

VARIAȚIA DIMENSIUNILOR FIBRELOR A ȘASE SPECII DE FOIOASE TROPICALE DIN FAMILII DIFERITE ÎN CORELAȚIE CU PRODUCȚIA DE CELULOZĂ ȘI HÂRTIE

INTER-FAMILY VARIATION IN FIBRE DIMENSIONS OF SIX TROPICAL HARDWOODS IN RELATION TO PULP AND PAPER PRODUCTION

Charles ANTWI-BOASIAGO*

Dr./ Snr. Lecturer/HEAD - Department of Wood Science & Technology, Faculty of Renewable Natural Resources, Kwame Nkrumah University of Science & Technology, Kumasi-Ghana.

Tel. +233 (0) 243771376; Fax: +233 (0) 3220-60137/60375.

Email: cantwiwoasiago@gmail.com; cantwi-boasiago.fmr@knust.edu.gh

Anthony AYIMASU

BSc/Researcher - Department of Theoretical & Applied Biology, Kwame Nkrumah University of Science & Technology, Kumasi-Ghana. Tel. +233 (0)542816557

Email: tonyforchrist@yahoo.com

Rezumat:

Caracteristicile fibrelor determină posibilitățile de utilizare a speciilor lemnoase. Dimensiunile fibrelor influențează obținerea celulozei, durabilitatea și proprietățile fizico-mecanice. S-au investigat lungimea și lățimea fibrelor, lățimea lumenului și grosimea peretelui celular pentru șase specii lemnoase tropicale aparținând a trei familii (Meliaceae, Sterculiaceae and Ulmaceae) pornind de la așchii de 20×2×2mm din duramen, care au fost delignificate în acid acetic glacial 1:1 și peroxid de hidrogen (la 60°C), spălate și colorate. Lungimea fibrelor a variat de la 0.79mm pentru *Holoptelea grandis* (Ulmaceae) la 1.88mm pentru *Khaya ivorensis* (Meliaceae), similar cu media de 2mm pentru fibrele speciilor de foioase tropicale și lungimea specifică fibrelor pentru celuloză (0.65-1.2mm). Speciile din familia Meliaceae au avut o lungime a fibrelor moderată (1.61mm), cele din familia Ulmaceae o lungime medie (1.19mm), iar cele din familia Sterculiaceae de 1.59mm. Specia *Cedrella odorata* (Meliaceae) a avut fibre late (36.5μm) cu lumen de 27.6μm, *Celtis milbraedii* (Ulmaceae) a avut fibre înguste (17.49μm) cu lumen de (8.97μm), toate variind în intervalul specific fibrelor pentru celuloză (9-40μm). Peretele celular al fibrelor a variat de la 3.31μm (pentru *H. grandis*) la 5.49μm (pentru *Pterygota macrocarpa*, Sterculiaceae) adică în intervalul specific fibrelor pentru celuloză (2.90-5.15μm). Grosimea peretelui celular pentru Meliaceae și Sterculiaceae a fost gros (> 4μm) și mediu (2-4μm) pentru Ulmaceae. Raportul Runkel de la 2.65 (pentru *C. odorata*) la 3.9 (pentru *C. milbraedii*) este mai mare decât cel specific fibrelor pentru celuloză (1.25). Coeficientul de flexibilitate (între 75-50) și dimensiunile fibrelor pentru lemnul speciilor din cele trei familii indică faptul că speciile sunt potrivite pentru fabricarea celulozei. S-a preconizat ca industria construcțiilor să exploateze caracteristicile fibrelor de lemn pentru aplicații în structuri și pentru produse pe bază de

Abstract:

Fibre characteristics determine utilization potentials of timbers. Fibre dimensions influence wood pulpability, durability and physico-mechanical properties. Fibre length, width, lumen width and wall thickness of six tropical timbers from three families (Meliaceae, Sterculiaceae and Ulmaceae) were investigated from heartwood splinters (20×2×2mm) delignified in 1:1 glacial acetic acid and hydrogen peroxide [at 60°C], teased out and stained. Fibre lengths range from 0.79mm for *Holoptelea grandis* (Ulmaceae) to 1.88mm for *Khaya ivorensis* (Meliaceae) similar to the mean (2mm) for tropical hardwoods and pulpable length (0.65-1.2mm). The Meliaceae has moderately long fibres (1.61mm) but medium-sized for Ulmaceae (1.19mm) and Sterculiaceae (1.59mm). *Cedrella odorata* (Meliaceae) has wide fibres (36.5μm) and lumina (27.6μm), *Celtis milbraedii* (Ulmaceae) has narrow fibres (17.49μm) and lumen (8.97μm), all within pulpable range (i.e., 9-40μm). Fibre wall thickness ranges from 3.31μm (for *H. grandis*) to 5.49μm (for *Pterygota macrocarpa*, Sterculiaceae) and is within pulpable range (2.90-5.15μm). Fibre walls for Meliaceae and Sterculiaceae are thick (>4μm) but medium (2-4μm) for Ulmaceae. Runkel ratio of 2.65 (for *C. odorata*) to 3.9 (for *C. milbraedii*) is greater than stipulated for pulping (1.25). However, Flexibility Coefficients (within 75-50 category) and fibre dimensions for timbers from the three families indicate their pulping suitability. It is anticipated the wood and construction industries exploit their fibre characteristics for structural applications and engineering of fibre-based products.

* Autor corespondent / Corresponding author

fibre de lemn.

Cuvinte cheie: delignificare; grosimea peretelui celular al fibrelor; coeficient de flexibilitate; lăţimea lumenului; macerare; obţinerea celulozei; raport Runkel.

INTRODUCERE

Lemnul, o materie primă versatilă, ligno-celulozică, complexă, utilizată pentru numeroase aplicații, cuprinde în principal fibre (pentru rezistență), celule de parenchim (pentru depozitare de amidon) și elemente de vase (la foioase pentru conducerea apei și sărurilor minerale) (Tiemann 1951; Kollmann și Côté 1984; Haygreen și Bowyer 1996) sau traheide la rășinoase pentru rezistență, transportul apei și sărurilor minerale (Butterfield și Meylan 1980). Din punct de vedere structural, fibrele longitudinale, legate prin lignină și celule de rază orientate în direcție radială, acționează ca elemente de ranforsare pentru creșterea rezistenței lemnului (Tiemann 1951; Jozsa și Middleton 1994). Datorită celulozei și modului de aranjare, fibrele sunt încorporate în materiale compozite pe bază de lemn pentru a ranforșa matricea (Haygreen și Bowyer 1996; Dickinson 2000). Tipul, proporția și dimensiunile micro-fibrilelor influențează portanța, tenacitatea, randamentul de obținere a celulozei, precum și proprietățile fizico-mecanice ale lemnului (Wilson și White 1986). Dimensiunile fibrelor afectează conținutul lignocelulozic al lemnului și au o legătură directă cu densitatea acestuia și cu durabilitatea (Tiemann 1951; Haygreen și Bowyer 1996). Pe lângă susținere, acestea ajută lemnul să facă față la solicitările interne și externe. Folosit deseori în structuri din lemn (Tiemann 1951; Haygreen și Bowyer 1996), utilizarea acestuia este actualmente diversificată pentru a include fibrele în numeroase produse ingineresti comerciale incluzând fibre și hârtie precum și produse compozite din lemn (de ex. plăci din fibre, aşchii). Totuși, există o variație a caracteristicilor fibrelor diverselor specii care influențează utilizarea finală a acestora. Prin urmare, informația privind anatomia fibrelor ar putea fi utilizată pentru a recomanda utilizarea în practică a lemnului deoarece dimensiunile fibrelor variază de la o familie la alta (Dinwoodie 1961). În consecință, Taylor (1979) și Bhat ș.a. (1985) au lucrat cu diferite foioase (de ex. *Tectona grandis*, *Hevea brasiliensis*, *Terminalia paniculara* și *Dillenia pentagyna*) din familii diferite și au raportat variații semnificative ale lungimii fibrelor.

Manwiller (1974) a stabilit că dimensiunile fibrelor influențează selectarea speciilor de plante din diferite familii pentru scopuri variate (de ex. cherestea și produse pe bază de lemn). Spre exemplu, în fabricarea celulozei, Horn și Setterholm (1990) au raportat că morfologia fibrelor influențează în mod semnificativ proprietățile mecanice ale hârtiei,

Key words: delignification; fibre wall thickness; flexibility coefficient; lumen width; maceration; pulping; Runkel ratio.

INTRODUCTION

Wood, a versatile ligno-cellulosic complex raw material employed for several applications, comprises mainly fibres (for mechanical support), parenchyma (for storage of starch) and vessel elements (in hardwoods for water and mineral salt conduction) (Tiemann 1951; Kollmann and Côté 1984; Haygreen and Bowyer 1996) or tracheids in softwood for mechanical support, water and mineral salt transport (Butterfield and Meylan 1980). Structurally, the longitudinal fibres, bound by lignin and ray cell bundles oriented in the radial direction, act as reinforcement rods to increase wood strength (Tiemann 1951; Jozsa and Middleton 1994). Due to their cellulose and manner of arrangement, fibres are incorporated into wood-composite materials to support the matrix phase (Haygreen and Bowyer 1996; Dickinson 2000). Type, amount and dimensions of micro-fibrils influence the load-bearing capacity, toughness and yielding strength of pulps, and wood physico-mechanical properties (Wilson and White 1986). Fibre dimensions affect ligno-cellulosic content of wood and have a direct bearing on its specific gravity and durability (Tiemann 1951; Haygreen and Bowyer 1996). Besides support, they assist wood to cope with internal and external stresses. Employed often for structural purposes (Tiemann 1951; Haygreen and Bowyer 1996), timber usage is currently diversified to include the engineering of its fibres into a myriad of commercial products including pulp and paper as well as wood-composite products (e.g. fibre-, chip- and particle-boards). However, variability in fibre characteristics for timbers exists, which influences their end-uses. Thus, information regarding fibre anatomy could be employed to predict service utilization of wood since fibre dimensions differ from one tree family to another (Dinwoodie 1961). Subsequently, Taylor (1979) and Bhat *et al.* (1985) worked on several hardwoods (e.g. *Tectona grandis*, *Hevea brasiliensis*, *Terminalia paniculara* and *Dillenia pentagyna*) from different families and reported significant variations in fibre dimension.

Manwiller (1974) established that fibre sizes influence selection of plant species from different families for various purposes (e.g. lumber and fibre-based products). For instance, in pulping, Horn and Setterholm (1990) reported that fibre morphology significantly influenced sheet properties including tensile, stretch, bursting and tearing strengths. They further emphasized that understanding the influence of fibre morphology on paper characteristics has

incluzând tracțiunea, întinderea, elasticitatea și rezistența la sfâșiere. Autorii au subliniat că înțelegerea influenței morfologiei fibrelor asupra caracteristicilor hârtiei are un potențial ridicat în industria celulozei și hârtiei prin efectul lor asupra produselor finale atunci când se evaluează plante noi ca sursă de fibre. Browning (1963) și Smook (1994) au accentuat că tipul de fibre și dimensiunea acestora influențează proprietățile fizico-mecanice ale produselor din lemn și utilizarea finală a acestora. Prezentul studiu a încercat să stabilească diferențele în dimensiunile fibrelor (lungime și lățime, precum și lățimea lumenului și grosimea peretelui celular) pentru șase specii comerciale de lemn de foioase tropicale, din familii cunoscute (Meliaceae, Sterculiaceae și Ulmaceae), care abundă în pădurile tropicale (Irvine 1961; Oteng-Amoako 2006). Aceasta ar putea sublinia relevanța lor comercială pentru industria lemnului, deoarece pe această bază ar putea fi stabilit potențialul lor pentru diferite utilizări, în special la fabricarea celulozei și hârtiei.

