



# Uniwersalny wskaźnik jakości tektury falistej oparty na popularnych testach laboratoryjnych z normalizacją względem gramatury i kosztu

## A universal quality index for corrugated board based on common laboratory tests with basis-weight and cost normalization

TOMASZ GARBOWSKI, JULIA GRACZYK

DOI: 10.15199/54.2026.1.1

W praktyce przemysłowej ocena jakości tektury falistej opiera się na zestawie testów mechanicznych, które opisują różne aspekty jej zachowania: odporność na zgniatanie krawędziowe (ECT), sztywność na zginanie w kierunkach MD/CD (BNT), właściwości ścinania poprzecznego w MD/CD (TST) oraz podatność na deformacje związane z uszkodzeniem struktury (SST). Brak jednoznacznego, uniwersalnego parametru skalarnego utrudnia porównywanie wyrobów różnych producentów oraz ocenę efektywności konstrukcji o odmiennej liczbie warstw (np. 3- i 5-warstwowych). W pracy zaproponowano wskaźnik jakości CQI (Corrugated Quality Index), integrujący wyniki testów ECT, BNT, TST oraz SST w jeden miernik umożliwiający ranking materiałów w sposób możliwie niezależny od specyficznej technologii wytwarzania. Kluczowym założeniem jest normalizacja wyników względem gramatury całkowitej, dzięki czemu CQI opisuje efektywność mechaniczną „na jednostkę materiału”, a nie jedynie bezwzględny poziom nośności. Wskaźnik uwzględniła ponadto kierunkowość MD/CD poprzez agregację geometryczną oraz penalizację nadmiernej anizotropii. Aby umożliwić bezpośrednie porównania między firmami bez znajomości wartości referencyjnych, zaproponowano skalowanie zmiennych w oparciu o logarytmiczne wyniki typu z-score w obrębie zbioru porównawczego. Dodatkowo wprowadzono karę za obniżone wartości SST, interpretowane jako marker przegniecenia i inicjacji delaminacji flutingu, które prowadzą do pogorszenia współpracy warstw. Wskaźnik może być rozszerzony o komponent ekonomiczny poprzez uwzględnienie ceny jednostkowej odniesionej do gramatury. Zaproponowana metodyka stanowi użyteczne narzędzie do benchmarkingu jakości tektury falistej, wspierając dobór materiału pod kątem nośności, stabilności oraz opłacalności.

**Słowa kluczowe:** tektura falista, wskaźnik jakości CQI, ECT, BNT/TST/SST, normalizacja gramaturą i kosztem

In industrial practice, corrugated board quality is assessed using a set of mechanical tests that capture different aspects of structural response: edgewise crushing resistance (ECT), bending stiffness in MD/CD directions (BNT), transverse shear performance in MD/CD (TST), and shear-related deformation sensitivity associated with structural damage (SST). The lack of a single, universal scalar indicator makes it difficult to compare products from different manufacturers and to objectively evaluate the efficiency of designs with different ply numbers (e.g., single-wall vs double-wall boards). This study introduces a Corrugated Quality Index (CQI), which integrates ECT, BNT, TST, and SST results into a single metric suitable for material ranking and benchmarking. The core concept relies on normalizing all mechanical outcomes with respect to the total basis weight, so that CQI reflects mechanical efficiency “per unit material” rather than merely absolute performance, enabling fair comparisons between lighter and heavier grades. Directional effects (MD/CD) are incorporated through geometric aggregation and an explicit penalization of excessive anisotropy. To allow cross-company evaluation without relying on unknown reference values, the proposed framework employs logarithmic z-score scaling computed within the benchmarking dataset. Furthermore, an SST-based damage penalty is introduced, as reduced SST values are commonly associated with creasing-induced degradation and the initiation of flute delamination, which undermines interlayer cooperation. The index can be extended with an economic component by incorporating unit cost normalized by basis weight. The proposed methodology provides a practical and scientifically consistent tool for corrugated board benchmarking, supporting material selection with respect to load capacity, structural stability, and cost-effectiveness as a transparent tool for preliminary design and comparative studies of new cores in corrugated boards.

**Keywords:** corrugated board, quality index (CQI), ECT, BNT/TST/SST, basis-weight and cost normalization

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl; ORCID: 0000-0002-9588-2514), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu;  
inż. **J. Graczyk** (julia.graczyk@student.put.poznan.pl), Instytut Analizy Konstrukcji, Politechnika Poznańska



## Wprowadzenie

Tektura falista pozostaje podstawowym materiałem konstrukcyjnym w opakowaniach transportowych i e-commerce, a jej jakość jest determinowana zarówno przez parametry surowcowe, jak i przebieg procesów produkcyjnych, magazynowania oraz przetwarzania (konwertingu) [5, 25]. W praktyce przemysłowej ocena właściwości tektury opiera się na zestawie testów mechanicznych, z których każdy opisuje inny mechanizm pracy materiału [22]. Test ECT dostarcza informacji o odporności na zgniatanie krawędziowe i jest bezpośrednio kojarzony z nośnością opakowań w ścisaniu [21, 28, 30]. Próby zginania (BNT) w kierunkach maszynowym i poprzecznym (MD/CD) odzwierciedlają sztywność paneli i ich podatność na lokalne deformacje, mające znaczenie dla stabilności pudełek [18, 20]. Z kolei testy ścinania poprzecznego (TST) i ścinania/skręcania (SST) pozwalają uchwycić wpływ odkształceń postaciowych, współpracy warstw oraz degradacji struktury, które nie zawsze są widoczne w wynikach ECT i BNT [7, 17, 23].

Mimo powszechnego stosowania powyższych badań, wciąż brakuje jednego, uniwersalnego parametru skalarnego, który syntetycznie łączyłby wyniki różnych testów w spójną ocenę jakości tektury [2, 3]. W rezultacie decyzje technologiczne i zakupowe podejmowane są często na podstawie pojedynczych wskaźników lub intuicyjnej interpretacji kilku niezależnych wyników, co utrudnia jednoznaczne porównywanie materiałów pochodzących od różnych producentów oraz ocenę konstrukcji o odmiennej liczbie warstw (np. 3- i 5-warstwowych) [19]. Problem staje się szczególnie istotny w kontekście dążenia do redukcji gramatury i kosztu przy zachowaniu wymaganej nośności, gdzie materiał „lżejszy” może okazać się jednocześnie bardziej efektywny konstrukcyjnie [8, 9, 26].

Dodatkowym wyzwaniem jest wpływ przegniecenia oraz lokalnej degradacji struktury tektury, które mogą pojawiać się podczas produkcji, transportu lub konwertingu [4, 10, 11]. W takich przypadkach obserwuje się często spadek sztywności postaciowej, związanej z inicjacją rozwarstwienia (delaminacji) w obrębie flutingu oraz osłabieniem współpracy warstw [12, 29]. W praktyce oznacza to, że tektura może prezentować pozornie akceptowalne wartości niektórych parametrów, podczas gdy jej zachowanie w rzeczywistych warunkach użytkowania ulega wyraźnemu pogorszeniu [1, 6, 27]. Z tego względu szczególnie wartościowe staje się włączenie do oceny wskaźników czułych na uszkodzenie struktury, w tym testu SST [13].

Celem niniejszej pracy jest zaproponowanie uniwersalnego wskaźnika jakości CQI (Corrugated Quality Index), integrującego wyniki testów ECT, BNT, TST oraz SST w jeden skalarny miernik umożliwiający ranking i benchmarking tektury falistej. W odróżnieniu od podejść wymagających wartości referencyjnych, charakterystycznych dla danego producenta, przyjęto normalizację opartą wyłącznie na gramaturze całkowitej (oraz opcjonalnie na cenie jednostkowej), co umożliwi porównywanie wyrobów pochodzących z różnych źródeł [14]. Zaproponowany wskaźnik łączy kierunki MD/CD w sposób uwzględniający zarówno poziom właściwości, jak i anizotropię,

a ponadto zawiera mechanizm kary za obniżone wartości SST, interpretowane jako marker przegniecenia i inicjacji delaminacji flutingu [15]. Opracowana metodyka może stanowić praktyczne narzędzie wspierające dobór materiału w zależności od wymagań wytrzymałościowych oraz kryteriów ekonomicznych.

