/SU11164371>
- Neville, A. M. (2012). *Właściwości betonu*. STOWARZYSZENIE PRODUCENTÓW CEMENTU.
- Nitheanandan, T., Cao, X., Choi, J. H., Dupleac, D., Kim, D. H., Nayak, A. K., Lele, H. G., & Rammohan, H. P. (2017). Benchmarking severe accident computer codes for heavy water reactor applications. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 3(2)*. <https://doi.org/10.1115/1.4035726/369877>
- Noreng, K. (2005). *Værbeskyttet bygging med Weather Protection Systems (WPS), Rapport 119-2005, Byggforsk, Oslo, Norway*.
- Nowotarski, P., & Paślowski, J. (2018). Lean management in small and medium-sized construction enterprises in Poland - selected results. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 27(3[81])*, 260–268.
<https://doi.org/10.22630/PNIKS.2018.27.3.25>
- Nowotarski, P., Paślowski, J., & Matyja, J. (2016). Improving Construction Processes Using Lean Management Methodologies - Cost Case Study. *Procedia Engineering, 161*, 1037–1042.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.845>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. W *Computers in Industry* (T. 83, s. 121–139). <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
- Olszak, C. M., & Batko, K. (2012). The use of business intelligence systems in healthcare organizations in Poland. *2012 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 969–976.
- Olszak, C. M., & Mach-Król, M. (2018). A Conceptual Framework for Assessing an Organization's Readiness to Adopt Big Data. *Sustainability, 10(10)*. <https://doi.org/10.3390/SU10103734>
-



- Osbert-Pociecha, G., Moroz, M., & Lichtarski, J. M. (2008). Elastyczność przedsiębiorstwa jako konfiguracja elastyczności cząstkowych. W *Gospodarka Narodowa* (Numer nr 4). [s.n.].
- Osetek, W. B., Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqwu, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. V, ... (2021). فاطمی, ح. Kształtowanie odporności betonu na działanie mrozu we współczesnej fazie dojrzewania. *Uniwersytet śląski*, 7(1), 343–354.
<https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Pasławski, J. (2009). *Elastyczność w zarządzaniu realizacją procesów budowlanych*.
- Pasławski, J. (2017). Flexible Approach for Construction Process Management Under Risk and Uncertainty. *Procedia Engineering*, 208, 114–124. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.11.028>
- Pedroza De Almeida, M. C., Gomes, N., li, B. C., Almeida, M. C. P., Cavalcanti, N. G. B., & Melo, F. J. C. (2023). Society 5.0: The Use Of Technology As A Tool For Inclusion, Sustainability, Energy Safety And Quality Of Life. *Boletim do Tempo Presente*, 12(02), 16–28.
- Powers, T. C. (1945). A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 41(1). <https://doi.org/10.14359/8684>
- POWERS, T. C. (1958). Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(1), 1–6. <https://doi.org/10.1111/J.1151-2916.1958.TB13494.X>
- Powers, T. C., & Helmuth, R. A. (1953). THEORY OF VOLUME CHANGES IN HARDENED PORTLAND-CEMENT PASTE DURING FREEZING. *Highway Research Board Proceedings*, 32.
- Qaidi, S., Yahia, A., Tayeh, B. A., Unis, H., Faraj, R., & Mohammed, A. (2022). 3D printed geopolymer composites: A review. *Materials Today Sustainability*, 20, 100240.
<https://doi.org/10.1016/J.MTSUST.2022.100240>
- Racka, K. (2015). Metody eksploracji danych i ich zastosowanie. *Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Płocku. Nauki Ekonomiczne*, 143–150.
- Rao, A. S., Radanovic, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., Palaniswami, M., & Ngo, T. (2022). Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. *Automation in Construction*, 136, 104099. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.104099>
- Rosenqvist, M., Oxfall, M., Fridh, K., & Hassanzadeh, M. (2015). A test method to assess the frost resistance of concrete at the waterline of hydraulic structures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(8), 2403–2415. <https://doi.org/10.1617/S11527-014-0327-2/METRICS>
- Ross, A. M., Rhodes, D. H., & Hastings, D. E. (2008). Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. *Systems Engineering*, 11(3), 246–262. <https://doi.org/10.1002/sys.20098>
- Rucki R. (1957). *Normowanie wydajności maszyn drogowych*. Wydawnictwo Komunikacyjne, Warszawa. -1957
- Rushing, T. S., Al-Chaar, G., Eick, B. A., Burroughs, J., Shannon, J., Barna, L., & Case, M. (2017). Investigation of concrete mixtures for additive construction. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 74–80.
<https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0124>
-