MATERIALE ȘI METODĂ

Macerarea probelor și măsurarea dimensiunilor fibrelor

Probe de dimensiunea unor chibrituri (20x2x2mm) au fost debitate din duramenul (4-6 inele de creștere de la măduvă) a șase specii de foioase tropicale (cu diametrul la înălțimea de 1,3m de sol) din trei familii: Meliaceae (*Khaya ivorensis* A. Chev. și *Cedrella odorata*), Sterculiaceae (*Pterygota macrocarpa* K. Schum. și *Triplochiton scleroxylon* K. Schum.) și Ulmaceae (*Celtis milbraedii* Engl. și *Holoptelea grandis* (Hutch.) Mildbr.). Așchile au fost macerate prin transferarea lor în amestec 1:1 (v/v) de acid acetic galacial (CH₃COOH) și peroxid de hidrogen 20% (H₂O₂) pentru a le delignifica (la 60°C pe baie de apă timp de 72 de ore) și defibra (Iawa 1989; 1991). Amestecul a fost schimbat continuu până la dispariția culorii (indicator pentru absența ligninei). Probele albite au fost spălate în apă distilată cu 6-8 picături de bicarbonat de sodiu (NaHCO₃). Probele au fost clătite de câteva ori în apă distilată, agitate pentru separarea celulelor și păstrate în alcool etilic 70% (CH₃CH₂OH). S-au pus pe lamele de sticlă o cantitatea de fibre umede, au fost fixate cu balsam de Canada, iar deasupra s-au așezat lamele subțiri de sticlă pentru microscop. Sub microscopic au fost observate 50 de fibre din tulpina fiecărei specii (obiective de mărime 10x și 40x) și au fost analizate dimensiunile lor precum lungimea fibrelor (mm), lățimea, lumenul și grosimea peretelui celular (μm) (Iawa 1989). Pentru a determina variația dimensiunii fibrelor pe specii și familii s-a folosit testul statistic de analiză a varianței ANOVA, iar cu Testul Duncan al Șirului Multiplu s-au examinat diferențele semnificative (p<0.05) între medii.

great potential to the pulp and paper industry by projecting their effect on the products, while evaluating new plant sources for fibre supply. Browning (1963) and Smook (1994) also stressed that fibre type and dimensions, which constitute wood products, influence their physico-mechanical properties and end-uses. This work sought to establish the distinction in fibre dimensions (i.e., length and width, as well as lumen width and wall thickness) between six commercially important tropical hardwoods from three notable families (i.e. Meliaceae, Sterculiaceae and Ulmaceae), which abound in the tropical forests (Irvine 1961; Oteng-Amoako 2006). This would emphasize their commercial relevance to the wood industry since their potential or various utilization statuses, especially in pulp and paper manufacturing, could be established.

MATERIALS AND METHODS

Maceration of stakes and measurement of fibre dimensions

Match-stick size stakes (20x2x2mm) were sampled from heartwoods (4-6 growth rings from the pith) of six tropical hardwoods (at diameter at breast height, 1.3m above ground level) from three families: Meliaceae (*Khaya ivorensis* A. Chev. and *Cedrella odorata*), Sterculiaceae (*Pterygota macrocarpa* K. Schum. and *Triplochiton scleroxylon* K. Schum.) and Ulmaceae (*Celtis milbraedii* Engl. and *Holoptelea grandis* (Hutch.) Mildbr.). The splinters were macerated by transferring them into 1:1 (v/v) glacial acetic acid (CH₃COOH) and 20% hydrogen peroxide (H₂O₂) mixture to de-lignify the stakes (at 60°C in a water-bath for 72hrs) and the fibres teased apart (Iawa 1989; 1991). The mixture was continuously changed until no colouration (i.e., an indication of lignin absence). The bleached samples were washed in distilled water with 6 - 8 drops of sodium bicarbonate (NaHCO₃). The samples were rinsed severally in distilled water, agitated to separate the cells and stored in 70% ethanol (CH₃CH₂OH). A wet mount containing fibre cells was prepared on glass slides, fixed with Canada balsam and covered with cover slips for microscopic observation. Fifty fibres from the stem position of each timber were observed under the light microscope (×10 and ×40 objectives) and their dimensions under investigation [i.e., fibre length (mm), width, lumen and wall-thickness (μm)] taken (Iawa 1989). ANOVA was employed to determine fibre dimension variations between the timbers and members of the families, while Duncan's Multiple Range Test examined the significant differences (p<0.05) between their means.

Caracteristici derivate ale fibrelor pentru celuloză și hârtie

S-au determinat două caracteristici ale fibrelor pentru celuloză și hârtie și anume:

i. Raportul Runkel

Pentru fiecare specie s-a determinat raportul mediei dintre dublul grosimii peretelui celular și lățimea medie a lumenului, care indică dacă fibrele de foioase sunt potrivite pentru fabricarea hârtiei (raportul Runkel [RR] a fost determinat pentru fiecare specie) (Runkel 1952):

$RR = \frac{2w}{l}$, unde $2w$ = dublul grosimii peretelui fibrei, l = diametrul lumenului.

După Runkel (1952), raportul trebuie să fie sub 1.25 pentru a intensifica legăturile inter-fibre.

ii. Coeficientul de flexibilitate

Coeficientul de flexibilitate [FC], care exprimă de asemenea suplețea fibrelor, a fost determinat pentru fiecare specie de foioase pe baza ecuației următoare (FAO 1996):

$FC = \frac{l}{D}$, unde l = diametrul lumenului, D = diametrul fibrei.

Istas ș.a. (1954) au subliniat că acest coeficient se așteaptă să nu fie mai mic de 50% pentru o plantă care se califică pentru fabricarea celulozei și a hârtiei. Ei au identificat patru categorii principale:

(a) >75%: fibrele suferă colaps total; cu colaps parțial au o suprafață bună de contact și legături inter-fibrilare bune; (b) 75 - 50%: Fibre cu colaps parțial; au o secțiune transversală eliptică, bună suprafață de contact și bune legături inter-fibre; (c) 50 - 30%: fibre sfărâmate foarte puțin, au o suprafață destul de mică de contact și destul de slabe legături inter-fibre; (d) <30%: fibre nesfărâmate; au o suprafață foarte mică de contact și slabe legături inter-fibre.

REZULTATE

i. Variația lungimii fibrelor pe specii de foioase

Lungimea medie a fibrelor variază de la 0.79mm pentru *H. grandis* (Ulmaceae) la 1.88mm pentru *K. ivorensis* (Meliaceae) (Fig. 1). ANOVA (Tabelul 1) indică faptul că lungimile fibrelor pentru toate speciile lemnoase sunt în mod semnificativ diferite ($p < 0.05$) și variază astfel: *K. ivorensis* > *P. macrocarpa* > *C. milbraedii* > *T. scleroxylon* > *C. odorata* > *H. grandis*. IAWA (1937; 1989; 1991) clasifică fibrele de *K. ivorensis* (1.88mm) și *P. macrocarpa* (1.74mm) cu lungime moderată, *C. milbraedii*, *T. scleroxylon* și *C. odorata* (1.59, 1.43 și respectiv 1.33mm) de dimensiune medie, iar *H. grandis* (0.79mm) ca scurte (Tabelul 2). Fig. 1-3 reprezintă imaginile microscopice pentru fibrele din celule macerate ale unor specii reprezentative investigate, aparținând la trei familii.

Derived fibre characteristics for pulp and paper

Two derived fibre characteristics for pulp and paper were determined for the hardwoods, namely:

i. Runkel Ratio

The ratio of the mean of the double wall thickness to the mean lumen width, which determines the suitability of tropical hardwood fibres for paper manufacture (i.e., Runkel Ratio [RR]), was determined for each timber (Runkel 1952):

$RR = \frac{2w}{l}$, where $2w$ = double fibre wall thickness, l = lumen diameter.

According to Runkel (1952), the ratio should be less than 1.25 to enhance good inter-fibre bonds.

ii. Flexibility Co-efficient

Flexibility co-efficient [FC], which also determines pulp suppleness, was determined for each hardwood based on the following equation (FAO, 1996):

$FC = \frac{l}{D}$, where l = lumen diameter, D = fibre diameter.

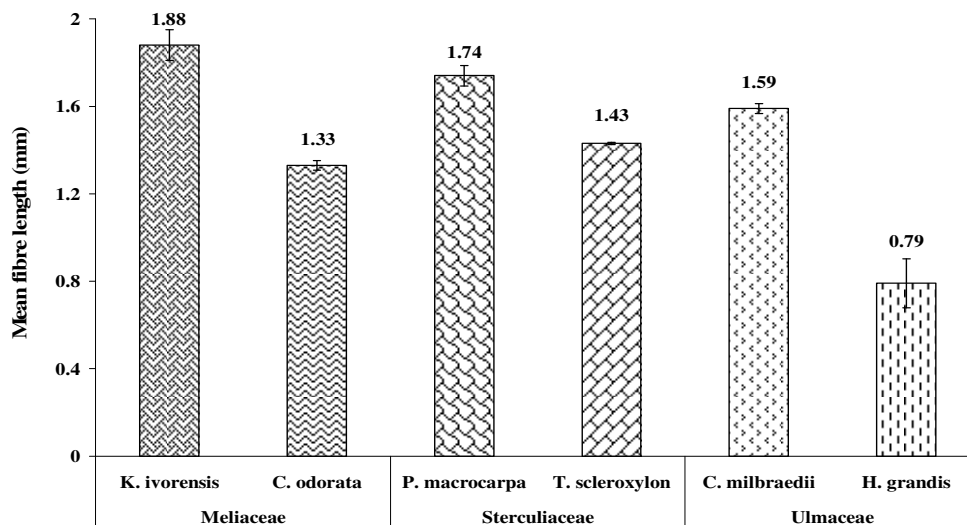
Istas *et al.* (1954) stressed that the co-efficient is expected not to be less than 50% for a plant to qualify for pulp- and paper-making. They identified four main categories:

(a) >75%: Fibres totally collapse; have good surface contact, and good fibre-to-fibre bonding; (b) 75 - 50%: Fibres partially collapse; have an elliptical cross-section, good surface contact, and good fibre-to-fibre bonding; (c) 50 - 30%: Fibres collapse only a little; have fairly small surface contact, and fairly poor fibre-to-fibre bonding; (d) <30%: Fibres do not collapse; have very small surface contact, and poor fibre-to-fibre bonding.

RESULTS

i. Variation in fibre length between the hardwoods

Mean fibre length ranges from 0.79mm for *H. grandis* (Ulmaceae) to 1.88mm for *K. ivorensis* (Meliaceae) (Fig. 1). ANOVA (Table 1) indicates that fibre lengths for all the wood species are significantly different ($p < 0.05$) and rank as: *K. ivorensis* > *P. macrocarpa* > *C. milbraedii* > *T. scleroxylon* > *C. odorata* > *H. grandis*. IAWA (1937; 1989; 1991) would classify fibres from *K. ivorensis* (1.88mm) and *P. macrocarpa* (1.74mm) moderately long, *C. milbraedii*, *T. scleroxylon* and *C. odorata* (1.59, 1.43 and 1.33mm respectively) medium-sized, and *H. grandis* (0.79mm) short (Table 2). Fig. 1 - 3 represent micrographs of wood fibres from macerated cells from representative timber species from the three families under investigation.