W pracy zaproponowano nowy wskaźnik CQI, który integruje wyniki ECT, BNT (MD/CD), TST (MD/CD) oraz SST w jeden skalarny miernik jakości, umożliwiający bezpośrednie porównania produktów różnych producentów [16, 24]. Kluczową cechą metody jest normalizacja wyłącznie względem gramatury (oraz opcjonalnie ceny), bez potrzeby definiowania wartości referencyjnych  $X_0$ , dzięki czemu wskaźnik opisuje efektywność mechaniczną „na jednostkę materiału”. Dodatkowo uwzględniono karę za obniżone wartości SST, pozwalającą wykrywać degradację struktury związaną z przegnieceniem i inicjacją delaminacji flutingu.

## Materiały i metody

### Zestaw testów i wielkości wejściowe

Do konstrukcji wskaźnika jakości CQI wykorzystano wyniki standardowych testów mechanicznych stosowanych do charakteryzacji tektury falistej:

- ECT – odporność na zgniatanie krawędziowe, oznaczona jako *ECT*
- BNT – sztywność na zginanie w kierunkach MD i CD, oznaczona jako  $B_{MD}$  oraz  $B_{CD}$ ,
- TST – charakterystyka ścinania poprzecznego w kierunkach MD i CD, oznaczona  $T_{MD}$  oraz  $T_{CD}$ ,
- SST – parametr ścinania/skręcania wrażliwy na degradację struktury, oznaczony jako *SST*.

Ponadto w analizie uwzględniono:

- gramaturę całkowitą tektury  $BW$  [g/m<sup>2</sup>],
- opcjonalnie koszt jednostkowy  $C$  [PLN/m<sup>2</sup>] lub inna zgodna miara ekonomiczna.

Wszystkie wielkości mechaniczne mogą mieć jednostki typowe dla danego testu (np. *ECT* w kN/m), ponieważ w dalszej części zostaną przekształcone do postaci porównywalnej.

### Normalizacja względem gramatury (efektywność „na jednostkę materiału”)

Aby umożliwić porównywanie tektur o różnej liczbie warstw (np. 3W i 5W) oraz produktów różnych producentów, wprowadzono normalizację wyników wyłącznie względem gramatury całkowitej. Dla każdego testu zdefiniowano wielkości efektywne w postaci:

$$ECT_e = \frac{ECT}{BW^{\alpha_E}}, \quad SST_e = \frac{SST}{BW^{\alpha_S}} \quad (1)$$

$$B_{MD,e} = \frac{B_{MD}}{BW^{\alpha_B}}, \quad B_{CD,e} = \frac{B_{CD}}{BW^{\alpha_B}} \quad (2)$$

$$T_{MD,e} = \frac{T_{MD}}{BW^{\alpha_T}}, \quad T_{CD,e} = \frac{T_{CD}}{BW^{\alpha_T}} \quad (3)$$



gdzie  $\alpha_E, \alpha_B, \alpha_T, \alpha_S$  są wykładnikami normalizacji. W najbardziej praktycznym wariancie przyjęto  $\alpha = 1$ , co odpowiada interpretacji „wynik na gramaturę”. Jednocześnie dopuszcza się stosowanie wykładników  $\alpha \neq 1$  w przypadku kalibracji na dużej bazie danych (np. w celu ujęcia nieliniowej zależności wybranych parametrów od gramatury).

### Agregacja kierunków MD/CD oraz penalizacja anizotropii

Właściwości BNT i TST są mierzone w kierunkach MD i CD, co wymaga agregacji do postaci skalarniej. Zastosowano agregację geometryczną, zapewniającą symetryczne traktowanie obu kierunków oraz ograniczenie dominacji jednej składowej:

$$B_e = \sqrt{B_{MD,e} B_{CD,e}} \cdot A_B, \quad T_e = \sqrt{T_{MD,e} T_{CD,e}} \cdot A_T \quad (4)$$

gdzie  $A_B$  oraz  $A_T$  są czynnikami redukującymi wynik w przypadku nadmiernej anizotropii (dużej różnicy pomiędzy MD i CD).

Przyjęto postać wykładniczą:

$$A_B = \exp\left(\lambda_B \left| \ln\left(\frac{B_{MD,e}}{B_{CD,e}}\right) \right|\right), \quad A_T = \exp\left(\lambda_T \left| \ln\left(\frac{T_{MD,e}}{T_{CD,e}}\right) \right|\right) \quad (5)$$

gdzie  $\lambda_B$  oraz  $\lambda_T$  są parametrami sterującymi siłą penalizacji. Dla  $\lambda = 0$  kara zanika, a agregacja redukuje się do średniej geometrycznej. Tak zdefiniowane wskaźniki  $B_e$  i  $T_e$  stanowią kompromis pomiędzy poziomem właściwości a ich zrównoważeniem kierunkowym.

### Ujednolicenie skali: transformacja logarytmiczna i standaryzacja typu z-score

Nawet po normalizacji względem gramatury poszczególne wielkości ( $ECT_e, B_e, T_e, SST_e$ ) mają różne jednostki i zakresy. Aby umożliwić ich łączenie w jednym wskaźniku, zastosowano transformację logarytmiczną i standaryzację na zbiorze porównawczym (benchmarkowym), obejmującym badane produkty (również różnych producentów).

Dla dowolnej wielkości efektywnej  $X_e$  zdefiniowano:

$$z_X = \frac{\ln(X_e) - \mu_{\ln(X_e)}}{\sigma_{\ln(X_e)}} \quad (6)$$

gdzie  $\mu_{\ln(X_e)}$  oraz  $\sigma_{\ln(X_e)}$  są średnią i odchyleniem standardowym logarytmów wyznaczonymi na zbiorze porównawczym. W konsekwencji każda składowa ma interpretację statystyczną: wartości dodatnie oznaczają wynik powyżej średniej benchmarku, a wartości ujemne – poniżej średniej.

### Konstrukcja wskaźnika CQI w postaci ważonej sumy składowych

Podstawowy wskaźnik CQI (w przestrzeni standaryzowanej) zdefiniowano jako ważoną sumę czterech składowych:

$$CQI_z = w_E \cdot z_{ECT} + w_B \cdot z_B + w_T \cdot z_T + w_S \cdot z_{SST} \quad (7)$$

gdzie:

$z_{ECT}$  jest wynikiem standaryzacji  $ECT_e$ ,

$z_B$  jest wynikiem standaryzacji  $B_e$ ,

$z_T$  jest wynikiem standaryzacji  $T_e$ ,

$z_{SST}$  jest wynikiem standaryzacji  $SST_e$ ,

natomiast  $w_E + w_B + w_T + w_S = 1$  są wagami opisującymi znaczenie poszczególnych mechanizmów.

W praktyce wagi mogą być dopasowane do konkretnego zastosowania (np. nośność pudełka, stabilność paneli, odporność na deformacje postaciowe), natomiast w pracy przyjęto wagi startowe zapewniające równowagę pomiędzy nośnością (ECT), sztywnością na zginanie (BNT), ścinaniem poprzecznym (TST) oraz wrażliwością na degradację struktury (SST).

Dla wygody interpretacyjnej wprowadzono skalę punktową:

$$Score = 50 + 10 \cdot CQI_z \quad (8)$$

gdzie wynik około 50 odpowiada średniej jakości w zbiorze porównawczym, a różnice rzędu 10 punktów oznaczają zmianę o około jedno odchylenie standardowe.

### Kara SST jako marker przegniecenia i delaminacji flutingu

Z praktycznych obserwacji wynika, że obniżone wartości SST są silnie skorelowane z przegnieceniem i degradacją struktury tektury, w tym inicjacją rozwarstwienia (delaminacji) flutingu, co prowadzi do pogorszenia współpracy warstw. W celu uwzględnienia tego efektu wprowadzono karę opartą bezpośrednio na standaryzowanej wartości  $z_{SST}$ , bez potrzeby znajomości wartości referencyjnej  $SST_0$ .