- Saurin, T. A., Rooke, J., & Koskela, L. (2013). A complex systems theory perspective of lean production. *International Journal of Production Research*, 51(19), 5824–5838. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.796420>
- Sayers, T. M., Jessop, A. T., & Hills, P. J. (2003). Multi-criteria evaluation of transport options—flexible, transparent and user-friendly? *Transport Policy*, 10(2), 95–105. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00049-5)
- Shahu, R., Pundir, A. K., & Ganapathy, L. (2012). An empirical study on flexibility: A critical success factor of construction projects. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 13(3), 123–128. <https://doi.org/10.1007/S40171-012-0014-5>
- Skrodzka, W. (2013). Analiza efektywności inwestycji w spółki sektora IT. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Ekonomiczne Problemy Usług, nr 104 Europejska przestrzeń komunikacji elektronicznej. T. 1*, 249–257.
- Skrzypczak, I., Oleniacz, G., Leśniak, A., Zima, K., Mrówczyńska, M., & Kazak, J. K. (2022). Scan-to-BIM method in construction: assessment of the 3D buildings model accuracy in terms inventory measurements. *Building Research & Information*, 50(8), 859–880. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.2011703>
- Stabryła, A. (2020). *Zarządzanie strategiczne w teorii i praktyce firmy*.
- Systemy informatyczne zarządzania - Jerzy Kisielnicki (Książka) - Księgarnia PWN*. (b.d.). Pobrano 7 listopad 2023, z <https://ksiegarnia.pwn.pl/Systemy-informatyczne-zarzadzania,68733258,p.html>
- Szer, I., Błazik-Borowa, E., & Szer, J. (2017). The Influence of Environmental Factors on Employee Comfort Based on an Example of Location Temperature. *Archives of Civil Engineering*, 63(3), 163–174. <https://doi.org/10.1515/ace-2017-0035>
- Szer, I., Szer, J., Kaszubska, M., Miszczak, J., Hoła, B., Błazik-Borowa, E., & Jabłoński, M. (2021). Influence of the seasons on construction site accidents. *Archives of Civil Engineering*, 67(3), 489–504. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138067>
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Teixeira De Freitas, J. A., Cuong, P. T., Faria, R., & Azenha, M. (2013). Modelling of cement hydration in concrete structures with hybrid finite elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 77, 16–30. <https://doi.org/10.1016/J.FINEL.2013.07.008>
- Thürer, M. (2013). Hoshin Kanri for the Lean Enterprise: Developing Competitive Capabilities and Managing Profit. *Quality Management Journal*, 20(3), 70–70. <https://doi.org/10.1080/10686967.2013.11918356>
- Tomita, Y., Yoneyama, A., Choi, H., Inoue, M., Kim, J., Choi, H., & Sudoh, Y. (2020). Evaluation of Mechanical and Shrinkage Behavior of Lowered Temperatures Cementitious Mortars Mixed with Nitrite–Nitrate Based Accelerator. *Materials 2020, Vol. 13, Page 3686*, 13(17), 3686. <https://doi.org/10.3390/MA13173686>
- Trzcieliński, Stefan. (2011). *Przedsiębiorstwo zwinne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
-