Timber species and their respective families

Fig. 1.

Lungimea medie a fibrelor a șase specii tropicale de foioase din trei familii de arbori / Mean fibre lengths for six tropical hardwoods from three tree families.

ii. Variația lungimii fibrelor între familii

Speciile de Meliaceae au înregistrat cele mai lungi fibre (1.61mm) iar cele de Ulmaceae cele mai scurte (1.19mm) (Fig. 2). Lungimile fibrelor de Ulmaceae sunt diferite în mod evident ($p < 0.05$) față de cele de Meliaceae și Sterculiaceae (Tabelul 1). IAWA (1937; 1989; 1991) clasifică lungimile fibrelor speciilor de Meliaceae (de ex. 1.61mm) ca fiind lungi iar cele de Sterculiaceae (1.59mm) și Ulmaceae (1.19mm) ca fiind medii (Tabelul 2).

ii. Variation in fibre length between families

Members of the Meliaceae recorded the longest fibres (1.61mm) and the Ulmaceae the shortest (1.19mm) (Fig. 2). Fibre lengths from the members of the Ulmaceae are significantly different ($p < 0.05$) from those of the Meliaceae and Sterculiaceae (Table 1). IAWA (1937; 1989; 1991) would classify mean fibre lengths of the members of the Meliaceae (i.e., 1.61mm) long and those of Sterculiaceae (1.59mm) and Ulmaceae (1.19mm) medium (Table 2).

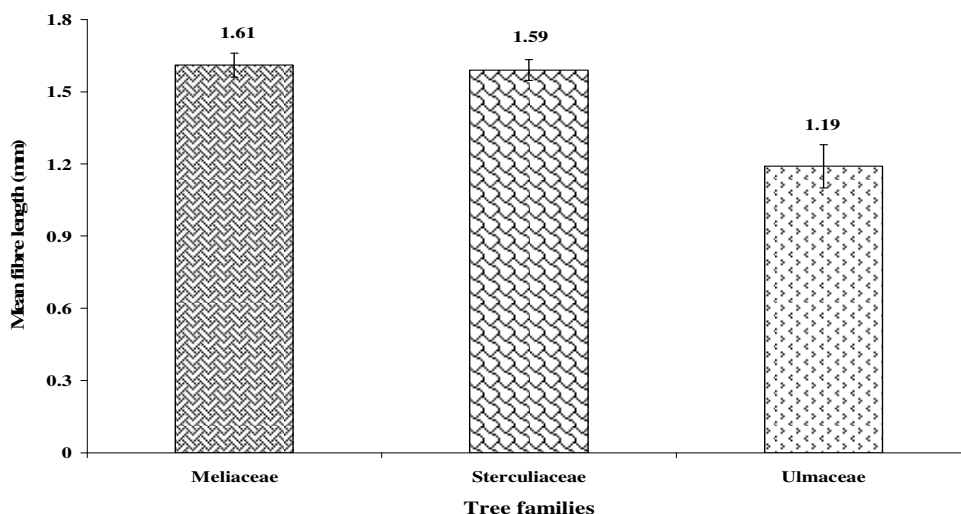


Fig. 2.

Lungimea medie a fibrelor speciilor din trei familii de arbori / Mean fibre lengths for members of three tree families.

iii. Variația lățimii lumenului și grosimii peretelui celular între speciile de foioase

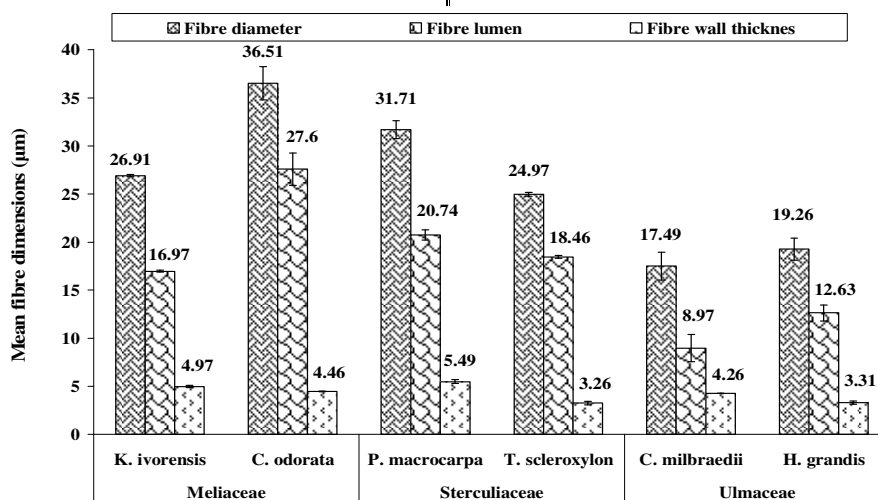
Specia *C. Odorata* (Meliaceae) a înregistrat cele mai late fibre (36.5µm) urmată de *P. macrocarpa* (31.71µm), *K. ivorensis* (26.91µm), *T. scleroxylon* (24.97µm), *H. grandis* (19.26µm) iar cele mai înguste (17.49µm) la *C. milbraedii* (Ulmaceae) (Fig. 3). Lățimile fibrelor pentru Ulmaceae (*C. milbraedii* și *H. grandis*) nu diferă semnificativ ($p < 0.05$) (Tabelul 1).

Lumenul fibrelor pentru specia *C. odorata* este din nou cel mai lat (27.6µm), iar cel mai îngust pentru specia *C. milbraedii* (8.97µm). Lumenul fibrelor pentru foioase diferă în mod semnificativ ($p < 0.05$) (Tabelul 1; Fig. 4). Grosimea peretelui celular al fibrelor a variat de la 3.31µm (pentru *H. grandis*) la 5.49µm (pentru *P. macrocarpa*) (Fig. 3; Tabelele 1 și 2). Diferențele între grosimile peretelui celular al fibrelor nu sunt semnificative ($p < 0.05$). Testul Duncan al Șirului Multiplu (Tabelul 2) indică grosimi ale peretelui fibrelor pentru speciile *C. odorata* și *C. milbraedii*, precum și cele ale speciilor *T. scleroxylon* și *H. grandis* asemănătoare ($p < 0.05$). Grosimile peretelui fibrelor speciilor de *K. ivorensis*, *C. odorata*, *P. macrocarpa* și *C. milbraedii* (4.26 - 5.49µm) sunt clasificate de IAWA (1937; 1989; 1991) ca fiind groase, iar cele de 3.26 and 3.31µm pentru *T. scleroxylon* respectiv *H. grandis* ca fiind medii.

iii. Variation in fibre, lumen width and wall thickness between the hardwoods

C. Odorata (Meliaceae) recorded the widest fibre (36.5µm) followed by *P. macrocarpa* (31.71µm), *K. ivorensis* (26.91µm), *T. scleroxylon* (24.97µm), *H. grandis* (19.26µm) and the narrowest (17.49µm) for *C. milbraedii* (Ulmaceae) (Fig. 3). Fibre widths for the Ulmaceae (i.e., *C. milbraedii* and *H. grandis*) are not significantly different ($p < 0.05$) (Table 1).

Fibre lumen for *C. odorata* is again the widest (27.6µm) with the thinnest recorded for *C. milbraedii* (8.97µm). Fibre lumens for the hardwoods are significantly different ($p < 0.05$) (Table 1; Fig. 4). Fibre wall thickness ranges from 3.31µm (for *H. grandis*) to 5.49µm (for *P. macrocarpa*) (Fig. 3; Tables 1 and 2). The differences between their fibre wall thicknesses are significant ($p < 0.05$). Duncan's Multiple Range Test (Table 2) indicates that fibre wall thicknesses for *C. odorata* and *C. milbraedii*, as well as those for *T. scleroxylon* and *H. grandis* are not significantly different ($p < 0.05$). Fibre wall thicknesses for *K. ivorensis*, *C. odorata*, *P. macrocarpa* and *C. milbraedii* (i.e., 4.26 - 5.49µm) would be classified by IAWA (1937; 1989; 1991) as thick, and 3.26 and 3.31µm for *T. scleroxylon* and *H. grandis* respectively as medium.



Timber species and their respective families

Fig. 3.

Lățimea fibrelor, lumenul și grosimea peretelui celular a șase specii tropicale de foioase din trei familii de arbori / Fibre width, lumen and wall thickness for six tropical hardwoods from three families.

iv. Variația lățimii fibrelor, lățimii lumenului și grosimii peretelui celular pe familii

Fig. 4 arată că lemnul speciilor de Meliaceae a înregistrat cele mai late fibre (31.71µm), urmate de cele de Sterculiaceae (28.34µm) și de Ulmaceae (13.38µm) cu diferențe semnificative ($p < 0.05$) între

iv. Variation in fibre width, lumen width and wall thickness between the tree families

Fig. 4 shows that timbers of the Meliaceae recorded the widest fibres (31.71µm) followed by those of Sterculiaceae (28.34µm) and the Ulmaceae (13.38µm) with significant difference ($p < 0.05$)

lăţimea fibrelor pe familii (Tabelul 1).

În mod similar, cel mai lat lumen (22.29µm) a fost înregistrat pentru speciile din familia Meliaceae, în timp ce Ulmaceae au înregistrat cel mai îngust lumen (10.8µm). Pentru toate familiile diferenţele între lăţimile lumenului au fost semnificative (p<0.05).

Grosimea peretelui fibrelor a variat de la 3.79µm (pentru Ulmaceae) la 4.72µm (pentru Meliaceae) (Tabel 3). IAWA (1937; 1989; 1991) clasifică pereţii fibrelor pentru Meliaceae (4.72µm) şi Sterculiaceae (4.38µm) ca fiind groşi iar pentru Ulmaceae (3.79µm) ca fiind de grosime medie. (Tabelul 2).

between fibre widths for the families (Table 1).

Similarly, the widest fibre lumen (22.29µm) was recorded for members of the Meliaceae, while the Ulmaceae recorded the narrowest (10.8µm). Differences between the lumen widths for all the families are significant (p<0.05).

Fibre wall thickness ranges from 3.79µm (for the Ulmaceae) to 4.72µm (for the Meliaceae) (Table 3). IAWA's (1937; 1989; 1991) would rank fibre walls for the Meliaceae (4.72µm) and Sterculiaceae (4.38µm) thick and those of Ulmaceae (3.79µm) medium (Table 2).

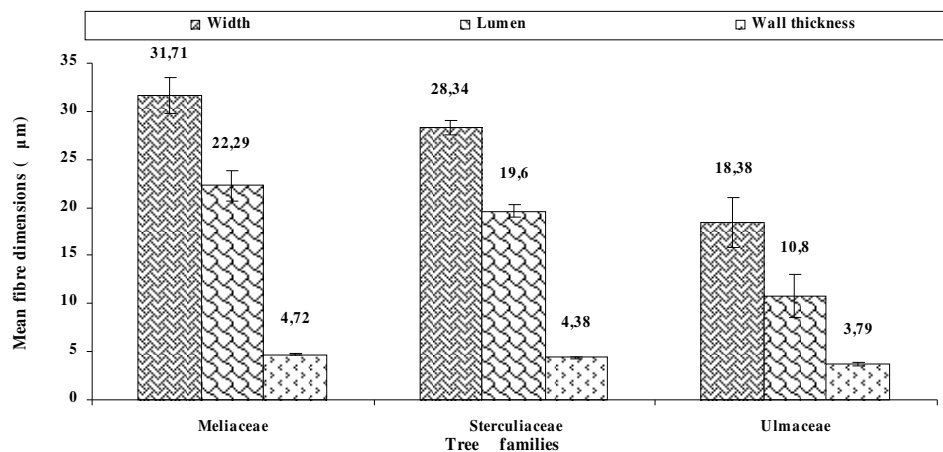


Fig. 4.