Zdefiniowano deficyt:

$$d = \max(0, z_{SST,crit} - z_{SST}) \quad (9)$$

oraz funkcję kary:

$$P_{SST} = \kappa d^p \quad (10)$$

gdzie  $z_{SST,crit}$  jest progiem aktywacji kary (np.  $-1$ , odpowiadający wartości o jedno odchylenie standardowe poniżej średniej benchmarku),  $\kappa$  steruje intensywnością kary, a  $p$  pozwala na nieliniowe wzmocnienie reakcji (np.  $p > 1$ ).

Ostatecznie wskaźnik z uwzględnieniem degradacji struktury przyjmuje postać:

$$CQI_{z,dam} = CQI_z - P_{SST} \quad (11)$$

a odpowiadający mu wynik punktowy:

$$Score_{dam} = 50 + 10 \cdot CQI_{z,dam} \quad (12)$$

Zastosowanie kary SST pozwala ograniczyć ryzyko przecenienia materiału, który uzyskuje wysokie wartości ECT lub BNT, lecz wykazuje symptomy uszkodzenia struktury (przegniecenie, delaminacja flutingu).

### Rozszerzenie ekonomiczne: uwzględnienie ceny znormalizowanej gramatury

Wariant wskaźnika ukierunkowany na ocenę opłacalności uzupełniono o komponent kosztowy. Aby uniknąć podwójnego karania za gramaturę, wprowadzono cenę znormalizowaną gramaturą:

$$P = \frac{C}{BW} \quad (13)$$



która następnie została poddana standaryzacji zgodnie z równaniem (6), co daje  $z_p$ . Wskaźnik wartościowy z uwzględnieniem ceny zdefiniowano jako:

$$CQI_{value} = CQI_z - w_p z_p \quad (14)$$

oraz analogicznie wariant z kara SST:

$$CQI_{value,dam} = CQI_{z,dam} - w_p z_p \quad (15)$$

W praktyce takie ujęcie umożliwia równoległą ocenę jakości mechanicznej i opłacalności materiału, szczególnie istotną przy porównywaniu tektur o różnej liczbie warstw oraz w procesie optymalizacji masy opakowania.

## Wyniki

### Zestaw danych i charakterystyka próbek

W celu demonstracji działania wskaźnika CQI przygotowano syntetyczny zbiór danych pomiarowych obejmujący 30 wariantów tektury falistej, reprezentujących typowe konstrukcje przemysłowe: E, B, C, A, EB, BC, EE, EC, BB oraz BE. Dla każdej próbki zdefiniowano gramaturę

całkowitą  $BW$  oraz cenę jednostkową  $C$  (w przeliczeniu na  $m^2$ ), a także wyniki testów mechanicznych:  $ECT$ ,  $BNT_{MD}$ ,  $BNT_{CD}$ ,  $TST_{MD}$ ,  $TST_{CD}$  oraz  $SST$ . Dane wejściowe zestawiono w tabeli 1.

W zbiorze celowo uwzględniono przypadki o zróżnicowanym profilu właściwości, odpowiadające obserwacjom przemysłowym: m.in. próbki o niskim  $ECT$  przy podwyższonej sztywności zginania, a także próbki o obniżonym  $SST$ , interpretowane jako potencjalnie przegniecione lub zdegradowane strukturalnie (inicjacja delaminacji flutingu i osłabienie współpracy warstw). Takie przypadki są szczególnie istotne z punktu widzenia budowy uniwersalnego wskaźnika jakości, ponieważ pojedynczy test nie zawsze ujmuje ryzyko pogorszenia zachowania tektury w warunkach rzeczywistych.

### Wielkości efektywne i ujednoczenie skali porównawczej

Zgodnie z opisaną metodyką, wyniki mechaniczne przeliczono do postaci efektywnej poprzez normalizację względem gramatury całkowitej  $BW$  (w analizie przyjęto  $\alpha = 1$ , tj. „na gramaturę”). W przypadku testów kierunkowych ( $BNT$  i  $TST$ ) zastosowano agregację MD/CD opartą na średniej geometrycznej oraz penalizację nadmiernej anizotropii, co pozwoliło uzyskać skalary  $B_e / T_e$ , zacho-

Tabela 1. Dane pomiarowe (syntetyczne) dla 30 próbek tektury: typ, gramatura, cena,  $ECT$ ,  $BNT(MD/CD)$ ,  $TST(MD/CD)$  oraz  $SST$

| ID   | TYPE | BW<br>[g/m <sup>2</sup> ] | KOSZT<br>[PLN/m <sup>2</sup> ] | ECT<br>[kNm] | BNT_MD | BNT_CD | TST_MD | TST_CD | SST    |
|------|------|---------------------------|--------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CB01 | E    | 348,4                     | 3,91                           | 4,76         | 451    | 290    | 58,6   | 37,7   | 70,18  |
| CB02 | BB   | 647,6                     | 6,51                           | 7,47         | 712    | 416    | 94,5   | 58,1   | 65,47  |
| CB03 | EB   | 609,4                     | 6,49                           | 6,56         | 729    | 342    | 84,3   | 70,3   | 92,86  |
| CB04 | EC   | 693,7                     | 8,26                           | 7,81         | 731    | 459    | 123,7  | 72,0   | 115,78 |
| CB05 | A    | 591,5                     | 6,27                           | 4,89         | 756    | 437    | 111,1  | 66,1   | 106,59 |
| CB06 | BC   | 926,5                     | 9,65                           | 9,41         | 1113   | 713    | 140,9  | 111,0  | 148,60 |
| CB07 | BC   | 903,7                     | 9,31                           | 9,43         | 1082   | 650    | 137,6  | 97,3   | 108,43 |
| CB08 | E    | 358,3                     | 3,78                           | 4,80         | 465    | 311    | 60,2   | 41,3   | 52,23  |
| CB09 | C    | 556,0                     | 5,75                           | 4,96         | 621    | 334    | 81,7   | 63,8   | 96,33  |
| CB10 | BC   | 741,1                     | 7,61                           | 8,38         | 870    | 640    | 113,9  | 63,1   | 124,33 |
| CB11 | EC   | 686,8                     | 8,12                           | 7,77         | 723    | 537    | 122,5  | 78,6   | 117,99 |
| CB12 | BB   | 611,8                     | 6,70                           | 3,99         | 835    | 395    | 89,5   | 72,8   | 109,82 |
| CB13 | EB   | 677,8                     | 7,28                           | 9,83         | 820    | 464    | 93,3   | 81,9   | 100,48 |
| CB14 | E    | 363,3                     | 4,70                           | 5,02         | 472    | 320    | 61     | 47,9   | 37,82  |
| CB15 | C    | 531,0                     | 6,12                           | 4,92         | 590    | 263    | 78,2   | 56,6   | 105,30 |
| CB16 | BE   | 652,6                     | 7,12                           | 8,30         | 846    | 583    | 98     | 80,5   | 50,98  |
| CB17 | B    | 437,8                     | 4,99                           | 5,50         | 570    | 275    | 60,5   | 45,3   | 65,54  |
| CB18 | EB   | 737,5                     | 8,12                           | 7,77         | 900    | 656    | 101,1  | 66,3   | 113,03 |
| CB19 | A    | 545,1                     | 5,85                           | 6,95         | 553    | 380    | 102,8  | 73,8   | 95,03  |
| CB20 | E    | 396,7                     | 3,93                           | 6,87         | 520    | 218    | 66,3   | 43,8   | 70,13  |
| CB21 | EE   | 534,5                     | 5,94                           | 4,62         | 668    | 268    | 83,2   | 46,8   | 94,38  |
| CB22 | A    | 606,6                     | 6,87                           | 7,93         | 622    | 287    | 113,8  | 85,2   | 107,86 |
| CB23 | B    | 468,8                     | 5,34                           | 7,71         | 614    | 361    | 64,6   | 57,8   | 77,43  |
| CB24 | BC   | 822,6                     | 8,55                           | 8,73         | 976    | 574    | 125,8  | 85,6   | 116,07 |
| CB25 | BE   | 579,6                     | 6,36                           | 6,95         | 743    | 430    | 87,5   | 69,0   | 101,29 |
| CB26 | B    | 380,2                     | 4,06                           | 4,66         | 488    | 236    | 52,9   | 31,4   | 64,24  |
| CB27 | BC   | 680,4                     | 7,28                           | 7,40         | 792    | 319    | 105,1  | 61,2   | 54,82  |
| CB28 | BB   | 704,4                     | 8,23                           | 7,90         | 781    | 515    | 102,4  | 79,0   | 132,76 |
| CB29 | EC   | 706,8                     | 8,34                           | 7,55         | 746    | 416    | 125,9  | 81,6   | 72,97  |
| CB30 | EB   | 687,1                     | 7,57                           | 7,15         | 832    | 588    | 94,5   | 60,9   | 100,95 |



wujące informację o poziomie właściwości oraz ich zrównoważeniu kierunkowym.