- Turk, Ž., García de Soto, B., Mantha, B. R. K., Maciel, A., & Georgescu, A. (2022). A systemic framework for addressing cybersecurity in construction. *Automation in Construction*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103988>
- Turner, C. J., Oyekan, J., Stergioulas, L., & Griffin, D. (2021). Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 746–756. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3002197>
- Tworek, P. (2013). *Reakcja na ryzyko w działalności przedsiębiorstwa budowlano-montażowego*. Wydawnictwo Difin, Warszawa 2013.
- Villarini, G., Khouakhi, A., & Cunningham, E. (2017). On the impacts of computing daily temperatures as the average of the daily minimum and maximum temperatures. *Atmospheric Research*, 198, 145–150. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2017.08.020>
- Wang, D., & Zhu, H. (2011). Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3703–3708. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.04.020>
- Wang, H., Pan, Y., & Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41–52. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.03.005>
- Wawrzeńczyk, J., i, A. M.-F. B. w teorii, & 2010, undefined. (b.d.). Związek struktury porowatości betonu napowietrzonego za pomocą mikrosfer z jego mrozoodpornością. *yadda.icm.edu.pl*.
- Wawrzeńczyk, J., Molendowska, A., betonu, P. Ś.-D., & 2008, undefined. (b.d.). Wpływ zastosowania mikrosfer na jakość napowietrzenia i mrozoodporność betonów o dużej ciekłości. *dnibetonu.com*.
- Wilde, K., Mariak, A., Kurpińska, M., Meronk, B., Miśkiewicz, M., Chróścielewski, J., Sabik, A., & Groth, M. (2017). *Monitoring dojrzewania betonu skrzynki mostu MS3/B DK-16 - sekcja S3.18P*. 1–20.
- Witakowski, P., & Pawluś, D. (2005). *ZDALNY MONITORING WIZYJNY W LABORATORIUM REMOTE VIDEO MONITORING IN VIRTUAL*.
- Witakowski, Piotr. (2003). Technologia betonowania i pielęgnacja betonu na budowie Mostu Świętokrzyskiego w Warszawie. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej*.
- Witakowski, Piotr. (2009). *Teleinformatyzacja i automatyzacja prac na placu budowy : system kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP.
- Witakowski, Piotr. (2011). *Bezprzewodowe zarządzanie procesem budowlanym : system kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie*. Wydawnictwa AGH.
- Witakowski, Piotr., & Instytut Techniki Budowlanej. (2010). *Bezprzewodowy monitoring obiektów budowlanych materiały z IX Sympozjum : system kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie*. Instytut Techniki Budowlanej.
- Witakowski, T. (2000). *Decyzje w zarządzaniu przedsiębiorstwem - Księgarnia PWN*. <https://ksiegarnia.pwn.pl/Decyzje-w-zarzadzaniu-przedsiębiorstwem,68610212,p.html>
-



- Wojtkowiak, G. (2015). The role of flexibility in the management of a construction company. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia*, 2015(74/1), 321–331. <https://doi.org/10.18276/frfu.2015.74/1-27>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2021.10.006>
- Ybañez, R. S., Bautista, L. A., & De La Cruz, A. R. (2022). Virtual Project Management (VPM) in Project Execution. *American Journal of Industrial and Business Management*, 12(12), 1867–1912. <https://doi.org/10.4236/AJIBM.2022.1212102>
- Yin, S., Rodriguez-Andina, J. J., & Jiang, Y. (2019). Real-Time Monitoring and Control of Industrial Cyberphysical Systems: With Integrated Plant-Wide Monitoring and Control Framework. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 13(4), 38–47. <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2938025>
- Yoneyama, A., Choi, H., Inoue, M., Kim, J., Lim, M., & Sudoh, Y. (2021). Effect of a Nitrite/Nitrate-Based Accelerator on the Strength Development and Hydrate Formation in Cold-Weather Cementitious Materials. *Materials*, 14(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/MA14041006>
- Zhang, H. F., & Zhou, P. (2013). Design and implementation of the food shelf-life monitoring system. *Communications in Computer and Information Science*, 391 PART I, 293–303. https://doi.org/10.1007/978-3-642-53932-9_29/COVER
- Zhang, P., Chen, R. P., & Wu, H. N. (2019). Real-time analysis and regulation of EPB shield steering using Random Forest. *Automation in Construction*, 106, 102860. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.102860>
- Zhao, N. (2021). Research on the Management Mode of EPC Project of Prefabricated Building Based on BIM Technology. *OALib*, 08(07), 1–13. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107616>
- Zhao, S., Zhou, Z., Zhang, C., Wu, J., Liu, F., & Shi, G. (2023). Localization of underground pipe jacking machinery: A reliable, real-time and robust INS/OD solution. *Control Engineering Practice*, 141, 105711. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2023.105711>
- Zhong, D., Du, R., Cui, B., Wu, B., & Guan, T. (2018). Real-Time Spreading Thickness Monitoring of High-core Rockfill Dam Based on K-nearest Neighbor Algorithm. *Transactions of Tianjin University*, 24(3), 282–289. <https://doi.org/10.1007/s12209-017-0115-5>
- Zhong, D., Liu, D., & Cui, B. (2011). Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam. *Science China Technological Sciences*, 54(7), 1906–1913. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4429-6>