Lăţimea medie fibrelor speciilor din trei familii de arbori / Mean fibre widths for members of three tree families.

Tabelul 1 / Table 1

Testul statistic ANOVA pentru lungimea fibrelor, diametrul, lăţimea lumenului şi grosimea peretelui celular pentru şase specii de foioase tropicale şi familiile corespunzătoare / ANOVA for fibre length, diameter, lumen width and wall thickness for six tropical hardwoods and their families

Sursa de variaţie / Source of Variation	Grade de libertate / Degree of freedom	Suma pătratelor / Sum of Squares	Suma medie a pătratelor / Mean sum of squares	Raport F / F-ratio	Valoare P / Valoare P	F-critic / F-critical
SPECII DE FOIOASE / *HARDWOOD SPECIES						
Lungimea fibrelor / Fibre length^a						
Specii / Timber species	5	36.7021	7.34042	164.77	4.7 x 10 ⁻⁸³	2.24
Error / Residuals	294	13.0977	0.04455			
Total	299	49.7998				
Diametrul fibrelor / Fibre diameter^b						
Specii / Timber species	5	13148.1	2629.62	122.32	1.1 x 10 ⁻⁶⁹	2.24
Error/Residuals	294	6320.46	21.4982			
Total	299	19468.5				

			Lățimea lumenului / Fibre lumen width^c			
Specii / Timber species	5	10508.8	2101.76	87.18	5.6×10^{-56}	2.24
Error / Residuals	294	7087.93	24.1086			
Total	299	17596.7				
			Grosimea peretelui / Fibre wall thickness^d			
Specii / Timber species	5	196.852	39.3703	15.73	1×10^{-13}	2.24
Error / Residuals	294	735.938	2.50319			
Total	299	932.79				
FAMILII / **FAMILIES						
			Lungimea fibrelor / Fibre length^a			
Familii / Families	2	10.8634	5.4317	41.43	1.3×10^{-16}	3.03
Error / Residuals	297	38.9364	0.1311			
Totals	299	49.7998				
			Diametrul fibrelor / Fibre diameter^b			
Familii / Families	2	9628.54	4814.27	145.31	9.9×10^{-45}	3.03
Error / Residuals	297	9840.01	33.1313			
Total	299	19468.5				
			Lățimea lumenului / Fibre lumen width^c			
Familii / Families	2	7219.62	3609.81	103.32	8.7×10^{-35}	3.03
Error / Residuals	297	10377.1	34.9398			
Total	299	17596.7				
			Grosime perete celular / Fibre wall thickness^d			
Familii / Families	2	43.9716	21.9858	7.35	7.7×10^{-4}	3.03
Error / Residuals	297	888.819	2.99265			
Total	299	932.79				

*Specii foioase:^{abcd} Semnificativ la 0,05 / *Hardwood species:^{abcd} Significant at 0.05: ^a $F_{(0.05), 5, 294} = 2.24 \leq F_o = 164.77$; ^b $F_{(0.05), 5, 294} = 2.24 \leq F_o = 122.32$; ^c $F_{(0.05), 5, 294} = 2.24 \leq F_o = 87.18$; ^d $F_{(0.05), 5, 294} = 2.24 \leq F_o = 15.73$.

**Familii:^{abcd} Semnificativ la 0,05 / **Families:^{abcd} Significant at 0.05: ^a $F_{(0.05), 2, 297} = 3.03 \leq F_o = 41.43$; ^b $F_{(0.05), 2, 297} = 3.03 \leq F_o = 145.31$; ^c $F_{(0.05), 2, 297} = 3.03 \leq F_o = 103.32$; ^d $F_{(0.05), 2, 297} = 3.03 \leq F_o = 7.35$.

Tabelul 2 / Table 2

Dimensiunea medie a fibrelor și variabile derivate (raportul Runkel și coeficientul de flexibilitate) pentru șase specii tropicale din trei familii / Mean fibre dimensions and derived variables (i.e., Runkel ratio and Flexibility Co-efficient) for six tropical hardwoods from three families.

Familia de arbore / Tree family	Folioase / Hardwood	Dimensiunile fibrelor / Fibre dimensions					Derivate variabile / Derived variables		
		Lungimea / Length (mm)	Categoria / Category*	Diametrul / Diameter (μm)	Lumen (μm)	Grosimea peretelui celular / Wall thickness (μm)	Categoria / Category**	Raportul Runkel / Ratio ^a	Coeficient de flexibilitate / Flexibility Coefficient ^b
Meliaceae	<i>K. ivorensis</i>	1.88 ^a	Moderat de lungi /	26.91 ^c	16.97 ^d	4.97 ^b	Gros / Thick	3.17	63.06
	<i>C. odorata</i>	1.33 ^e	Moderately long Medie / Medium	36.51 ^a	27.60 ^a	4.46 ^c	Gros / Thick	2.65	75.60
		Mean 1.61 *	Moderat / Mod. Long	31.71*	22.29*	4.72*	Gros / Thick	2.85	70.29
Sterculiaceae	<i>P. macrocarpa</i>	1.74 ^b	Moderat /	31.71 ^b	20.74 ^b	5.49 ^a	Gros / Thick	3.06	65.41
	<i>T. scleroxylon</i>	1.43 ^d	Moderately long Medii / Medium	24.97 ^d	18.46 ^c	3.26 ^d	Medii / Medium	2.71	73.93
Ulmaceae		Mean 1.59 *	Medii / Medium	28.34*	19.60**	4.38**	Gros / Thick	2.89	69.16
	<i>C. milbraedii</i>	1.59 ^c	Medii / Medium	17.49 ^e	8.97 ^f	4.26 ^c	Gros / Thick	3.90	51.29
	<i>H. grandis</i>	0.79 ^f	Scurte / Short	19.26 ^e	12.63 ^e	3.31 ^d	Medii / Medium	3.05	65.58
		Mean 1.19**	Medii / Medium	18.38**	10.80***	3.79***	Medii / Medium	3.40	58.76

Mediile cu aceeași literă sau * într-o coloană nu diferă semnificativ (p<0.05) / Means with the same letters or asterisks in a column are not significantly different (p<0.05).

* **Lungimea fibrelor / *Fibre length:** >0.90 scurte / short; 0.9.0 - 1.60 medii / medium; 1.60 - 2.20 moderat de lungi / moderately long; 2.20 - 3.0mm foarte lungi / very long.

****Grosimea peretelui celular / **Fibre wall thickness:** >2.0 subțire / thin; 2.0 - 4.0 medii / medium; >4.0μm gros / thick (IAWA, 1937; 1989; 1991).

Raportul Runkel / ^aRunkel ratio: <1.25 legături solide intra-fibre la defibrare / good inter-fibre bonds during pulping.

Coeficientul de flexibilitate / ^bFlexibility Coefficient: >75 legături superioare între fibre / superior fibre to fibre bonding; 75 - 50 legături bune între fibre / good fibre to fibre bonding; 50 - 30 legături relativ slabe între fibre / fairly poor fibre to fibre bonding; <30 legături slabe între fibre / poor fibre to fibre bonding.

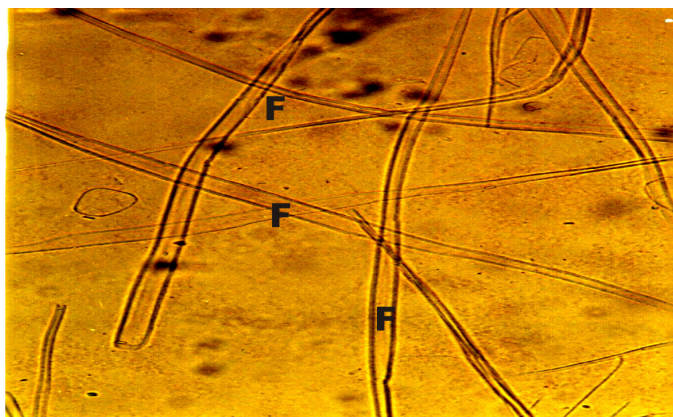


Fig.1.

**Imaginea microscopică a fibrelor lemnoase din celule macerate de *K. ivorensis* (Fam.: Meliaceae) /
Micrograph of wood fibres (F) from macerated cells of *K. ivorensis* (Fam.: Meliaceae).
Scara / Scale = 60µm.**

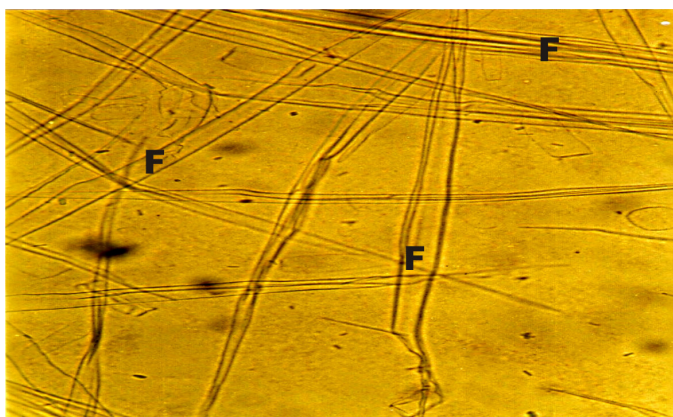


Fig. 2.

**Imaginea microscopică a fibrelor lemnoase din celule macerate de *T. Scleroxylon* (Fam.:
Sterculiaceae) / Micrograph of wood fibres from macerated cells of *T. Scleroxylon* (Fam.:
Sterculiaceae). Scara / Scale = 50µm.**

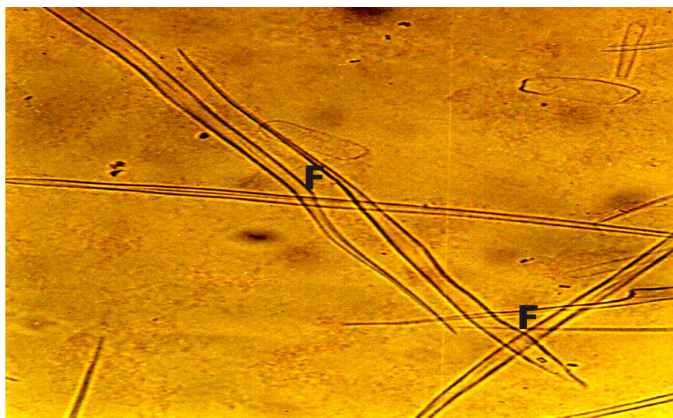


Fig. 3.