Następnie, aby umożliwić łączenie parametrów o różnych jednostkach i zakresach, zastosowano transformację logarytmiczną i standaryzację typu z-score w obrębie zbioru benchmarkowego. Otrzymano standaryzowane składowe:  $Z_{ECT}$ ,  $Z_B$ ,  $Z_T$  i  $Z_{SST}$ , stanowiące wspólną podstawę do wyznaczenia wartości wskaźnika złożonego. Takie ujęcie umożliwia bezpośrednie porównywanie produktów pochodzących z różnych źródeł bez konieczności znajomości wartości referencyjnych  $X_0$ , które zwykle nie są dostępne w analizach rynkowych.

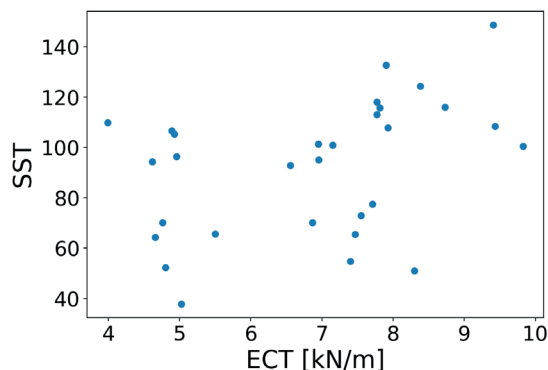
### Ranking jakości mechanicznej na podstawie Score oraz rola SST

Wartości wskaźnika złożonego  $CQI_z$  obliczono jako ważoną sumę standaryzowanych składowych (z wagami startowymi:  $w_E = 0,35$ ,  $w_B = 0,30$ ,  $w_T = 0,20$ ,  $w_S = 0,15$ ), a następnie przekształcono do skali punktowej Score. Wyniki zestawiono w tabeli 2, a uporządkowanie materiałów umożliwia bezpośrednią interpretację w kategoriach rankingu jakości.

Tabela 2. Wyniki bazowe CQI:  $CQI_z$  oraz Score (bez kary SST)

| ID   | TYPE | Score | $CQI_z$ |
|------|------|-------|---------|
| CB23 | B    | 60,6  | 1,059   |
| CB01 | E    | 58,6  | 0,858   |
| CB14 | E    | 58,2  | 0,821   |
| CB08 | E    | 57,7  | 0,772   |
| CB19 | A    | 56,2  | 0,622   |
| CB20 | E    | 56,0  | 0,602   |
| CB13 | EB   | 55,4  | 0,535   |
| CB25 | BE   | 54,5  | 0,453   |
| CB16 | BE   | 53,9  | 0,393   |
| CB11 | EC   | 53,5  | 0,347   |
| CB28 | BB   | 52,1  | 0,212   |
| CB22 | A    | 51,5  | 0,146   |
| CB06 | BC   | 51,5  | 0,147   |
| CB10 | BC   | 50,8  | 0,081   |
| CB18 | EB   | 49,9  | -0,006  |
| CB17 | B    | 49,8  | -0,020  |
| CB04 | EC   | 49,4  | -0,060  |
| CB30 | EB   | 48,7  | -0,133  |
| CB24 | BC   | 48,1  | -0,190  |
| CB05 | A    | 47,9  | -0,207  |
| CB07 | BC   | 47,7  | -0,227  |
| CB26 | B    | 46,9  | -0,309  |
| CB03 | EB   | 46,6  | -0,340  |
| CB29 | EC   | 45,2  | -0,483  |
| CB09 | C    | 45,0  | -0,505  |
| CB02 | BB   | 43,9  | -0,612  |
| CB15 | C    | 42,6  | -0,744  |
| CB12 | BB   | 41,9  | -0,808  |
| CB21 | EE   | 38,8  | -1,118  |
| CB27 | BC   | 37,1  | -1,286  |

Wyniki pokazują, że ranking nie jest determinowany wyłącznie przez jedną cechę, np. ECT, lecz stanowi kompromis pomiędzy nośnością krawędziową, sztywnością zginania, mechanizmami ścinania oraz parametrem SST, wrażliwym na degradację struktury. W konsekwencji możliwe jest wskazanie materiałów o zrównowa-



Rys. 1. Zależność pomiędzy wynikami testów ECT i SST dla analizowanych próbek (dane syntetyczne)

Tabela 3. Wyniki CQI z karą SST:  $Score_{dam}$ ,  $Z_{SST}$  oraz flaga aktywnej kary („Crushed?”)

| ID   | TYPE | $Score_{dam}$ | $Z_{SST}$ | Crushed? |
|------|------|---------------|-----------|----------|
| CB23 | B    | 60,6          | 0,39      |          |
| CB01 | E    | 58,6          | 1,20      |          |
| CB08 | E    | 57,7          | -0,12     |          |
| CB14 | E    | 56,8          | -1,50     | YES      |
| CB19 | A    | 56,2          | 0,61      |          |
| CB20 | E    | 56,0          | 0,67      |          |
| CB13 | EB   | 55,4          | -0,05     |          |
| CB25 | BE   | 54,5          | 0,62      |          |
| CB11 | EC   | 53,5          | 0,55      |          |
| CB28 | BB   | 52,1          | 0,93      |          |
| CB06 | BC   | 51,5          | 0,27      |          |
| CB22 | A    | 51,5          | 0,69      |          |
| CB10 | BC   | 50,8          | 0,45      |          |
| CB18 | EB   | 49,9          | 0,08      |          |
| CB17 | B    | 49,8          | -0,01     |          |
| CB04 | EC   | 49,4          | 0,43      |          |
| CB30 | EB   | 48,7          | -0,09     |          |
| CB24 | BC   | 48,1          | -0,25     |          |
| CB05 | A    | 47,9          | 0,75      |          |
| CB07 | BC   | 47,7          | -0,92     |          |
| CB26 | B    | 46,9          | 0,48      |          |
| CB03 | EB   | 46,6          | 0,06      |          |
| CB16 | BE   | 45,3          | -2,67     | YES      |
| CB09 | C    | 45,0          | 0,58      |          |
| CB29 | EC   | 43,6          | -1,53     | YES      |
| CB15 | C    | 42,6          | 1,14      |          |
| CB02 | BB   | 41,9          | -1,62     | YES      |
| CB12 | BB   | 41,9          | 0,73      |          |
| CB21 | EE   | 38,8          | 0,66      |          |
| CB27 | BC   | 29,5          | -2,54     | YES      |



żonym profilu właściwości, które uzyskują wysokie wyniki w ocenie „uniwersalnej”, nawet jeśli nie dominują w pojedynczym teście.

Aby zweryfikować niezależność informacji wnoszonej przez test SST, przeanalizowano zależność pomiędzy wynikami ECT i SST. Na rysunku 1 przedstawiono wykres *ECT-SST*, który wskazuje, że wysoka wartość *ECT* nie musi oznaczać jednocześnie wysokiego *SST*. Obserwuje się przypadki, w których tektura zachowuje dobre parametry nośności krawędzowej, natomiast wykazuje obniżony parametr *SST*, co może sygnalizować osłabienie współpracy warstw, przegniecenie lub inicjację delaminacji flutingu.