Załączniki

Dokumentacja fotograficzna

Dokumentacja fotograficzna

Badania terenowe



Fotografia nr B1. Analiza przebiegu zmian temperatury w stropie żelbetowym

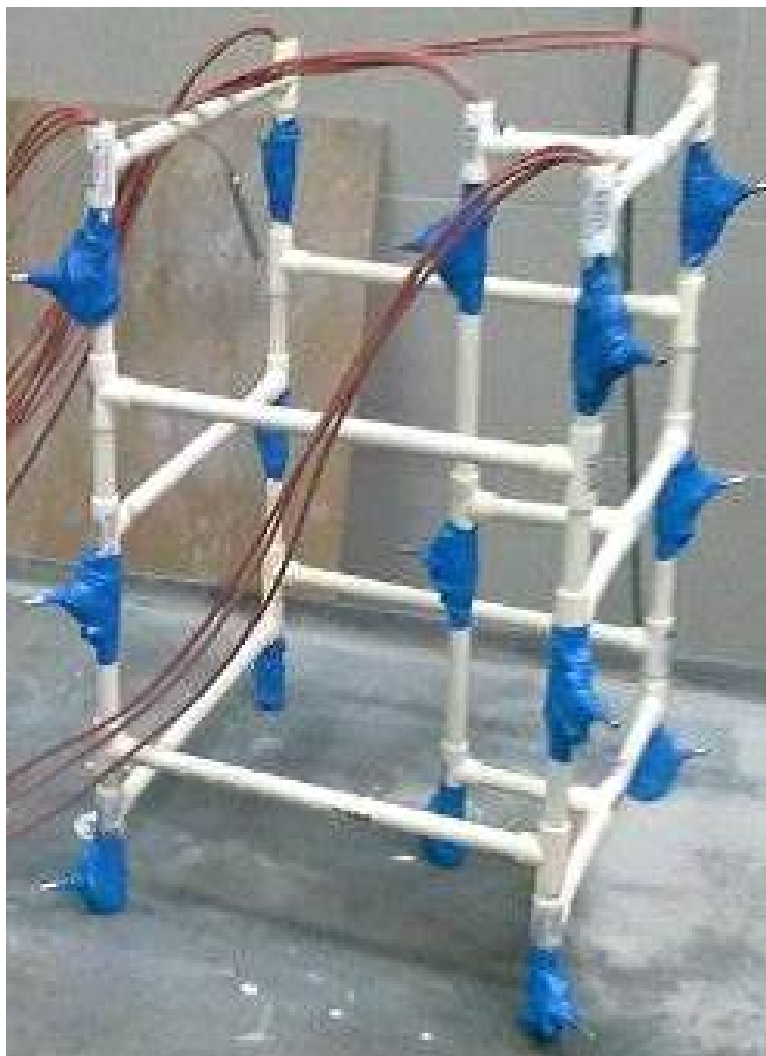
Czujniki przewodowe



Fotografia nr B2. Analiza przebiegu zmian temperatury w stropie żelbetowym

Czujniki bezprzewodowe

Badania laboratoryjne



Fotografia nr L1. Przykładowe rozwiązania rozmieszczenia czujników pomiarowych



**Fotografia nr L2. Formy do wykonania elementu ściany z elektronagrzewem
Oraz z dwoma rodzajami mieszanki bez modyfikacji oraz modyfikowana PCM**