**Imaginea microscopică a fibrelor lemnoase din celule macerate de *H. grandis* (Ulmaceae) /
Micrograph of wood fibres from macerated cells of *H. grandis* (Ulmaceae). Scara / Scale = 40µm.**

DISCUȚII

Studiul privind caracteristicile (dimensiunea) fibrelor este necesar, anatomia fibrei fiind importantă în estimarea calității celulozei, a durabilității lemnului, a proprietăților fizico-mecanice precum densitatea și rezistența la impact (Dinwoodie 1965; Butterfield și Meylan 1980; Amidon 1981; Wood 1981; Oluwadare și Sotannde 2007). Proprietățile fizice ale foilor de hârtie depind de morfologia fibrelor, în special de lungimea lor și grosimea peretelui celular care influențează în mod considerabil rezistențele mecanice ale pasteii nemăcinate. Proprietățile foilor care depind de legăturile dintre fibre pentru a avea rezistență, rezultă din combinarea caracteristicilor fibrelor (Horn și Setterholm 1990; Oluwadare și Sotannde 2007). Variațiile dimensiunilor fibrelor sunt influențate de câțiva parametri, îndeosebi de tipul familiei lemnoase (Dinwoodie 1961; Manwiller 1974; Butterfield și Meylan 1980). De aceea, Taylor (1979) a raportat o variație semnificativă a dimensiunii fibrelor de foioase aparținând unor familii diferite, în timp ce Bhat ș.a. (1985) au confirmat rezultate similare pe 11 foioase tropicale din diferite familii (*Tectona grandis*, *Lagerstroemia microcarpa*, *Anacardium occidentale*, *Dillenia pentagyna*, *Dipterocarpa indicus*, *Erythrina stricta*, *Grewia tiliifolia*, *Hevea brasiliensis*, *Stereospermum chelonoides*, *Terminalia paniculara*, și *Xylia xylocarpa*). Acesta motivează studiul tendințelor privind dimensiunea fibrelor de foioase din trei familii cunoscute și potențialele lor aplicații în industria lemnului, în special pentru fabricarea produselor pe bază de fibre de lemn.

Variația lungimii fibrelor

Deși s-a considerat că foioasele au fibre scurte, Bhat și Rugmini (1985) au observat că există și foioase tropicale cu fibre lungi. Prin urmare, printre cele șase specii studiate în Fujiwara și Samesbjma (1991), IAWA (1937; 1991) a clasificat fibrele speciilor *K. ivorensis* și *P. macrocarpa* ca moderat de lungi (1.60 - 2.20mm), cele de *C. odorata*, *T. scleroxylon* și *C. milbraedii* (0.90 - 1.60mm) ca medii, iar cele de *H. grandis* (<0.90mm) ca fiind scurte. Dintre familii, speciile de Meliaceae au fibre moderat de lungi iar cele de Sterculiaceae și Ulmaceae au fibre medii (1.59 și respectiv 1.19mm). Hart și Swindle (1967), Dodd (1986), Smook (1994) și Oluwadare și Sotannde (2007) au arătat că fibrele componente și caracteristicile lor structurale, în special lungimea lor și proprietățile mecanice sunt parametri importanți în evaluarea calității lemnului precum posibilitatea de utilizare a lor la fabricarea produselor pe bază de fibre, mobilier și structuri din lemn. Horn și Setterholm (1990) au subliniat că lungimea fibrelor și unghiul dintre fibrile explică variațiile mari ale proprietăților de întindere a produselor din fibre măcinate. Ei au găsit, de asemenea, că lungimea fibrelor are o influență importantă asupra proprietăților foilor realizate din

DISCUSSION

The study of fibre characteristics (e.g. dimension) is imperative, fibre anatomy is important in estimating pulp quality, wood durability, physical and mechanical properties such as specific gravity and impact resistance (Dinwoodie 1965; Butterfield and Meylan 1980; Amidon 1981; Wood 1981; Oluwadare and Sotannde 2007). Physical properties of sheets made from fibres depend on fibre morphology especially its length and cell-wall thickness, which greatly influence the strength properties of unbeaten pulp. Sheet properties, which depend on fibre-to-fibre bond formation for strength development, are a combination of fibre characteristics (Horn and Setterholm 1990; Oluwadare and Sotannde 2007). Fibre dimensional variations are influenced by several parameters notably family type of wood (Dinwoodie 1961, Manwiller 1974; Butterfield and Meylan 1980). Thus, Taylor (1979) reported a significant variation in fibre dimensions in hardwoods from different families, while studies by Bhat *et al.* (1985) on eleven tropical hardwoods from different families (i.e., *Tectona grandis*, *Lagerstroemia microcarpa*, *Anacardium occidentale*, *Dillenia pentagyna*, *Dipterocarpa indicus*, *Erythrina stricta*, *Grewia tiliifolia*, *Hevea brasiliensis*, *Stereospermum chelonoides*, *Terminalia paniculara*, and *Xylia xylocarpa*) confirmed similar findings. This makes worth-studying the trends in fibre dimensions of hardwoods from three notable families and their potential applications in the wood industry especially for the manufacture of fibre-based products.

Variation in fibre length

Though hardwoods have been reported as short-fibred, Bhat and Rugmini (1985) noted that long-fibred tropical hardwoods exist. Accordingly, among the six timbers studied, IAWA (1937; 1991) in Fujiwara and Samesbjma (1991) would classify fibres of *K. ivorensis* and *P. macrocarpa* as moderately long (1.60 - 2.20mm), those of *C. odorata*, *T. scleroxylon* and *C. milbraedii* (0.90 - 1.60mm) medium and *H. grandis* (<0.90mm) short-fibred. Among the families, members of Meliaceae have moderately long fibres (1.61mm) and those of Sterculiaceae and Ulmaceae medium (1.59 and 1.19mm respectively). Hart and Swindle (1967), Dodd (1986), Smook (1994) and Oluwadare and Sotannde (2007) indicated that structural characteristics of the constituent fibres, especially their lengths and strength properties, are important parameters in wood quality evaluations such as suitability for fibre-based products, furniture and structural lumber. Horn and Setterholm (1990) emphasized that fibre length together with fibrillar angle accounts for great variations in stretch properties of beaten fibres. They also found fibre length an important factor in hardwood sheet properties, which include bursting, tensile and tearing

lemn de foioase, respectiv rezistența la tracțiune și rupere a foilor din fibre nemăcinate sau măcinate și caracteristicile lor elastice. Oricum, la rășinoase lungimea fibrelor nu indică nicio legătură cu nicio proprietate a foilor. Wangaard și Woodson (1973) și Horn (1974) au raportat că extinderea zonelor de îmbinare, un indicator pentru proprietățile mecanice ale celulozei, este influențată de lungimea fibrelor, de aceea hârtiile din celuloza de foioase au cele mai multe rezistențe scăzute. Lungimea fibrelor de foioase influențează în mod semnificativ câteva proprietăți ale foilor, altele decât alungire (Horn 1978). Există variații în ceea ce privește lungimea fibrelor pentru celuloză. Smook (1994) a raportat că speciile de foioase tropicale au o medie a lungimii de 2mm (4 mm pentru rășinoase) și o variație estimată pentru celuloză de 0.25 - 130mm. Astfel Horn și Setterholm (1990) au stabilit o dimensiune de 1.2mm pentru foioase (comparativ cu rășinoasele având 3.6mm), în timp ce Desch și Dinwoodie (1996) au raportat 1mm pentru foioase (și 1.5 - 3.0mm pentru rășinoase). Tiemann (1951) și Bhat ș.a. (1985) au atribuit aceste discrepanțe diferențelor de vîrstă și condițiilor de creștere ale speciilor lemnoase. Oluwadare și Sotande (2007) au raportat o lungime de fibre pentru specia *Leucaena leucocephala* de 0.65mm (care este mai scurtă decât cele de la foioasele studiate) dar într-un interval acceptabil pentru fabricarea hârtiei la foioase. În mod similar, Smook (1994) și Horn și Setterholm (1990) au determinat că lungimea fibrelor pentru șase specii (care a variat de la 0.79mm pentru *H. grandis* (Ulmaceae) la 1.88mm pentru *K. ivorensis* (Meliaceae)) corespunde în intervalul caracteristic fibrelor pentru celuloză de (0.25-130mm). Acestea sunt, de asemenea, corespunzătoare specificațiilor de lungime pentru alte produse pe bază de fibre, mobilă și aplicații structurale, similare cu cele caracteristice unor specii frecvent utilizate în SUA și Canada (Smook 1994), precum: plop tremurător (1.04mm), mesteacăn (1.85mm), fag (1.20mm), stejari (1.4mm) și red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) (1.7mm). Barkas ș.a. (1953), Manwiller (1974) și Horn și Setterholm (1990) au furnizat date comparabile pentru alte foioase precum paltin roșu (0.83mm), arin roșu (1.25mm) și black tupelo (*Nyssa sylvatica*) (1.76mm). Lungimea fibrelor tuturor speciilor aparținând celor trei familii studiate respectă aceste cerințe.

Variația lățimii fibrelor

Fibrele de foioase au lățimi mici (Butterfield și Meylan 1980), care variază în funcție de specie și influențează înglobarea lor în diverse produse. Smook (1994) a stabilit pentru foioase lățimi medii de 22μm și 25μm, iar Horn și Setterholm (1990) au raportat 35μm pentru rășinoase. Lățimea fibrelor pentru cele șase specii de foioase a variat de la 17.49μm pentru *C. milbraedii* (Ulmaceae) la 36.51μm pentru *C. odorata* (Meliaceae). Speciile de Ulmaceae

strengths of sheets made from unbeaten or beaten hardwood fibres and their stretch characteristics. However, fibre length does not show any relationship to any sheet property in softwoods. Wangaard and Woodson (1973) and Horn (1974) reported that extensibility of bonding sites, an indicator of pulp mechanical properties, is a function of fibre length, such that hardwood pulps are lower in most paper strengths. Fibre length of hardwoods significantly affects several sheet properties other than extensibility (Horn 1978). Variations exist regarding pulpable fibre lengths. Smook (1994) reported that tropical deciduous hardwoods have a mean of 2mm (4mm for softwoods) and estimated pulpable range from 0.25 - 130mm. However, Horn and Setterholm (1990) established 1.2mm for hardwoods (as against 3.6mm for softwoods), while Desch and Dinwoodie (1996) reported 1mm for hardwoods (and 1.5 - 3.0mm for softwoods). Tiemann (1951) and Bhat *et al.* (1985) attributed the discrepancies to differences in time and growth site of timbers in particular. Oluwadare and Sotande (2007) reported 0.65mm fibre length for *Leucaena leucocephala* (which is shorter than those of the currently examined hardwoods) and falls within the acceptable range for hardwoods in paper-making. Similarly, fibre lengths for the six timbers [which range from 0.79mm for *H. grandis* (Ulmaceae) to 1.88mm for *K. ivorensis* (Meliaceae)] fall within the pulpable range (0.25-130mm) determined by Smook (1994) and Horn and Setterholm (1990). They are also suitable for length specification for other fibre-based products, furniture and structural purposes similar to those of aspen (1.04mm), birch (1.85mm), beech (1.20mm), oaks (1.4mm) and red gum (1.7mm) whose wood members are frequently employed in the USA and Canada (Smook 1994). Barkas *et al.* (1953), Manwiller (1974) and Horn and Setterholm (1990) also provided comparable findings for other hardwoods including red maple (0.83mm), red alder (1.25mm) and black tupelo (1.76mm). Fibre lengths of all members of the three families meet these requirements.