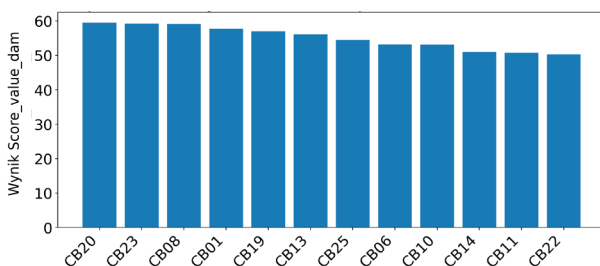
### Wpływ kary SST: identyfikacja próbek z podejrzeniem degradacji struktury

W kolejnym kroku uwzględniono karę *SST* opartą na standaryzowanej wartości  $Z_{SST}$ , aktywowaną dla materiałów odstających negatywnie od benchmarku ( $Z_{SST,crit} = -10$ ,  $\kappa = 0,40$ ,  $\rho = 1,5$ ). Otrzymano wynik  $Score_{dam}$ , który premiuje materiały o wysokiej jakości mechanicznej przy zachowaniu „zdrowej” struktury, natomiast obniża ocenę próbek o podejrzeniu degradacji postaciowej.

Zestawienie wyników po uwzględnieniu kary *SST* przedstawiono w tabeli 3. W porównaniu do rankingu bazowego, niektóre próbki ulegają wyraźnemu obniżeniu oceny, mimo że ich *ECT* lub *BNT* pozostaje na relatywnie wysokim poziomie. Interpretowane jest to jako efekt redukcji ryzyka przecenienia materiału, który może zachowywać się niekorzystnie w praktyce (np. większa podatność na deformacje i utratę współpracy warstw). Mechanizm kary *SST* pełni zatem rolę filtra diagnostycznego i stanowi istotne uzupełnienie klasycznych parametrów nośności i sztywności.

### Ocena wartościowa: integracja jakości, degradacji struktury i ceny

Wskaźnik *CQI* rozszerzono o komponent ekonomiczny bazujący na cenie jednostkowej odniesionej do gramatury  $P = C/BW$ . Takie ujęcie unika podwójnego karania materiałów cięższych, ponieważ gramatura została już uwzględniona w normalizacji mechanicznej. Otrzymano wynik końcowy  $Score_{value,dam}$ , obejmujący zarówno karę *SST*, jak i penalizację relatywnie wysokiej ceny w przeliczeniu na gramaturę.



Rys. 2. Ranking Top 12 próbek wg  $Score_{value,dam}$  (jakość + degradacja + koszt)

Tabela 4. Wyniki wartościowe:  $Score_{value,dam}$  z uwzględnieniem ceny oraz kary *SST*

| ID   | TYPE | BW [gm <sup>2</sup> ] | COST [PLN/m <sup>2</sup> ] | Score <sub>dam</sub> | Score <sub>value,dam</sub> | Crushed? |
|------|------|-----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------|
| CB20 | E    | 396,7                 | 3,93                       | 56,0                 | 59,6                       |          |
| CB23 | B    | 468,8                 | 5,34                       | 60,6                 | 59,2                       |          |
| CB08 | E    | 358,3                 | 3,78                       | 57,7                 | 59,1                       |          |
| CB01 | E    | 348,4                 | 3,91                       | 58,6                 | 57,7                       |          |
| CB19 | A    | 545,1                 | 5,85                       | 56,2                 | 57,0                       |          |
| CB13 | EB   | 677,8                 | 7,28                       | 55,4                 | 56,1                       |          |
| CB25 | BE   | 579,6                 | 6,36                       | 54,5                 | 54,5                       |          |
| CB06 | BC   | 926,5                 | 9,65                       | 51,5                 | 53,3                       |          |
| CB10 | BC   | 741,1                 | 7,61                       | 50,8                 | 53,1                       |          |
| CB14 | E    | 363,3                 | 4,70                       | 56,8                 | 51,0                       | YES      |
| CB11 | EC   | 686,8                 | 8,12                       | 53,5                 | 50,8                       |          |
| CB22 | A    | 606,6                 | 6,87                       | 51,5                 | 50,3                       |          |
| CB24 | BC   | 822,6                 | 8,55                       | 48,1                 | 50,0                       |          |
| CB07 | BC   | 903,7                 | 9,31                       | 47,7                 | 49,9                       |          |
| CB28 | BB   | 704,4                 | 8,23                       | 52,1                 | 49,9                       |          |
| CB18 | EB   | 737,5                 | 8,12                       | 49,9                 | 49,8                       |          |
| CB05 | A    | 591,5                 | 6,27                       | 47,9                 | 49,1                       |          |
| CB30 | EB   | 687,1                 | 7,57                       | 48,7                 | 48,5                       |          |
| CB17 | B    | 437,8                 | 4,99                       | 49,8                 | 48,4                       |          |
| CB26 | B    | 380,2                 | 4,06                       | 46,9                 | 47,8                       |          |
| CB03 | EB   | 609,4                 | 6,49                       | 46,6                 | 47,6                       |          |
| CB09 | C    | 556,0                 | 5,75                       | 45,0                 | 47,0                       |          |
| CB04 | EC   | 693,7                 | 8,26                       | 49,4                 | 46,5                       |          |
| CB16 | BE   | 652,6                 | 7,12                       | 45,3                 | 45,5                       | YES      |
| CB02 | BB   | 647,6                 | 6,51                       | 41,9                 | 45,0                       | YES      |
| CB12 | BB   | 611,8                 | 6,70                       | 41,9                 | 42,0                       |          |
| CB29 | EC   | 706,8                 | 8,34                       | 43,6                 | 41,0                       | YES      |
| CB15 | C    | 531,0                 | 6,12                       | 42,6                 | 40,8                       |          |
| CB21 | EE   | 534,5                 | 5,94                       | 38,8                 | 38,3                       |          |
| CB27 | BC   | 680,4                 | 7,28                       | 29,5                 | 30,3                       | YES      |

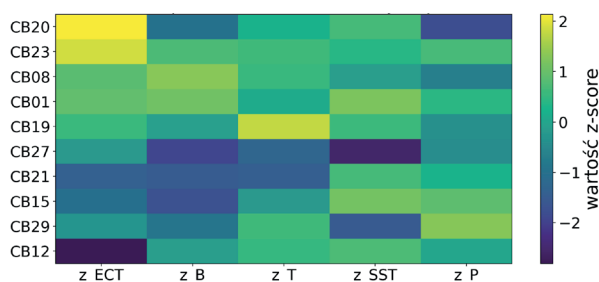
Zestawienie wyników wartościowych przedstawiono w tabeli 4, natomiast ranking najlepszych materiałów zaprezentowano na rysunku 2.

Uzyskany ranking wskazuje, że najwyższe miejsca zajmują materiały o jednocześnie dobrych parametrach mechanicznych, braku oznak degradacji (typowe lub wysokie *SST*) oraz korzystnej relacji jakości do kosztu. Z drugiej strony, próbki o wysokiej cenie w przeliczeniu na gramaturę mogą obniżyć pozycję w rankingu wartościowym mimo zadowalających parametrów mechanicznych.

### Analiza profili jakości: wykres premium Top5 vs Bottom5

Aby lepiej zinterpretować mechanizmy stojące za rankingiem, porównano profile standaryzowanych składowych pięciu najlepszych i pięciu najgorszych materiałów wg  $Score_{value,dam}$ . Na rysunku 3 przedstawiono mapę cieplną obejmującą  $Z_{ECT}$ ,  $Z_B$ ,  $Z_T$ ,  $Z_{SST}$  oraz  $Z_P$ .