Fotografia nr L3. System elektronagrzewu ze sterowaniem Rasbery Pi



Płyta betonowa z elektronagrzewem powierzchniowym zewnętrznym



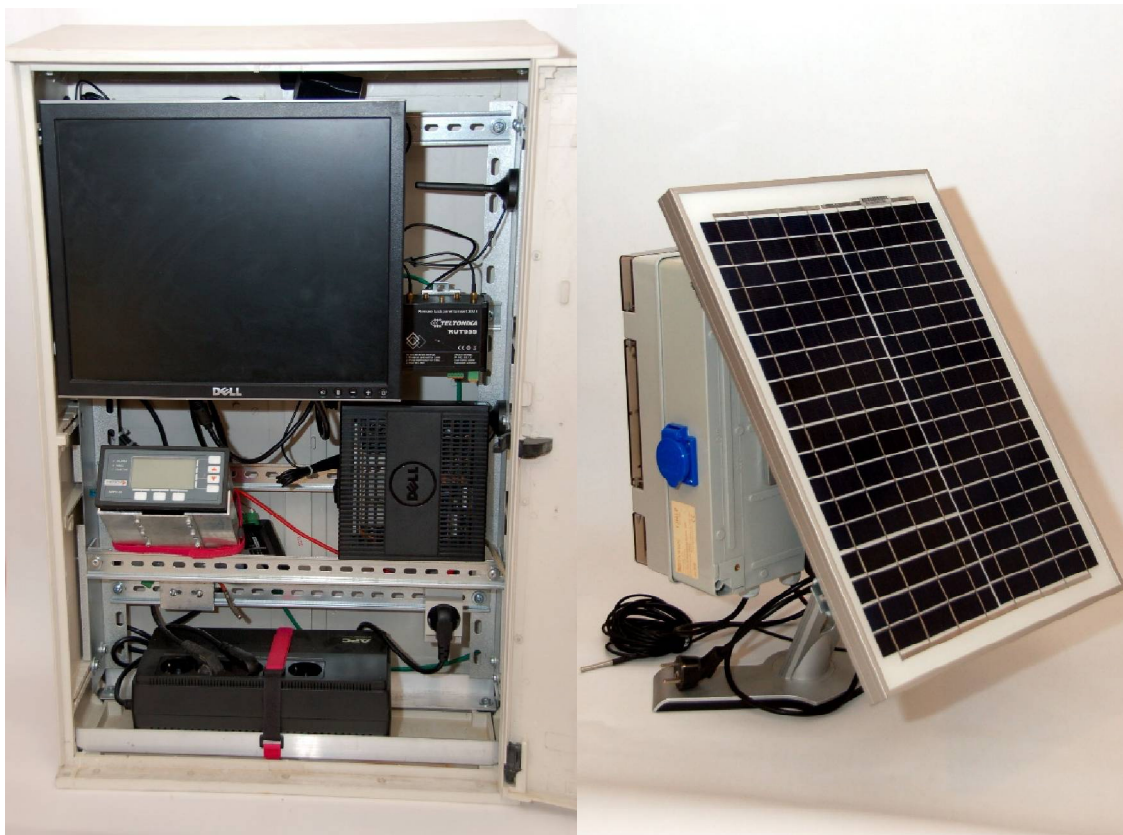
Płyta betonowa z elektronagrzewem wewnętrznym

Fotografia nr 4. Analiza przebiegu zmian temperatury

Element płyta betonowa porównanie zastosowania czujników przewodowych z rejestratorem KRT-806 GSM oraz bezprzewodowych typu Beacon w systemie Inode



Fotografia nr 5. Terenowe systemy pomiaru temperatury



Autonomiczne szafy pomiarowe wykorzystywane w czasie pomiarów na terenie budowy



Zestawienie wyników badań terenowych i laboratoryjnych

Przedstawiono w załącznikach w postaci danych tabelarycznych i wykresów