Variation in fibre width

Hardwood fibres have narrow widths (Butterfield and Meylan 1980), which vary among timbers and influence their engineering into a number of lumber products. Smook (1994) established a mean of 22μm for hardwoods and 25μm by Horn and Setterholm (1990) who also reported 35μm for softwoods. Fibre widths for the six hardwoods also range from 17.49μm for *C. milbraedii* (Ulmaceae) to 36.51μm for *C. odorata* (Meliaceae). Members of the Ulmaceae recorded mean widths (i.e., 17.49 - 19.26μm) far below those established by the two authors (i.e., 22 - 25μm), while those of the Meliaceae (26.91 - 36.51μm) and Sterculiaceae (24.97 - 31.71μm) are wider than those specified for hardwoods. Sanyer and Chidester (1963) and Jozsa

au înregistrat lățimi medii (17.49 - 19.26 μ m), mult sub cele stabilite de cei doi autori (22 - 25 μ m), în timp ce la speciile de Meliaceae (26.91 - 36.51 μ m) și Sterculiaceae (24.97 - 31.71 μ m) sunt mai late decât cele specificate pentru foioase. Sanyer și Chidester (1963), Jozsa și Middleton (1994) au raportat că astfel de variații ale lățimii fibrelor influențează caracteristicile celulozei. Smook (1994) a indicat o lățime potrivită pentru celuloză între 9 - 40 μ m și a subliniat că influența lățimii fibrelor în fabricarea celulozei este de a crește capacitatea de îmbinare până când fibrele late sunt ușor strivite în timpul presării (proces mecanic al fabricării pastei), în special atunci când lumenul este lat. Astfel, Oluwadare și Sotannde (2007) au furnizat date privind lățimea fibrelor clasificate ca: înguste de 15.67 μ m pentru *L. leucocephala* pentru a fi utilizate la fabricarea celulozei, în timp ce Barkas ș.a. (1953) au estimat lățimi de 10 - 30 μ m pentru stejar, 15 - 25 μ m pentru fag și 20 - 40 μ m pentru molid. Dacă intervalul lățimii fibrelor pentru foioasele studiate (17.49-36.51 μ m) întrunește specificațiile celulozei, este de așteptat ca cele mai late fibre de Meliaceae să răspundă la măcinare cel mai bine (Smook 1994; Haygreen și Bowyer 1996) urmate de cele de Sterculiaceae. Cele mai mici lățimi de la Ulmaceae ar putea conferi cea mai mare rezistență la strivire în timpul măcinării și ar putea fi potrivite pentru producția de hârtie datorită abilității de a forma suprafețe netede și hârtii igienice, datorită capacității de absorbție rezultată din spațiile interstițiale din matricea globulară a fibrelor. (Smook 1994; Haygreen și Bowyer 1996). Acestea sunt cerințe pentru producția de hârtie de ziar, hârtie igienică, unde rezistențele sunt mai puțin importante (Ververis ș.a. 2004). Smook (1994) a observat că rezistența la strivire ar rezulta într-un număr redus de centre de îmbinare, prin urmare legături slabe dintre fibre și produse pe bază de fibre asemenea. Totuși, doar lățimea fibrelor nu determină abilitățile de strivire ale fibrelor. Smook (1994) a subliniat că lățimea fibrelor împreună cu lungimea lor sunt doi dintre cei mai importanți parametri pentru utilizarea fibrelor lor la fabricarea celulozei și a hârtiei, în timp ce FAO (1996) a raportat, de asemenea, că lățimea lumenului fibrelor este cu atât mai important cu cât lățimea fibrelor determină capacitatea de măcinare.

Variația lățimii lumenului fibrelor

Lumenul celular influențează densitatea lemnului, umiditatea (ex. umiditatea reținută prin forțele capilare) și calitatea pentru fabricarea celulozei, deoarece oferă informații despre grosimea peretelui celular și capacitatea fibrelor de a fi zdrobite pe durata măcinării (Browning 1963; Sanyer și Chidester 1963; Smook 1994). Panshin și de Zeeuw (1980) au confirmat că lumenul afectează rigiditatea produselor pe bază de fibre. Pentru realizarea de produse rezistente fibrele cu lumen lat suferă o măcinare ușoară, în timp ce fibrele cu lumen

and Middleton (1994) reported that such variations in fibre widths influence pulp characteristics. Smook (1994) gave the pulpable width between 9 - 40 μ m and emphasized that the influence of fibre width in pulping is by increasing bonding sites since wide fibres are easily crushed during beating (a mechanical process in pulping) especially when the lumen is wide. However, Oluwadare and Sotannde (2007) provided evidence of fibre width as narrow as 15.67 μ m for *L. leucocephala* to be pulpable, while Barkas *et al.* (1953) estimated 10 - 30 μ m for oak, 15 - 25 μ m for beech (hardwoods) and 20 - 40 μ m for spruce (a softwood). As fibre width range for the hardwoods currently studied (i.e. 17.49-36.51 μ m) meets pulp specifications, it is expected that the widest fibres of the Meliaceae would respond to beating best (Smook 1994; Haygreen and Bowyer 1996) followed by the Sterculiaceae. The narrowest widths of the Ulmaceae would offer the greatest resistance to crushing during beating and would be suitable for cultural paper production because of their ability to form smooth surfaces, and hygienic papers due to their high absorbency resulting from the formation of interstitial spaces in the globular matrix of the fibres (Smook 1994; Haygreen and Bowyer 1996). These are the requirements for newsprint and tissue paper production respectively where strength properties are of little concern (Ververis *et al.*, 2004). Smook (1994) observed such a resistance to crushing would produce few bonding sites, hence weak inter-fibre bonds and fibre-based products. However, fibre width alone does not determine crushing abilities of fibres. Smook (1994) emphasized that fibre width together with the length are the two most important parameters for suitability in pulp and paper production, while FAO (1996) also reported that fibre lumen width is as important as fibre width in determining its beatability.

Variation in fibre lumen width

Cell lumen influences wood density, moisture relations (i.e., moisture held by capillary forces) and suitability for pulping, as it gives indication of the cell wall thickness and the ability of the fibres to collapse during the beating processes (Browning 1963; Sanyer and Chidester 1963; Smook 1994). Panshin and de Zeeuw (1980) confirmed that lumen also affects rigidity of fibre-based products. Wide lumen fibres undergo easy beating to yield strong products, while narrow lumen resists beating thereby weakening inter-fibre bonds, which result in weak

îngust rezistă la măcinare, reducând legăturile inter-fibrilare, ceea ce conduce la obținerea unor produse inferioare. (Smook 1934; Panshin și de Zeeuw 1980; Jozsa și Middleton 1994). Lățimea lumenului variază de la 8.97 μ m pentru *C. milbraedii* (Ulmaceae) la 27.60 μ m pentru *C. odorata* (Meliaceae). Oluwadare și Sotannde (2007) au înregistrat o lățime redusă a lumenului fibrelor potrivite pentru celuloză de până la 9.87 μ m pentru *L. leucocephala*. Toate foioasele au înregistrat lumene late, mai mari decât la *L. leucocephala*, cu excepția speciei *C. Milbraedi*, ceea ce reprezintă un bun indicator pentru capacitatea de transformare în celuloză. Fibrele cu lumen lat și pereți subțiri tind să se aplatizeze ca benzile în timpul fabricării hârtiei, să intensifice legăturile dintre fibre și implicit și rezistențele (Oluwadare 1998; Osadare 2001). Totuși, deoarece cu cât lumenul e mai mare cu atât reține o cantitate mare de umiditate prin intermediul forțelor capilare, fibrele cu lumen lat tind să fie strivite ușor în timpul uscării și sunt mai instabile dimensional. Prin urmare, se poate aștepta ca lumenul cel mai lat al familiei Meliaceae să reacționeze în mod critic la schimbările ușoare ale umidității relative, în timp ce Ulmaceele care au avut cel mai îngust lumen, să reziste la schimbările umidității relative. Dacă fibrele cu lumen lat absorb ușor umiditatea în golurile lor, acestea creează un mediu favorabil pentru biodăunători. Prin urmare, Meliaceele ar putea fi mai sensibile la putrezire (în specia putregai moale) față de Ulmaceae.

Variația grosimii peretelui celular

Dimensiunea fibrelor diferă de la familie la familie (Dinwoodie 1961). Cantitatea de material celulozic a fibrelor depinde de grosimea peretelui celular, care este în relație cu lungimea fibrelor, lățimea și diametrul lumenului, deși alți factori pot include tipul și natura punctuațiilor (Butterfield și Meylan 1980). Grosimea peretelui celular al fibrelor guvernează, în general, densitatea (greutatea specifică) foioaselor, proprietățile mecanice sau rezistențele (Hale 1969; Butterfield și Meylan 1980) și posibilitatea de a fi transformate în celuloză (Fujiwara și Samesbjma 1991). Oluwadare și Sotannde (2007) au observat că grosimea peretelui celular și lungimea fibrelor au cea mai mare influență asupra celulozei nemăcinate. Grosimea peretelui celular al fibrelor influențează rigiditatea și rezistențele hârtiilor obținute din fibre de foioase (Panshin și de Zeeuw 1980). Alves și Angyalossy-Alfonso (2002) au lucrat cu 22 de familii (incluzând Meliaceae, Annonaceae, Apocynaceae, Bombacaceae, Combretaceae, Rubiaceae și Sapotaceae) și au raportat variații ale grosimii peretelui celular a 491 de specii incluzând *Cedrella odorata*, *C. angustifolia*, *Ceiba pentandra*, *Termilnalia amazonia* și *Chrysophyllum marginatum*). Ei au stabilit că 48.9% din foioasele tropicale au pereții fibrelor foarte subțiri, 20.7% au pereți subțiri până la groși, iar 30.4% au pereți groși. Dintre cele

products (Smook 1934; Panshin and de Zeeuw 1980; Jozsa and Middleton 1994). Lumen widths range from 8.97 μ m for *C. milbraedii* (Ulmaceae) to 27.60 μ m for *C. odorata* (Meliaceae). Oluwadare and Sotannde (2007) recorded a pulpable lumen width as narrow as 9.87 μ m for *L. leucocephala*. With the exception of *C. milbraedii*, all the hardwoods recorded lumen widths greater than for *L. leucocephala*, which is a good indicator for their efficient pulpability. Fibres with large lumen and thin walls tend to flatten into ribbons during paper-making, have enhanced inter-fibre bonding between fibres and consequently good strength characteristics (Oluwadare 1998; Osadare 2001). However, since the wider the lumen the greater the amount of moisture held by capillary forces, wide-lumen fibres tend to collapse easily during drying and are more dimensionally unstable. Therefore, the widest fibre lumina of the Meliaceae would be expected to respond critically to small changes in relative humidity, while the Ulmaceae, which recorded the narrowest lumen, would be expected to resist ambient moisture changes. Since the wide-lumen fibres would easily absorb moisture into their voids, they create conducive environment for bio-degraders. Hence, the Meliaceae would be more susceptible to decay (especially soft-rot) than the Ulmaceae.