Analiza profili potwierdza, że materiały o najwyższej ocenie wartościowej charakteryzują się dodatnimi lub umiarkowanie



Rys. 3. Profil cech „Top5 vs Bottom5”: wartości z-score dla składowych mechanicznych i kosztowych

dodatnimi wartościami  $z_{ECT}$ ,  $z_B$  i  $z_T$  przy braku istotnych spadków  $z_{SST}$ . Natomiast w grupie najniżej ocenianej dominują próbki o jednoczesnych deficytach w kilku składowych, przy czym szczególnie widoczny jest wpływ niskiego  $z_{SST}$  (aktywacja kary degradacyjnej). Dodatkowo, wysoki  $z_P$  (relatywnie wysoki koszt w przeliczeniu na BW) może pogłębiać spadek oceny, co podkreśla rolę kryterium ekonomicznego w rankingu wartościowym.

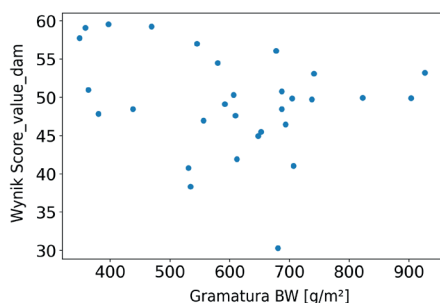
### Efekt normalizacji gramatury: „więcej papieru” nie zawsze oznacza „lepiej”

Na rysunku 4 przedstawiono zależność między gramaturą całkowitą  $BW$  a końcową oceną  $Score_{value,dam}$ . Brak jednoznacznej korelacji liniowej wskazuje, że zastosowana normalizacja względem gramatury umożliwia ocenę efektywności mechanicznej niezależnie od masy materiału. W konsekwencji tekstury o niższej gramaturze mogą osiągać wyniki porównywalne, a czasem wyższe od konstrukcji cięższych, jeśli charakteryzują się lepszą kombinacją właściwości w testach ECT/BNT/TST oraz brakiem oznak degradacji struktury identyfikowanej przez SST.

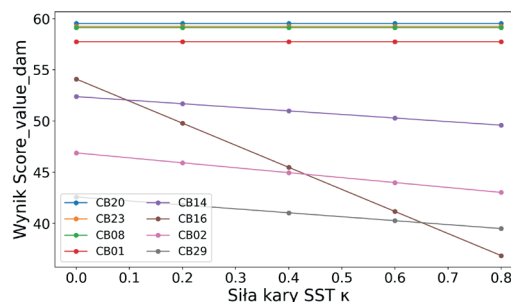
Efekt ten ma istotne znaczenie praktyczne, szczególnie w kontekście optymalizacji opakowań. Poprawa projektu tekstury (surowce, fluting, klejenie, stabilność warstw) może umożliwić redukcję gramatury i kosztu bez pogorszenia jakości użytkowej, a czasem nawet z jej poprawą.

### Wrażliwość na siłę kary SST

SST jest traktowany jako marker degradacji struktury, a zatem przeprowadzono analizę wrażliwości wyniku końcowego na para-



Rys. 4. Wartość  $Score_{value,dam}$  w funkcji gramatury  $BW$  (dane syntetyczne)



Rys. 5. Wrażliwość  $Score_{value,dam}$  na siłę kary SST ( $\kappa$ ) dla wybranych próbek (zdrowe vs „crushed”)

metr intensywności kary  $\kappa$ . Na rysunku 5 przedstawiono zmiany dla wybranych próbek w funkcji  $\kappa$ , obejmujące zarówno materiały bez aktywnej kary SST, jak i próbki z obniżonym  $z_{SST}$ .

Wyniki wskazują, że próbki o typowych wartościach SST pozostają niemal niewrażliwe na wzrost  $\kappa$ , co oznacza, że mechanizm kary nie zaburza oceny materiałów o stabilnej strukturze. Natomiast próbki o obniżonym  $z_{SST}$  wykazują wyraźny spadek wyniku wraz ze wzrostem  $\kappa$ , co pozwala sterować konserwatywnością oceny w zależności od wymagań aplikacyjnych (np. zwiększona niezawodność w transporcie dalekim lub wrażliwych łańcuchach dystrybucji).

### Podsumowanie

Na podstawie syntetycznego benchmarku potwierdzono, że proponowany CQI umożliwia spójny ranking materiałów o różnych konstrukcjach i gramaturach, integrując informacje z ECT, BNT, TST oraz SST w jeden wskaźnik. Normalizacja względem gramatury pozwala na ocenę efektywności mechanicznej „na jednostkę materiału”, natomiast mechanizm kary SST ogranicza ryzyko zawyżenia oceny materiałów o podejrzeniu degradacji struktury. Rozszerzenie o komponent ekonomiczny umożliwia ocenę wartościową, łączącą jakość użytkową z opłacalnością materiału.

## Dyskusja

### Sens fizyczny wskaźnika CQI i interpretacja składowych

Zaproponowany wskaźnik CQI integruje wyniki kilku komplementarnych testów mechanicznych, z których każdy odzwierciedla inny mechanizm pracy tekstury falistej. ECT reprezentuje odporność na zgniatanie krawędziowe i jest naturalnie kojarzony z nośnością opakowań w warunkach ściskania. Składowa BNT opisuje sztywność na zginanie paneli w kierunkach MD i CD, co ma istotne znaczenie dla odporności na deformacje i lokalne formy utraty stabilności (np. przepuklenia ścianek). Parametry TST odzwierciedlają zachowanie w ścinaniu poprzecznym, a więc mechanizmy związane z pracą rdzenia falistego i współpracą warstw w stanie złożonego odkształcenia. SST natomiast, zgodnie z obserwacjami przemysłowymi, jest szczególnie wrażliwy na degradację struktury, w tym przegniecenie i osłabienie połączeń w obrębie flutingu.



Wyniki potwierdzają, że tektura o wysokim ECT nie musi automatycznie uzyskiwać wysokiej oceny końcowej, jeśli jednocześnie wykazuje obniżoną sztywność zginania lub niekorzystne parametry ścinania. Jest to zgodne z praktyczną intuicją: nośność opakowania zależy nie tylko od odporności materiału na zgniatanie, lecz również od stabilności geometrycznej paneli i zdolności konstrukcji do przenoszenia odkształceń postaciowych bez utraty współpracy warstw. CQI w sposób syntetyczny formalizuje tę zależność, umożliwiając porównanie materiałów o różnym profilu właściwości bez ograniczania oceny do jednego parametru.

### Normalizacja względem gramatury jako warunek porównania 3W i 5W

Jednym z kluczowych elementów zaproponowanej metodyki jest normalizacja wyników testów względem gramatury całkowitej. W klasycznych porównaniach bazujących na wartościach bezwzględnych tektury cięższe (najczęściej 5-warstwowe) uzyskują przewagę wynikającą z większej ilości materiału. Takie podejście jest użyteczne w ocenie „maksymalnych osiągnięć”, jednak nie pozwala odpowiedzieć na pytanie, czy dana konstrukcja jest efektywna mechanicznie oraz czy uzyskane parametry są proporcjonalne do nakładu materiałowego.

Ujęcie efektywnościowe, tj. w przeliczeniu na gramaturę, umożliwia sytuację, w której tektura 3-warstwowa uzyskuje lepszą ocenę niż 5-warstwowa, jeśli zapewnia wyższe „osiągnięcia na jednostkę materiału”. Z perspektywy projektowania opakowań jest to szczególnie istotne w kontekście redukcji masy, optymalizacji kosztu i ograniczania śladu środowiskowego przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości. W tym sensie CQI nie jest wyłącznie wskaźnikiem „jak mocna jest tektura”, lecz wskaźnikiem „jak efektywnie przenosi obciążenia w odniesieniu do zużytego materiału”.

Zastosowanie wykładników normalizacji  $\alpha$  pozostawia możliwość dalszego dopracowania zależności skalujących, jednak w wariacie podstawowym ( $\alpha = 1$ ) wskaźnik zachowuje prostą interpretację i jest łatwy do wdrożenia w praktyce przemysłowej.