Variation in fibre wall thickness

Fibre dimensions differ from family to family (Dinwoodie 1961). The amount of cellulosic material in a fibre depends on the wall thickness, which is interplay between fibre length, width and lumen, although other factors may include type and nature of pitting (Butterfield and Meylan 1980). Fibre wall thickness mostly governs the density (or specific gravity) of hardwoods, their mechanical or strength properties (Hale 1969; Butterfield and Meylan 1980) and pulpability (Fujiwara and Samesbjma 1991). Oluwadare and Sotannde (2007) observed that cell wall thickness and fibre length have the greatest influence on the strength properties of unbeaten pulp. Fibre wall-thickness affects the rigidity and strength properties of papers made from hardwood fibres (Panshin and de Zeeuw 1980). Alves and Angyalossy-Alfonso (2002) worked on 22 families (including Meliaceae, Annonaceae, Apocynaceae, Bombacaceae, Combretaceae, Rubiaceae and Sapotaceae) and reported variations in the fibre wall thicknesses of 491 species (including *Cedrella odorata*, *C. angustifolia*, *Ceiba pentandra*, *Termilnalia amazonia* and *Chrysophyllum marginatum*). They ascertained that 48.9% of tropical hardwoods are very thin-walled, 20.7% thin to thick-walled and 30.4% very thick-walled. For the three families currently studied, 66.7% of their members are thick-walled and 33.3% of medium thickness. Moreover,

trei familii studiate, 66.7% dintre specii au avut pereți groși iar 33.3% au avut pereți de grosime medie. Pe lângă acestea, în timp ce Alves și Angyalossy-Alfonso (2002) au raportat pereți ai fibrelor foarte subțiri pentru specia *C. odorata*, în studiul curent s-au obținut pereți groși pentru această specie. Studiul pe *L. leucocephala* realizat de către Oluwadare și Sotannde (2007) au stabilit o grosime a peretelui celular de 2.90μm pentru celuloză, în timp ce Horn și Setterholm (1990) au furnizat ca valoare a grosimii peretelui pentru celuloză 5.8μm pentru stejar alb și 3.4μm pentru arin roșu. Grosimea peretelui celular al fibrelor înregistrată pentru foioasele tropicale (3.26μm pentru *T. scleroxylon* la 5.49μm pentru *P. macrocarpa* (specii de Sterculiaceae) se încadrează valorile raportate de acești autori ca indicate pentru obținerea celulozei. Speciile de Meliaceae și Sterculiaceae și apoi cele de Ulmaceae au înregistrat cei mai groși pereți celulari ai fibrelor. IAWA (1989, 1991) ar clasifica pereții celulari de Meliaceae și Sterculiaceae ca fiind groși (peste 4μm) iar cei de Ulmaceae ca fiind medii (2 - 4μm). În timp ce grosimea peretelui celular se corelează în mod tipic cu densitatea (cantitatea de material celulozic pe fibră) și alte proprietăți mecanice (Haygreen și Bowyer 1996), aceasta ar putea explica densitatea mare caracteristică Meliaceelor și Sterculiaceelor, cu capacități portante ridicate. Mai mult, speciile din aceste familii, cu pereți groși ai fibrelor, pot rezista la atacul biodăunătorilor.

Raportul Runkel și coeficientul de Flexibilitate

Runkel (1952) a observat că fibrele de foioase tropicale potrivite pentru fabricarea hârtiei depind de raportul dintre dublul grosimii peretelui celular și lățimea lumenului, care, după cum afirmă autorul, ar trebui să fie mai mic de 1.25 pentru a asigura o bună legătură între fibre și producția de hârtie cu rezistențe bune. Cu cât este mai mic raportul, cu atât se pot realiza produse din fibre mai bune. Toate speciile au înregistrat rapoarte mai mari decât 1.25 (2.65 pentru *C. odorata* la 3.9 pentru *C. milbraedii*), pe care le-au raportat Lessard și Chouinard (1980) că ar putea semnifica legături foarte slabe și slabe între fibre pe durata formării foilor de hârtie, cu rezistențe la tracțiune și crăpare scăzute. Oricum, coeficientul de flexibilitate (FC), care compară diametrul fibrelor cu diametrul lumenului, ce se așteaptă să fie peste 50% pentru a clasifica fibrele pentru fabricarea celulozei și hârtiei (FAO, 1996), arată că toate foioasele din cele trei familii studiate s-au situat în categoria 75-50. Coeficientii (CF) acestora de 51.29 (pentru *C. milbraedii*) la 75.6 (pentru *C. odorata*) indică faptul că sunt potrivite pentru celuloză. Prin urmare, *C. odorata* ar putea ajunge la colaps total (în timpul măcinării), bune suprafețe de contact (în timpul presării) până la producția de hârtie cu rezistențe bune. Fibrele celorlalte specii de foioase au avut colaps parțial cu secțiuni transversale eliptice, bune suprafețe de

while Alves and Angyalossy-Alfonso (2002) reported very thin-walled fibres for *C. odorata*, thick wall was recorded for this timber. Studies on *L. leucocephala* by Oluwadare and Sotannde (2007) established its cell-wall thickness of 2.90μm pulpable, while Horn and Setterholm (1990) provided pulpable thicknesses of 5.8μm for white oak and 3.4μm for red alder. Fibre wall thicknesses recorded for the tropical hardwoods (3.26μm for *T. scleroxylon* to 5.49μm for *P. macrocarpa* (members of the Sterculiaceae) fall within those reported pulpable by these authors. Members of the Meliaceae recorded the thickest fibre walls followed by those of the Sterculiaceae and then the Ulmaceae. IAWA (1989, 1991) would classify fibre walls of the Meliaceae and Sterculiaceae thick (i.e., over 4μm) and those of the Ulmaceae medium (i.e., 2 - 4μm). Since fibre wall-thickness correlates typically with specific gravity (i.e. the amount of cellulosic materials per unit fibre) and other strength characteristics (Haygreen and Bowyer 1996), this could contribute to explaining the high density characteristics of the Meliaceae and Sterculiaceae, which have high load-bearing capacities as well. Moreover, their thick-walled fibres would assist members of these timber families withstand grazing by bio-degraders.

Runkel Ratio and Flexibility Co-efficient

Runkel (1952) observed that suitability of tropical hardwood fibres for paper manufacture depends on the ratio of the double wall thickness to the lumen width, which, he stressed, should be less than 1.25 to ensure good inter-fibre bonds and production of papers with quality strength properties. The lower the ratio, the better the fibre-based products produced. All the timbers recorded ratios greater than 1.25 (i.e., 2.65 for *C. odorata* to 3.9 for *C. milbraedii*), which Lessard and Chouinard (1980) reported would signify poor and weakened fibre to fibre bonding during sheet or paper formation with low tensile and burst strengths. However, the Flexibility Co-efficient (FC), which compares the fibre diameter to the lumen diameter and expected to be not less than 50% to qualify for pulp and paper-making (FAO, 1996), shows that all the hardwoods from the three families fall within the 75-50 category. Their FC range of 51.29 (for *C. milbraedii*) to 75.6 (for *C. odorata*) indicates their suitability for pulping. Thus, *C. odorata* would undergo total collapse (during beating), good surface contact and very strong inter-fibre bonds (during pressing) to yield high quality paper in terms of strength. Fibres from the other hardwoods would, however, experience partial collapse with elliptical cross-section, good surface contact and inter-fibre bonding. Schimleck and Clark (2009) reported that fibre (or tracheid)

contact și legături între fibre. Schimleck și Clark (2009) au raportat că dimensiunile fibrelor (sau traheidelor) precum lungimea și diametrul (în ambele direcții radială și tangențială), grosimea peretelui celular și rugozitatea sunt indicatori importanți de calitate în fabricarea produselor de hârtie, pe lângă unghiul microfibrilelor și densitate. Importanța dimensiunii fibrelor asupra proprietății produselor din fibre precum cele ale hârtiei depind de sursa de celuloză. Celuloza de foioase (din *Eucalyptus* spp.) produce hârtie cu calitate ridicată la imprimare sau scriere și produse țesute în comparație cu celuloza de rășinoase (*Pinus taeda*) din care se fabrică hârtie grosieră și carton ondulat. Fibrele de eucalipt sunt relativ scurte, zvelte și cu pereți subțiri, excelente pentru formarea foilor de hârtie cu volum mare, suprafețe deosebite, densitate, duritate și proprietăți optice. Celuloza de *P. taeda* a avut proprietăți ale suprafețelor inferioare, dar rezistențe mecanice superioare, în mod particular rupere și tracțiune, care sunt relativ similare cu cele corespunzătoare produselor din fibre cu dimensiuni mai mari, care au un potențial mai mare pentru legături bune între fibre față de *Eucalyptus* cu fibre scurte.

Înțelegerea variației între dimensiunile fibrelor diferitelor specii ar oferi cercetătorilor și tehnologilor instrumentul adecvat pentru identificarea speciilor adecvate pentru fabricarea plăcilor din fibre, a celulozei și hârtiei, pentru aplicații structurale, precum și estimarea durabilității. Astfel, odată cu extinderea exploatării resurselor de lemn, trebuie adoptat conceptul de "utilizare totală a arborelui" pentru ca ramurile lemnoase și vârfurile lor (după exploatare) să poată fi în întregime înglobate în diferite produse, pentru a asigura sustenabilitatea resurselor.

CONCLUZII

Lungimile fibrelor au variat la foioasele studiate, de la valori de 0.79mm pentru *H. grandis* (the Ulmaceae) la 1.88mm pentru *K. ivorensis* (Meliaceae). IAWA (1937; 1991) clasifică fibrele de Meliaceae (1.61mm) ca moderat de lungi și medii pentru Sterculiaceae și Ulmaceae (1.59 și respectiv 1.19mm). *C. Odorata* (Meliaceae) a avut cele mai late fibre (36.5μm) și lumen (27.6μm); *C. milbraedii* (Ulmaceae) a avut cele mai înguste fibre (17.49 și respectiv 8.97μm). grosimea peretelui fibrelor, care influențează semnificativ densitatea lemnului, rezistențele și posibilitatea de transformare în celuloză, a variat, de asemenea, de la 3.31μm (*H. grandis*) la 5.49μm (*P. macrocarpa*). Cele de Meliaceae și Sterculiaceae sunt groase (peste 4μm) iar cele de Ulmaceae sunt medii (2-4μm). De asemenea, raportul Runkel pentru foioase, toate dimensiunile fibrelor (lungime, lățime, lumen și grosimea peretelui celular) și coeficientul de flexibilitate indică faptul că acestea sunt potrivite pentru industria de celuloză. Dimensiunile fibrelor examinate arată că există variații la foioase și

dimensions such as length and diameter (in both the radial and tangential directions), cell wall thickness and coarseness are all important wood quality indicators for the manufacture of paper products, in addition to microfibril angle and density. Importance of fibre dimensions on product properties such as those of paper depends on the source of pulp. Hardwood pulps (e.g. from *Eucalyptus* spp.) produce high quality printing or writing papers and tissue products compared to pulps from softwoods (e.g. *Pinus taeda*), manufacture of paper grocery bags and corrugated linerboard. Eucalypt fibres are relatively short, slender and thin-walled for excellent sheet formation with high bulk, outstanding surface, density, stiffness and optical properties. *P. taeda* pulps have inferior surface properties but superior strength characteristics, particularly tear and tensile strengths, which are relatively similar to large fibre dimensions, which have greater potential for more inter-fibre bonds than the short fibres of *Eucalyptus*.

Understanding variations in fibre dimensions among timber species would significantly enable wood scientists and technologists identify those suitable for fibreboard, pulp and paper manufacture, structural utilization and their durability characteristics. Thus, with the current looming over-exploitation of timber resources, the "total-tree utilization concept" need be adopted such that timber branches and their off-cuts (after harvesting) could all be engineered into a number of products for sustainability of the resource.

CONCLUSION

Fibre lengths vary among the hardwoods studied, which range from 0.79mm for *H. grandis* (the Ulmaceae) to 1.88mm for *K. ivorensis* (the Meliaceae). IAWA (1937; 1991) would classify fibres of the Meliaceae (1.61mm) moderately long and medium-size for the Sterculiaceae and Ulmaceae (1.59 and 1.19mm respectively). *C. Odorata* (Meliaceae) has the widest fibres (36.5μm) and lumen (27.6μm); *C. milbraedii* (Ulmaceae) has the narrowest (17.49 and 8.97μm respectively). Fibre wall thickness, which largely governs wood density, strength properties and pulpability, also ranges from 3.31μm (for *H. grandis*) to 5.49μm (for *P. macrocarpa*). Those of Meliaceae and Sterculiaceae are thick (i.e. over 4μm) but medium (2-4μm) for the Ulmaceae. Besides the hardwoods' Runkel ratios, all their fibre dimensions (i.e. lengths, widths, lumina and wall thicknesses) and Flexibility Co-efficients indicate their suitability for efficient pulping. Fibre dimensions examined reveal that variations between those for the hardwoods and their families exist, which would influence their pulp quality, durability

famiile lor, care pot influența calitatea pentru fabricarea celulozei, durabilitatea și proprietățile fizico-mecanice, informații ce ar putea fi exploatate de industria lemnului pentru diferite aplicații.

MULȚUMIRI

Ne exprimăm profunđa grațitudine Domniilor lor Emmanuel Ebanyenle, Jacob Govina Kujo și colectivului Laboratorului de Anatomie și Studii Forestiere din Ghana [FORIG], Consiliului pentru Cercetarea Științifică și Industrială (CSIR), Kumasi, Ghana. Mulțumim de asemenea, d-nei Agnes Ankomah Danso (Biometrician, Crops Research Institute [CRI] of CSIR, Kumasi) pentru analiza statistică.

and physico-mechanical properties, which could be exploited by the wood industry for several applications.

ACKNOWLEDGEMENT

We express our profound gratitude to Messrs. Emmanuel Ebanyenle, Jacob Govina Kujo and staff of the Anatomy Laboratory of Forest Research Institute of Ghana [FORIG] of Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Kumasi, Ghana. We also thank Miss Agnes Ankomah Danso (Biometrician, Crops Research Institute [CRI] of CSIR, Kumasi) for the statistical analysis.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- ALVES, E.S., ANGYALOSSY-ALFONSO, V. (2002). Ecological Trends in the Wood Anatomy of Some Brazilian Species. 2. Axial Parenchyma, Rays and Fibres: In IAWA 2002, Vol. 23 (4), the Netherlands.
- AMIDON, T.E. (1981). Effect of the Wood Properties of Hardwood on Kraft Paper Properties, TAPPI, 64:123-126.
- ANTWI-BOASIAKO, C., ATTA-OBENG, E. (2009). Veessel-Fibre ratio, Specific gravity and Durability of four Ghanaian Hardwoods. *Journal of Science & Technology*, Ghana, Vol. 29, No. 3.
- BARKAS, W.W., HEARMON, R.F.S., RANCE, H.F. (1953). Mechanical Properties of Wood and Paper, Ed. J. M. Burgers, J. J. Hermans and G. W. Scott Blair, North Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands. Pp. 1-282.
- BHAT, K.M., BHAT, K.V., DHAMODARAN, T.K. (1985). Fibre Length Variation in Stem and Branches of Eleven Tropical Hardwoods; Wood and Bark Properties of Branches of Selected Tree Species growing in Kerala. KFRI, Research Report 29, Kerala, India.
- BHAT, K.M., RUGMINI, P. (1985). Long-fibred Raw Material from Tropical Hardwoods *Dillenia pentagyna* Roxb. *J. Inst. Wood Sci.* 10:152-153.
- BROWNING, B.L. (Ed). (1963). The Chemistry of Wood. The Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. 689pp.
- BUTTERFIELD, B.G., MEYLAN, B.A. (1980). Three-dimensional Structure of Wood: An Ultra Structural Approach; 2nd edition, London, New York, Chapman and Hall 150th Anniversary. Pp.1-103.
- DESCH, H.E., DINWOODIE, J.M. (1996). Timber: Its Structure, Properties, Conversion and Use. 7th edition. Macmillan Press Ltd., Houndmills, Basingstoke, Hampshire and London, UK. 306 pp.
- DICKINSON, W.C. (2000). Integrative Plant Anatomy. Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, 525B Street, Suite 1900, San Diego, California 92101- 4495, USA. Pp. 1-533. Academic Press (<http://www.academicpress.com> and <http://www.hbuk.co.uk/ap/>) and Harcourt Academic Press (<http://www.harcourt-ap.com>), London, New York, Toronto, Tokyo.
- DINWOODIE, J.M. (1961). Tracheids and Fibre Length in Timber: A Review of Literature, *Forestry* 34:125-144.
- DINWOODIE, J.M. (1965). The Relationship between Fibre Morphology and Paper Properties: A Review of Literature, TAPPI, 48:440-447.
- DODD, R.S. (1986). Fibre Length Measurement Systems: A Review and Modification of an existing Method. *Wood and Fibre Sci.* 18:276-287. In IAWA, 1989, IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification.
- FENGEL, A.C. (1941). Comparative Anatomy and Varying Physical Properties of Trunk, Branch and Root Woods in certain North-eastern Trees. New York (USA) State College *For. Tech. Bull.* 55(14):5-20.
- HALE, J.D. (1969). Structural and Physical Properties of Pulpwood, Dominion Forest Products Laboratory. In: Macdonald, R. G. and Franklin, J. N. 1969. Pulp and Paper Manufacture; the Pulping of Wood, Vol. 1, Pp. 1-769. Joint Textbook Committee of the Paper Industry. McGraw-Hill Book Company. New York, London, Panama, Mexico, Toronto.
- HART, C.A., SWINDLE, B.F. (1967). Notes on the Laboratory Sampling of Macerated Wood Fibres. TAPPI, 50:379-381.
- HAYGREEN, J.G., BOWYER, J.L. (1996). Forest Products and Wood Science; an Introduction, IOWA State

- University Press/AMES, Pp. 1-484.
- HORN, R.A. (1974). Morphology of Wood Pulp Fibre from Softwoods and Influence on Paper Strength. USDA Forest Service Research Paper FPL 242. 1974. pp: 1-11.
- HORN, R.A. (1978). Morphology of Pulp Fibre from Hardwoods and Influence on Paper Strength. USDA For. Serv. Res. Pap. FPL 312. For. Prod. Lab, Madison, WI. 11pp.
- HORN, R.A., SETTERHOLM, V.C. (1990). Fibre Morphology and New Crops. Pp. 270-275. In: J. Janick and J.E. Simon (eds.), *Advances in New Crops*. Timber Press, Portland, OR., USA.
- IAWA. (1937). Standard Terms of Length of Vessel Members and Wood Fibres. *International Association of Wood Anatomists (IAWA) Trop.Woods*. 51:21.
- IAWA. (1989). *International Association of Wood Anatomists (IAWA) List of Microscopic Features for Hardwood Identification*; by an IAWA Committee. Eds. Wheeler, E. A., Baas, P. and Gasson, P. E., Published by the IAWA at the Rijksherbarium, Leiden, The Netherlands. *IAWA bulletin* n.s 10(3):219-332.
- IAWA. (1991). *Anatomy and Properties of Japanese Hardwoods, Variation of Fibre Dimensions and Tissue Proportions and their Relation to Basic Density*. *International Association of Wood Anatomists (IAWA) Bulletin* n.s., Vol. 1 (4), 1991:419-424.
- IRVINE, F.R. (1961). *Woody Plants of Ghana; with Special Reference to their Uses*. University Press, Oxford, London, by Vivian Ridler, Printer to the University. Pp. 1-868.
- JOZSA, L.A., MIDDLETON, G.R. (1994). *Wood Quality Attributes and their Practical Implications*, Forintek Canada Corp., 2655 East Mall, Vancouver BC, Canada V6T 1W5 - Special Publ. No. SP-34. 42 pp. (<http://www.metriguard.com/fiber.htm>).
- KOLLMANN, F.F.P., CÔTÉ, W.A.Jnr. (1984). *Principles of Wood Science and Technology I, Solid Wood*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York. Pp.1-560.
- MANWILLER, F.G. (1974). Fibre Lengths in Stems and Branches of small Hardwoods on southern pine sites. *Wood Sci.* 7(2):130-132.
- METCALFE, C.R., CHALK, L. (1983). *Anatomy of the Dicotyledons*. 2nd edn., Vol. 11, Clarendon Press, Oxford.
- OLUWADARE, A.O. (1998). Evaluation of the Fibre and Chemical Properties of Some Selected Nigerian Wood and Non-wood species for pulp production. *J. Trop. For. Res.*, 14:110-119.
- OLUWADARE, A.O., SOTANDE, O.A. (2007). The Relationship between Fibre Characteristics and Pulp-sheet Properties of *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *Middle-East Journal of Scientific Research* 2 (2): 63-68, IDOSI Publications.
- OSADARE, A.O. (2001). *Basic Wood and Pulp Properties of Nigerian-grown Caribbean Pine (Pinus caribaea Morelet) and their Relationship with Tree Growth Indices*. Ph.D. Thesis, University of Ibadan, 347 pp.
- OTENG-AMOAKO, A.A. [Ed.]. (2006). 100 Tropical African Timber Trees from Ghana; Tree Description and Wood Identification with Notes on Distribution, Ecology, Silviculture, Ethnobotany and Wood Uses. 304pp.
- PANSHIN, J., ZEEUW, C. (1980). *Textbook of Wood Technology*. 4th edition, McGrawhill, New York, 772 pp.
- SANYER, N., CHIDESTER, G.H. (1963). *Manufacture of Wood Pulp*. In: Browning, B. L. 1963, *The Chemistry of Wood*. Forest Products Laboratory, Forest Service, United States Department of Agriculture, Madison, Wisconsin by John Wiley and Sons, Inc., The Institute of paper chemistry, Appleton, Wisconsin, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- SCHIMLECK, L.R., CLARK, A. (2008). *Wood Quality*. *Forestry Encyclopedia*. From: Products and Man12, International Society of Tropical Foresters; Society of American Foresters.
- SMOOK, G.A. (1994). *Handbook for Pulp and Paper Technologists*. 2nd edition, Angus Wilde Publications Inc. Vancouver, B. C., Canada. Pp. 1-419.
- TAYLOR, F.W. (1979). Property Variation within Stems of Selected Hardwoods Growing in the Mid-South. *Wood Sci.* 11:193-199.
- TIEMANN, H.D. (1951). *Wood Technology; its Constitution, Properties and Uses*, 3rd ed. Pitman Publishing Corporation, New York, Toronto and London, Pp.1-385.
- VERVERIS, C., GEORGHIOU, K., CHRISTODOULAKIS, N., SANTAS, P., SANTAS, R. (2004). Fiber Dimensions, Lignin and Cellulose Content of Various Plant Materials and their Suitability for Paper Production. *Industrial Crops and Products* 19:245–254. www.sciencedirect.com.
- WANGAARD, F.F., WOODSON, G.E. (1973). Fibre Length and Fibre Strength in Population of Kraft Pulps Produced from a Diverse Hardwood Species. *Wood Sci.*, 5:235-240.
- WILSON, K., WHITE D.J.B. (1986). *The Anatomy of Wood; its Diversity and Variability*. Published by Stobart and Sons Ltd, Worship Street, London. Pp. 67-73.
- WOOD, I.M. (1981). The Utilization of Field Crops and Crop Residues for Paper Pulp Production. *Field Crop Abstract*, 34:557-568.