### Agregacja kierunków MD/CD i znaczenie penalizacji anizotropii

Wskaźniki BNT i TST mierzone są w kierunkach MD i CD, przy czym różnice kierunkowe są cechą naturalną materiałów papierowych. Niemniej, nadmierna anizotropia może prowadzić do problemów eksploatacyjnych: panel opakowania może wykazywać zadowalającą sztywność w jednym kierunku, a w drugim ulegać szybkim deformacjom, co sprzyja lokalnym zagnieceniom i utracie stabilności. Zastosowana agregacja geometryczna zapewnia zbalansowanie wpływu MD i CD, a czynnik penalizujący dodatkowo zmniejsza ocenę materiałów o skrajnych dysproporcjach właściwości.

Taka konstrukcja jest uzasadniona również matematycznie, ponieważ wykorzystanie miary  $|\ln(MD/CD)|$  pozwala wprowadzić symetryczną i bezwymiarową ocenę odchylenia od izotropii. W rezultacie CQI premiuje tektury o wysokich parametrach w obu kierunkach, co odpowiada wymaganiom wielu zastosowań prze-

mysłowych, szczególnie tam, gdzie orientacja arkusza w procesie konwertingu może być zmienna lub gdzie obciążenia występują w złożonych stanach.

### Standaryzacja logarytmiczna i porównywanie produktów różnych firm

Istotnym problemem w tworzeniu uniwersalnego wskaźnika jakości jest brak wspólnej skali dla różnych testów, a także brak wartości referencyjnych specyficznych dla danego producenta. Zastosowanie logarytmicznego z-score rozwiązuje oba te problemy. Po pierwsze, logarytmowanie zmniejsza wpływ wartości ekstremalnych i stabilizuje rozkłady cech. Po drugie, z-score przekształca każdą składową do wspólnej skali opisującej odchylenie od średniej benchmarku, co umożliwia ich łączenie w jednym wyrażeniu.

Warto podkreślić, że standaryzacja oparta o zbiór porównawczy ma charakter relatywny: wynik CQI informuje o pozycji materiału na tle analizowanej populacji. Z tego względu w zastosowaniach praktycznych zaleca się budowanie bazy benchmarkowej obejmującej możliwie szeroki zakres materiałów (różne gramatury, fluting, producenci, warianty surowcowe), tak aby interpretacja z-score była stabilna i reprezentatywna. W zastosowaniach kontrolnych w obrębie jednego zakładu możliwe jest natomiast ograniczenie benchmarku do materiałów z danego obszaru produkcji w celu monitorowania zmian procesu.

### Rola SST jako wskaźnika degradacji struktury i uzasadnienie mechanizmu kary

Praktyczne obserwacje wskazują, że obniżone wartości SST często korelują z przegnieceniem oraz uszkodzeniem struktury w obrębie flutingu, w tym inicjacją delaminacji. Zjawiska te prowadzą do osłabienia współpracy warstw, zwiększenia odkształceń postaciowych oraz zmniejszenia odporności na lokalne deformacje, nawet jeśli część parametrów bezwzględnych (np. ECT) pozostaje na akceptowalnym poziomie. W konsekwencji tektura może zachowywać się w sposób nieadekwatny do przewidywań opartych na pojedynczych testach.

W tym kontekście SST pełni rolę „wskaźnika zdrowia” struktury, a wprowadzenie kary opartej o  $Z_{SST}$  pozwala ograniczyć ryzyko zawyżenia oceny materiałów potencjalnie uszkodzonych. Zaproponowana kara nie wymaga znajomości wartości referencyjnej  $SST_0$ , co jest istotne w porównaniach między producentami. Zastosowanie progu aktywacji  $Z_{SST,crit}$  sprawia, że penalizacja dotyczy jedynie materiałów odstających negatywnie od benchmarku, natomiast dla tektur o typowym lub wysokim SST kara nie wpływa na wynik.

Warto zaznaczyć, że parametry kary  $k$  i  $p$  mogą być kalibrowane w zależności od oczekiwanej konserwatywności oceny. W zastosowaniach wymagających wysokiej niezawodności (np. opakowania wrażliwych produktów, długie łańcuchy transportowe) preferowane może być ostrzejsze karanie niskich SST, natomiast w zastosowaniach mniej krytycznych kara może zostać złagodzona.



### Komponent ekonomiczny i unikanie podwójnego karania za masę materiału

W wielu zastosowaniach przemysłowych decyzje materiałowe są determinowane nie tylko przez parametry mechaniczne, ale również przez koszt. Proponowane rozszerzenie wskaźnika o komponent ekonomiczny bazuje na cenie znormalizowanej gramaturą  $C/BW$ . Takie ujęcie ma istotną zaletę – gramatura została już uwzględniona w normalizacji efektywności mechanicznej, dlatego ocena kosztowa nie powinna ponownie karać jedynie za większą masę, lecz za koszt „ponad masę”, wynikający np. z rodzaju surowca, powłok, udziału włókien pierwotnych czy technologii produkcji.

Wariant wartościowy CQI umożliwia zatem wybór materiałów zapewniających korzystną relację osiągnięć do kosztu. W praktyce pozwala to rozróżnić tektury o wysokiej jakości mechanicznej, ale relatywnie drogie, od tektur oferujących bardzo konkurencyjną efektywność kosztową, co może być kluczowe w projektowaniu opakowań wielkoseryjnych.

### Ograniczenia metodyki i zalecenia wdrożeniowe

Pomimo uniwersalnego charakteru wskaźnika, należy wskazać jego ograniczenia. Po pierwsze, CQI opiera się na zestawie testów, które nie obejmują bezpośrednio wszystkich potencjalnych mechanizmów degradacji (np. wpływu wilgotności, zmian temperatury czy długotrwałego pelzania). Metodyka może jednak zostać rozszerzona o dodatkowe cechy, jeśli będą dostępne dane pomiarowe. Po drugie, zastosowanie z-score oznacza, że interpretacja wyniku zależy od doboru zbioru benchmarkowego. W praktyce wymaga to utrzymywania spójnej bazy odniesienia lub okresowej aktualizacji statystyk wraz z pojawianiem się nowych produktów na rynku. Jednocześnie taka konstrukcja jest uzasadniona w aplikacjach porównawczych, ponieważ eliminuje potrzebę znajomości „idealnych” wartości referencyjnych, które w realnych warunkach nie są dostępne.

Z perspektywy wdrożeniowej CQI może być stosowany na dwa sposoby:

- jako narzędzie benchmarkingu między dostawcami, wspierające wybór materiału pod konkretne wymagania,
- jako narzędzie kontroli jakości i monitorowania procesu, w którym trend CQI w czasie może wskazywać na stopniowe pogorszenie współpracy warstw, zwiększenie anizotropii lub ryzyko przegniecenia.

### Podsumowanie

Zaproponowano uniwersalny wskaźnik jakości CQI, integrujący wyniki testów ECT, BNT (MD/CD), TST (MD/CD) oraz SST w jeden parametr skalarny umożliwiający tworzenie rankingu tektur falistych o różnych konstrukcjach i pochodzeniu.

Kluczowym elementem metodyki jest normalizacja względem gramatury całkowitej (BW), dzięki czemu CQI opisuje efektywność mechaniczną „na jednostkę materiału”. Takie ujęcie pozwala

na uczciwe porównywanie konstrukcji 3- i 5-warstwowych oraz wykazanie przypadków, w których materiał lżejszy może charakteryzować się lepszą sprawnością konstrukcyjną.

Uwzględnienie kierunkowości MD/CD poprzez agregację geometryczną i penalizację anizotropii umożliwia ocenę tektur nie tylko pod kątem poziomu właściwości, ale również ich zrównoważenia w obu kierunkach, co ma znaczenie dla stabilności paneli i zachowania opakowania w warunkach użytkowych.

Zastosowanie transformacji logarytmicznej i standaryzacji typu z-score zapewnia wspólną skalę dla parametrów o różnych jednostkach i zakresach, umożliwiając porównywanie produktów różnych producentów bez konieczności definiowania wartości referencyjnych  $X_0$ .

Wprowadzona kara SST (oparta na  $Z_{SST}$ ) zwiększa odporność wskaźnika na przypadki degradacji struktury, ponieważ obniżone wartości SST mogą wskazywać na przegniecenie i inicjację delaminacji flutingu, prowadzące do osłabienia współpracy warstw. Mechanizm ten ogranicza ryzyko zawyżenia oceny materiałów, które uzyskują wysokie wyniki w ECT lub BNT, lecz wykazują symptomy uszkodzeń postaciowych.

Rozszerzenie CQI o komponent ekonomiczny (cena znormalizowana gramaturą,  $c/BW$ ) umożliwia ocenę opłacalności materiału bez podwójnego karania za masę, dzięki czemu wskaźnik może wspierać decyzje zakupowe i projektowe w kierunku optymalizacji kosztu przy zachowaniu wymaganej jakości mechanicznej.

Zaproponowana metodyka może być wykorzystana zarówno do benchmarkingu między dostawcami, jak i jako narzędzie kontroli jakości oraz monitorowania stabilności procesu, szczególnie w kontekście wykrywania ryzyka przegniecenia i utraty współpracy warstw w tekturze falistej.

Artykuł recenzowany

### LITERATURA

- [1] Bai Q., Wang J., Chen Y. 2019. “Investigation on the buckling behavior of corrugated cardboard plates”. *Composite Structures* 220 : 57-66. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.076.
- [2] Biancolini M.E. 2005. “Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board”. *Composite Structures* 69 (3) : 322-328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.07.014.
- [3] Di Russo F.M., Desole M.M., Gisario A., Barletta M. 2023. “Evaluation of wave configurations in corrugated boards by experimental analysis (EA) and finite element modeling (FEM): the role of the micro-wave in packaging design”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126 : 4963-4982. DOI: 10.1007/s00170-023-11397-y.
- [4] Fadji T., Coetzee C.J., Opara U.L. 2018. “Compression strength of ventilated corrugated packaging boxes: Numerical modelling approaches – A review”. *Biosystems Engineering* 166 : 57-72. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.11.011.
- [5] Frank B. 2014. “Corrugated Box Compression – A Literature Survey”. *Packaging Technology and Science* 27 (2) : 105-128. DOI: 10.1002/pts.2019.



- [6] Gallo M., Del Luongo F., Miranda S., Marra F. 2018. "Experimental and numerical study of the buckling failure of corrugated cardboard components". *International Journal of Solids and Structures* 154 : 26-37. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.06.027.
- [7] Garbowski T., Gajewski T. 2020. "Moduł ścinania poprzecznego tektury falistej | Transverse shear modulus of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 76 (2) : 103-108. DOI: 10.15199/54.2020.2.1.
- [8] Garbowski T., Borecki P. 2024. "Analysis of the impact of futuristic corrugated layer shape on mechanical properties and cost of single-wall corrugated board | Analiza wpływu futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na parametry mechaniczne i koszt trójwarstwowej tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 80 (11) : 609-615. DOI: 10.15199/54.2024.11.1.
- [9] Garbowski T. 2025. "Exploring the Future of Novel Flute Shapes and Their Mechanical Benefits". *BioResources* 20 (2) : 2003-2006. DOI: 10.15376/biores.20.2.2483-2486.
- [10] Garbowski T. 2025. "Flat crush analysis of corrugated board with futuristic fluting geometries | Analiza zgniatania płaskiego tektury falistej z warstwą pofalowaną o futurystycznych kształtach". *Przegląd Papierniczy* 81 (4) : 205-212. DOI: 10.15199/54.2025.4.1.
- [11] Garbowski T., Czelusta I., Graczyk Ł. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 1. The influence of flute crush on basic properties of corrugated board | Komputerowo wspomaganie wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej. Cz.1. Wpływ zgniecenia tektury falistej na jej podstawowe parametry". *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388. DOI: 10.15199/54.2018.6.1.
- [12] Garbowski T. 2025. "Numerical analysis of transverse shear in corrugated board with non-standard fluting geometry | Numeryczna analiza ścinania poprzecznego płyt z tektury falistej z warstwą pofalowaną o niestandardowej geometrii". *Przegląd Papierniczy* 81 (5) : 249-257. DOI: 10.15199/54.2025.5.1.
- [13] Garbowski T., Graczyk J. 2025. "Shear correction factor in corrugated board layered plates | Współczynnik korekcyjny ścinania w płytach z tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 81 (12) : 686-690. DOI: 10.15199/54.2025.12.3.
- [14] Garbowski T. 2025. "Smart transport packaging design - how to optimize safety and cost? | Inteligentne projektowanie opakowań transportowych - jak optymalizować bezpieczeństwo i koszty?". *Przegląd Papierniczy* 81 (7) : 351-358. DOI: 10.15199/54.2025.7.1.
- [15] Garbowski T. 2025. "Intelligent Corrugated Board in the Era of Industry 5.0 | Inteligentna tektura falista w erze Przemysłu 5.0". *Przegląd Papierniczy* 81 (6) : 303-313. DOI: 10.15199/54.2025.6.2.
- [16] Garbowski T. 2025. "Strength-Based Design of Corrugated Board Packaging - Numerical Models vs. Reality? | Projektowanie wytrzymałościowe opakowań z tektury falistej - modele numeryczne a rzeczywistość?". *Przegląd Papierniczy* 81 (9) : 499-508. DOI: 10.15199/54.2025.9.1.
- [17] Haj-Ali R., Choi J., Wei B.-S., Popil R., Schaepe M. 2009. "Refined nonlinear finite element models for corrugated fiberboards". *Composite Structures* 87 (4) : 321-333. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.01.031.
- [18] Hoon M.L., Park J.M. 2004. "Flexural stiffness of selected corrugated structures". *Packaging Technology and Science* 17 (5) : 275-286. DOI: 10.1002/pts.661.
- [19] Hubbe M.A. 2017. "Lightweighting of corrugated packaging: A review of the effect of paper properties on box strength". *BioResources* 12 (4) : 9403-9426.
- [20] Jamsari M.A., Jafar F.A., Nawi M.N. 2020. "Study on bending stiffness of corrugated paperboard". *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 14 (1) : 6422-6430. DOI: 10.15282/jmes.14.1.2020.19.0501.
- [21] Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Kotakowski Z. 2020. "Calculation of honeycomb paperboard resistance to EDGE crush test". *Materials* 13 (7) : 1642. DOI: 10.3390/ma13071642.
- [22] Mikami E., Ibaraki T., Kodaka I. 2005. "Optimum design of flute structure for edgewise compression of corrugated fiberboard". *Japan Tappi Journal* 59 (10) : 94-100.
- [23] Nordstrand T., Carlsson L.A. 1997. "Evaluation of transverse shear stiffness of structural core sandwich plates". *Composite Structures* 37 (2) : 145-153.
- [24] Park J., Chang S., Jung H.M. 2020. "Numerical prediction of equivalent mechanical properties of corrugated paperboard by 3D finite element analysis". *Applied Sciences* 10 (21) : 7973. DOI: 10.3390/app10227973.
- [25] Santosa S.H., Sapuan S.M. 2021. "Mechanical and physical properties of corrugated board boxes: A review". *Journal of Materials Research and Technology* 15 : 1478-1493. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.08.067.
- [26] Sliseris J., Rocens K. 2013. "Optimal design of composite plates with discrete variable stiffness". *Composite Structures* 98 : 15-23. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.11.011.
- [27] Suarez B., Muneta M.L., Sanz-Bobi J.D., Romero G. 2021. "Numerical-experimental study of the behavior of corrugated cardboard boxes under compression cycles". *Polymer Testing* 93 : 106969. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106969.
- [28] Szewczyk W. 2008. "Edge crush test of corrugated board | Odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe". *Przegląd Papierniczy* 64 (2) : 93-96.
- [29] Talbi N., Batti A., Ayad R., Guo Y.Q. 2009. "An analytical homogenization model for finite element modeling of corrugated cardboard". *Composite Structures* 88 (2) : 280-289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.04.008.
- [30] Zhang Q., Cai H., 2021. "Finite element analysis of edge crush test of corrugated board". *Packaging Technology and Science* 34 (3) : 163-172. DOI: 10.1002/pts.2543.